



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

IZABELA MEDEIROS DE LIMA BEZERRA

**ANÁLISE DA INTERAÇÃO INTERPARTÍCULAS E DO PROCESSO DE  
FISSURAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO TRATADO COM AREIA, CAL E  
CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Recife

2020

IZABELA MEDEIROS DE LIMA BEZERRA

**ANÁLISE DA INTERAÇÃO INTERPARTÍCULAS E DO PROCESSO DE  
FISSURAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO TRATADO COM AREIA, CAL E  
CINZA DE CASCA DE ARROZ**

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

**Área de concentração:** Geotecnia.

**Orientador:** Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Recife

2020

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

B574a Bezerra, Izabela Medeiros de Lima.  
Análise da interação interpartículas e do processo de fissuração de um solo expansivo tratado com areia, cal e cinza de casca de arroz / Izabela Medeiros de Lima Bezerra – Recife, 2020.  
105 f.: figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.  
Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Solos expansivos. 3. Reologia. 4. Fissuras em solo. 5. Análise de imagem. 6. Estabilização de solos. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2020-136

IZABELA MEDEIROS DE LIMA BEZERRA

**ANÁLISE DA INTERAÇÃO INTERPARTÍCULAS E DO PROCESSO DE  
FISSURAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO TRATADO COM AREIA, CAL E  
CINZA DE CASCA DE ARROZ**

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

Aprovada em: 11 / 02 / 2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira (Examinador Externo)  
Universidade Católica de Pernambuco

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Katia Vanessa Bicalho (Examinadora Externa)  
Universidade Federal do Espírito Santo

Dedico esse trabalho a minha família, em especial ao meu bisavô Leonardo Coutinho (*In memoriam*), pela minha educação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, sem Ele nada seria possível.

À toda minha família pelo incentivo e apoio em mais uma conquista acadêmica. Em especial a minha mãe Izabel, pelo carinho e dedicação que me doou durante toda a minha existência.

Ao prof. Dr. Silvio Romero pela orientação, confiança, dedicação, tempo, paciência e conhecimentos transmitidos durante todo o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os professores que influenciaram na minha trajetória acadêmica e de vida.

Aos professores da área de Geotecnia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE por todo o conhecimento compartilhado.

À equipe técnica do Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco, em especial a Gutemberg pela atenção e por toda a orientação durante a realização dos ensaios para esta pesquisa.

Aos colegas do mestrado pela cooperação e apoio durante a pesquisa, em especial a Arthur Araújo e Felipe Barbosa.

Ao Departamento de Planos e Projetos da Superintendência de Infraestrutura da UFPE por permitir a flexibilidade no horário de trabalho para a realização do mestrado.

Agradeço aos meus amigos, Hugo Vale, Layssa Lima e Macirleide Duarte, por todo apoio emocional e incentivo durante a realização do mestrado.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

Solos expansivos são solos não saturados que apresentam como característica principal o aumento de volume quando umedecidos e contração quando ressecados. Essa variação volumétrica pode causar vários danos às obras de engenharia. Sendo assim, é necessário fazer a correção do solo disponível no local para que ele se torne estável para a sua utilização. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento reológico e a dinâmica de fissuração de um solo de alta expansividade do município de Paulista/PE e de sua mistura com areia (50%), cal hidratada (5%) e cinza de casca de arroz – CCA (10%). O estudo do comportamento reológico está associado com a interação entre as partículas do solo com o fluido e foi realizado através do ensaio squeeze-flow. Para o processo de propagação de fissuras foi utilizado um aparato que permite monitorar o processo de propagação de fissuras com medida de temperatura, umidade relativa do ar, umidade do solo, além de capturar imagens através de uma câmera. O processamento de imagens foi realizado através do software ImageJ para quantificar os índices geométricos como largura média da fissura, comprimento total da fissura, área fissurada, número de segmentos de fissuras e CIF (razão entre área fissurada e área inicial da amostra). A curva carga versus deslocamento apresenta comportamento elástico, plástico e plástico com endurecimento dependendo da quantidade de água e da consistência do solo e das misturas. Os resultados mostraram que é possível relacionar a umidade com o comportamento do solo observado através dos índices reológicos. A faixa de deslocamento e a intensidade de cada estágio da curva carga versus deslocamento variam de acordo com a composição dos materiais (teores de água e ar, dimensão mínima e máxima das partículas e presença de aditivos). O solo argiloso e as misturas tendem a fissurar mais facilmente com alto teor de água e o potencial de retração e fissuração atenua com a diminuição do teor de água. Os resultados sugerem que a adição de areia, cal ou CCA é um método que possibilita a redução do processo da fissuração por ressecamento devido à interação das partículas do solo com esses materiais que aumenta a resistência ao fissuramento. A propagação de fissuras nas misturas ocorre em forma de “T” ou “Y” em toda a superfície da amostra juntamente com sua contração. Todos os índices geométricos das fissuras aumentaram com a diminuição da umidade e próximo ao fim do ensaio diminuíram, comportamento encontrado no solo natural e nas misturas. O processo de propagação de fissuras devido à secagem desenvolve-se em três estágios de contração: inicial, primário e secundário. No inicial, a amostra perde umidade superficial sem ocorrer

contração ou aparecimento de fissuras significativas. O segundo estágio corresponde a fase de maior aumento dos índices geométricos com o tempo devido à redução de umidade. Na contração secundária, há redução dos índices geométricos com o tempo.

**Palavras-chave:** Solos expansivos. Reologia. Fissuras em solo. Análise de imagem. Estabilização de solos.

## ABSTRACT

Expansive soils are unsaturated soils whose main characteristic is volume increase when moistened and shrinkage when dried. This volumetric variation can cause various damages to engineering works. Therefore, soil correction must be made available on site to make it stable for use. The present work aims to evaluate the rheological behavior and cracking dynamics of a highly expansive soil in the city of Paulista/PE and its mixture with sand (50%), hydrated lime (5%) and rice husk ash - CCA (10%). The study of rheological behavior is associated with the interaction between soil particles and fluid and was performed through the squeeze-flow test. For the crack propagation process, an apparatus was used that allows monitoring the crack propagation process with temperature measurement, relative humidity, soil moisture, in addition to capturing images through a camera. Image processing was performed using the ImageJ software to quantify geometric indexes such as average crack width, total crack length, crack area, number of crack segments and CIF (ratio of crack area to initial sample area). The load versus displacement curve exhibits elastic, plastic and hardening plastic behavior depending on the amount of water and the consistency of the soil and mixtures. The results showed that it is possible to relate the humidity with the soil behavior observed through the rheological indexes. The displacement range and intensity of each stage of the load versus displacement curve vary according to the composition of the materials (water and air contents, minimum and maximum particle size and presence of additives). Clay soil and mixtures tend to crack more easily with a high water content and the potential for shrinkage and cracking attenuates with a decrease in water content. The results suggest that the addition of sand, lime or CCA is a method that allows the reduction of the drying cracking process due to the interaction of soil particles with these materials that increases the cracking resistance. The propagation of cracks in the mixtures occurs in the form of "T" or "Y" on the entire surface of the sample together with its contraction. All the geometric indexes of the cracks increased with the decrease in humidity and near the end of the test they decreased, a behavior found in natural soil and in mixtures. The crack propagation process due to drying develops in three contraction stages: initial, primary and secondary. Initially, the sample loses surface moisture without contraction or the appearance of significant cracks. The second stage corresponds to the phase of greatest increase in geometric indices over time due to the reduction in humidity. In secondary contraction, there is a reduction in geometric indices over time.

**Keywords:** Expansive soils. Rheology. Cracks in soil. Image analysis. Soil stabilization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Modelo de placas paralelas proposto por Newton para explicar a viscosidade .....	30
Figura 2 –	Perfil típico de uma curva carga <i>versus</i> deslocamento de um ensaio squeeze-flow .....	32
Figura 3 –	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) início da fissuração .....	34
Figura 4 –	Variação da umidade e da velocidade de evaporação com o tempo de ressecamento .....	35
Figura 5 –	Estágios de desenvolvimento das fissuras: (a) estágio inicial; (b) estágio primário; (c) estágio estacionário .....	36
Figura 6 –	Alguns aparatos desenvolvidos para ensaio de fissuras .....	37
Figura 7 –	Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração para o solo de Paulista .....	38
Figura 8 –	Utilização do comando <i>threshold</i> no software ImageJ para binarização da imagem .....	40
Figura 9 –	Diferentes estágios do processamento de imagem: (a) imagem original colorida; (b) imagem em escala de cinza; (c) imagem binária .....	41
Figura 10 –	Desenvolvimento do processo de fissuração para o solo natural de Paulista-PE .....	41
Figura 11 –	Curva granulométrica do solo de Paulista-PE .....	43
Figura 12 –	Curva de deformação específica com o tempo para o solo de Paulista-PE .....	43
Figura 13 –	Curvas granulométricas da areia e da mistura solo-areia (50%) .....	44
Figura 14 –	Curva granulométrica da mistura solo-cal (5%) .....	46
Figura 15 –	Curvas granulométricas da cinza de casca de arroz e da mistura solo-CCA (10%) .....	47

Figura 16 –	Preparação das amostras: a) solo natural, b) solo-areia, c) solo-CCA, d) solo-cal .....	48
Figura 17 –	Ensaio de Limite de Liquidez (a) e Densidade real dos grãos (b) .....	48
Figura 18 –	Conjunto de ferramentas necessárias para moldagem das amostras para o ensaio squeeze-flow: (1) gabarito; (2) placa superior; (3) espátula; (4) anel para moldagem 100,2 mm de diâmetro e 10 mm de altura; (5) placa inferior .....	49
Figura 19 –	(a) Amostra de solo natural (w=60,50%) no início do ensaio; (b) Solo após ensaio .....	50
Figura 20 –	Corpos de prova no início dos ensaios: (a) solo natural, w = 64%; (b) solo-areia, w = 54%; (c) solo-cal, w = 83%; (d) solo-CCA, w = 74,5% .....	50
Figura 21 –	Curva carga <i>versus</i> deslocamento com definição dos três estágios do comportamento reológico .....	51
Figura 22 –	Aparato do ensaio de propagação de fissuras .....	52
Figura 23 –	Preparação de amostra para ensaio de propagação de fissuras .....	53
Figura 24 –	Início do ensaio de propagação de fissuras para as amostras: (a) solo-areia; (b) solo-cal; (c) solo-CCA .....	53
Figura 25 –	Fim do ensaio de propagação de fissuras para as amostras: (a) solo-areia; (b) solo-cal; (c) solo-CCA .....	54
Figura 26 –	Imagem do início do ensaio de propagação de fissuras para a amostra solo-CCA obtida com o software Auto Screenshot Capture .....	55
Figura 27 –	Imagens obtidas por meio de uma câmera fotográfica profissional para geração do modelo tridimensional da amostra solo-cal .....	55
Figura 28 –	Modelo tridimensional da amostra solo-cal desenvolvido com o software Agisoft Metashape .....	56
Figura 29 –	Visualização do modelo tridimensional da amostra solo-cal no software 3DS Max .....	56
Figura 30 –	Distribuição granulométrica do solo, areia, CCA e das misturas .....	58
Figura 31 –	Carta de Plasticidade e Atividade .....	58
Figura 32 –	Resultados dos ensaios de limites de liquidez para as amostras de solo natural, solo-areia, solo-cal e solo-CCA .....	60

Figura 33 –	Resultados dos ensaios de squeeze-flow para as amostras de solo natural, solo-areia, solo-cal e solo-CCA para as umidades próximas aos pontos da reta do limite de liquidez .....	61
Figura 34 –	Resultado do ensaio de squeeze-flow para o solo natural na umidade igual a 79% .....	61
Figura 35 –	Variação da tensão de escoamento com a umidade .....	63
Figura 36 –	Variação da tensão de escoamento e enrijecimento com a deformação e da relação entre a tensão de enrijecimento e escoamento com a umidade .....	64
Figura 37 –	Formas dos corpos de prova ao final do ensaio squeeze-flow para as amostras de (a) solo natural, (b) solo-areia, (c) solo-cal e (d) solo-CCA para as umidades do limite de liquidez .....	66
Figura 38 –	<i>Zinnia angustifolia</i> Profusion Orange, um cultivar da série Profusion .....	66
Figura 39 –	Percentual de água, ar e sólidos para as amostras de: (a) solo natural; (b) solo-areia; (c) solo-cal; (d) solo-CCA .....	67
Figura 40 –	Relação Carga máxima (para 8 mm de deslocamento) <i>versus</i> Índice de vazios no ensaio Squeeze-flow .....	68
Figura 41 –	Resultados dos ensaios de squeeze-flow para as amostras de solo natural, solo-areia, solo-cal e solo-CCA para as umidades do limite de liquidez e limite de plasticidade .....	69
Figura 42 –	Obtenção da área fissurada com o software ImageJ para a amostra solo-areia .....	71
Figura 43 –	Obtenção da largura média das fissuras com o software ImageJ para a amostra solo-areia .....	72
Figura 44 –	Obtenção do comprimento total das fissuras com o software ImageJ para a amostra solo-areia .....	72
Figura 45 –	Obtenção do número de segmentos de fissuras com o software ImageJ para a amostra solo-areia .....	73
Figura 46 –	Primeiras fissuras nas amostras ensaiadas: (a) solo natural de Paulista-PE; (b) solo-areia; (c) solo-cal; (d) solo-CCA .....	75
Figura 47 –	Evolução das fissuras no ensaio da amostra solo-areia .....	77
Figura 48 –	Resultados do ensaio da amostra solo-areia .....	78

Figura 49 –	Evolução das fissuras no ensaio da mistura solo-cal .....	81
Figura 50 –	Resultados do ensaio da amostra solo-cal .....	82
Figura 51 –	Evolução das fissuras no ensaio da mistura solo-CCA .....	85
Figura 52 –	Resultados do ensaio da amostra solo-CCA .....	86
Figura 53 –	Comparativo dos ensaios no solo e misturas: (a) Umidade <i>versus</i> CIF; (b) Umidade <i>versus</i> Largura média das fissuras; (c) Umidade <i>versus</i> Comprimento total das fissuras; (d) Umidade <i>versus</i> N° de segmentos de fissuras .....	88
Figura 54 –	Comparativo dos ensaios no solo e misturas: (a) curva Tempo <i>versus</i> Umidade; (b) Tempo <i>versus</i> Umidade (escala Log) .....	89
Figura 55 –	Comparativo dos ensaios no solo e misturas: (a) Curva característica; (b) Sucção Total <i>versus</i> Índice de Vazios .....	89
Figura 56 –	Comparativo dos ensaios no solo e misturas: Umidade Volumétrica <i>versus</i> Índice de Vazios .....	93
Figura 57 –	Modelo tridimensional da mistura solo-areia (a), solo-cal (b) e solo- CCA (c) .....	93
Figura 58 –	Curva de deformação <i>versus</i> tempo devido ao umedecimento e Curva Umidade <i>versus</i> CIF .....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Caracterização granulométrica do solo de Paulista-PE e da mistura solo-areia do estudo de Cavalcanti (2017) .....	25
Tabela 2 –	Valores de expansão livre e tensão de expansão para o solo de Paulista-PE e misturas solo-areia do estudo de Cavalcanti (2017) .....	25
Tabela 3 –	Caracterização granulométrica do solo de Paulista-PE e da mistura solo-cal do estudo de Paiva (2016) .....	27
Tabela 4 –	Valores de expansão livre e tensão de expansão para as misturas solo-cal no município de Paulista-PE do estudo de Paiva (2016) .....	27
Tabela 5 –	Caracterização granulométrica do solo de Paulista-PE e da mistura solo-CCA do estudo de Constantino (2018) .....	28
Tabela 6 –	Valores de expansão livre e tensão de expansão para as misturas solo-CCA no município de Paulista-PE do estudo de Constantino (2018) .....	29
Tabela 7 –	Caracterização Física da areia de Bezerros-PE .....	44
Tabela 8 –	Análise química da cal utilizada nesta pesquisa .....	45
Tabela 9 –	Resultados dos óxidos da cal por fluorescência de raios-X .....	45
Tabela 10 –	Caracterização Física da cinza de casca de arroz .....	46
Tabela 11 –	Caracterização Física do solo natural e das misturas solo-areia, solo-cal e solo-CCA .....	57
Tabela 12 –	Comparativo dos Limites de Atterberg para o solo natural e misturas na literatura .....	59
Tabela 13 –	Índices e dados do comportamento reológico do solo e das misturas.....	62
Tabela 14 –	Valores das umidades inicial e final (no centro e na periferia das amostras) dos ensaios de squeeze-flow para solo natural, solo-areia, solo-cal e solo-CCA .....	65
Tabela 15 –	Índices e dados do comportamento reológico do solo e das misturas no limite de plasticidade .....	70
Tabela 16 –	Umidade das amostras no momento do início das primeiras fissuras.....	74

Tabela 17 –	Resumo dos principais dados e índices do processo de propagação de fissuras .....	90
Tabela 18 –	Índices de ajuste da equação de Van Genuchten (1980) .....	92

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	19
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
2.1	SOLOS EXPANSIVOS .....	22
2.2	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS.....	24
<b>2.2.1</b>	<b>Estabilização do solo com areia.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Estabilização do solo com cal.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Estabilização do solo com cinza de casca de arroz.....</b>	<b>28</b>
2.3	REOLOGIA.....	29
<b>2.3.1</b>	<b>Viscosidade .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Fluidos Newtonianos e Não-Newtonianos .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Tensão de escoamento .....</b>	<b>31</b>
2.4	SQUEEZE-FLOW .....	31
2.5	CONTRAÇÃO E FISSURAMENTO DOS SOLOS DEVIDO À PERDA DE UMIDADE .....	32
<b>2.5.1</b>	<b>Processo de ressecamento do solo.....</b>	<b>33</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Índices geométricos e quantificação das fissuras.....</b>	<b>37</b>
2.6	ANÁLISE DE IMAGENS.....	39
<b>2.6.1</b>	<b>Conversão de uma imagem colorida para escala de cinza.....</b>	<b>39</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Transformação binária .....</b>	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>42</b>
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS .....	42
<b>3.1.1</b>	<b>Solo de Paulista.....</b>	<b>42</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Areia .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Cal .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Cinza de casca de arroz.....</b>	<b>46</b>
3.2	MÉTODOS.....	47
<b>3.2.1</b>	<b>Preparação das amostras.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Caracterização Física.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Squeeze-flow.....</b>	<b>49</b>

<b>3.2.4</b>	<b>Ensaio de fissuras</b> .....	<b>51</b>
3.2.4.1	Equipamentos e procedimentos utilizados.....	51
3.2.4.2	Moldagem e realização dos ensaios.....	52
3.2.4.3	Sistema de aquisição de imagens.....	54
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	<b>57</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	57
4.2	CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA .....	60
4.3	PROCESSO DE FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO.....	70
<b>4.3.1</b>	<b>Obtenção dos índices geométricos de fissuração no ImageJ</b> .....	<b>70</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Tempo para surgimento das primeiras fissuras</b> .....	<b>73</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Análise da propagação de fissuras</b> .....	<b>75</b>
4.3.3.1	Análise da propagação de fissuras na mistura solo-areia.....	76
4.3.3.2	Análise da propagação de fissuras na mistura solo-cal.....	80
4.3.3.3	Análise da propagação de fissuras na mistura solo-CCA.....	83
4.3.3.4	Comparação do processo de propagação de fissuras no solo e nas misturas solo-areia, solo-cal e solo-CCA.....	87
4.4	COMPARAÇÃO DO PROCESSO DE INTERAÇÃO ENTRE PARTÍCULAS NO PROCESSO DE EXPANSÃO, NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO (SQUEEZE-FLOW) E DURANTE O PROCESSO DE DESSECAÇÃO.....	94
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	<b>97</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	97
5.2	SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS .....	98
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>100</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Solos expansivos são solos argilosos não saturados que apresentam como característica principal o aumento de volume quando umedecidos e contração quando ressecados. Destaca-se que o efeito da expansão não ocorre em todos os solos argilosos não saturados, mas somente naqueles constituídos de argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1, como as montmorilonitas e as esmectitas.

Chen (1988) descreve que os problemas devido aos solos expansivos não eram conhecidos pelos engenheiros até meados de 1930, situação diferente da atual, em que existe um interesse mundial decorrente dos altos custos gerados pela influência da expansão dos solos nas obras de infraestrutura.

Solos expansivos são comuns em regiões áridas e semiáridas, onde a evapotranspiração excede a precipitação. Há ocorrências desses solos em todo o mundo. No Brasil, os solos expansivos são encontrados em várias regiões, em especial, no Nordeste, onde aparecem em camadas de formação cretácea, aproximadamente, ao longo do meridiano da Bahia para o norte, até atravessar Pernambuco e Ceará (FERREIRA et al., 2015).

A construção de obras de engenharia civil em solos que apresentam instabilidade volumétrica, quando umedecidos, pode causar sérios problemas. Em solos expansivos, em campo, observam-se fissuras ou fendas características, nas estações secas. Já nas edificações, fissuras diagonais embaixo das janelas e acima de portas, ondulações e rupturas nos pavimentos, fissuras generalizadas longitudinais e transversais junto a bueiros etc (PAIVA et al., 2016).

Segundo Nelson e Miller (1992), a Sociedade Americana de Engenheiros Civil calcula que uma em cada quatro casas tem alguns danos causados por solos expansivos. Solos expansivos podem causar maior perda financeira para os proprietários do que danos causados por tremores de terra, inundações, tornados e furacões combinados.

Para evitar tais prejuízos é preciso adotar alguma medida, como por exemplo: remoção do solo e substituição por outro que atenda às necessidades da obra, aceitar o solo original e ajustar o projeto às restrições impostas por ele ou modificar os índices geotécnicos do solo existente através da estabilização do solo.

A falta de reconhecimento dos solos expansivos no local e conseqüentemente a inexistência de uma solução adequada para esse tipo de solo poderá ocasionar a necessidade de algum reparo nas obras assentes nesse tipo de solo ou até mesmo levar a obra à ruína. Com isso, é importante fazer o reconhecimento do terreno para a correta identificação e avaliação do

comportamento do solo preliminarmente a qualquer obra, para um melhor desempenho geotécnico do projeto e da obra.

Para aprofundar o conhecimento sobre o estudo de solos, esta pesquisa propõe estudar a interação interpartículas por meio das características reológicas e a propagação de fissuras em uma amostra de solo e misturas. Apesar dos conceitos de reologia serem comuns em algumas áreas da engenharia civil, indústria de cosméticos e alimentos, a aplicação na caracterização de solos ainda é pouco explorada. Já a avaliação do processo de formação e propagação de fissuras em solos vem sendo bastante estudada por diversos pesquisadores.

O estudo da reologia por meio do ensaio Squeeze-Flow caracteriza-se pela compressão de uma amostra entre duas placas paralelas. O método é simples e torna capaz a avaliação com precisão de uma ampla faixa de consistência dos materiais. A pesquisa analisa o solo na transição do estado líquido para o plástico (Limite de Liquidez), nos pontos de umidades próximas a esse limite e no limite de transição do estado plástico para o semissólido (Limite de Plasticidade). A análise através da reologia permite que sejam explorados os efeitos da umidade na estrutura do solo.

A formação e propagação de fissuras no solo é um processo natural decorrente das variações sazonais do ambiente. No período seco, o solo se retrai e forma fissuras. É necessário estudar esse processo, pois a presença dessas fissuras no solo altera suas propriedades mecânicas e hidráulicas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A presença de argilominerais expansivos é a principal causa da mudança significativa de volume dos solos quando em processos de variação de umidade com consequentes danos às construções assentes sobre eles. Os solos expansivos são propensos a sofrer fissuramento devido ao processo de secagem. As fissuras em solos alteram as condições de fluxo e comportamento mecânico, comprometendo pavimentos, canais, podendo contaminar os sistemas de água subterrâneos, podendo gerar perda econômica, causar acidentes e danos à saúde pública.

Técnica de estabilização de solos expansivos vem sendo aplicada para reduzir a tensão de expansão e expansão livres em diversos solos (CHEN 1988; SCHREINER 1987; PAIVA, 2016; MORAIS, 2017; LACERDA, 2019). Na maioria dos métodos busca-se o menor teor do aditivo estabilizante que reduz a expansão. O solo de alta expansividade do município de Paulista-PE teve estabilização química e hidromecânica com a adição de 5% de cal hidratada

(PAIVA, 2016), com 10% de cinza de casca de arroz – CCA (CONSTANTINO, 2018) e a adição de 50% de areia reduziu a tensão de expansão de 372 kPa a 170 kPa (redução de 54%), Cavalcanti (2017). Os processos de fissuras e a interação entre as partículas continuam a ocorrer mesmo no solo estabilizado. É importante estudar o efeito de materiais que possam ser misturados ao solo para diminuir o processo de fissuração do solo, como também o estudo da interação das partículas do solo com esses materiais.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento reológico e a dinâmica de fissuração de um solo expansivo do município de Paulista-PE misturado com areia, cal e cinza de casca de arroz.

Os objetivos específicos são:

- a) caracterizar fisicamente o solo e as misturas solo-areia, solo-cal e solo-cinza de casca de arroz;
- b) analisar a interação entre as partículas do solo com a areia, cal e cinza de casca de arroz;
- c) analisar o comportamento reológico do solo e os efeitos da adição de areia, cal e cinza de casca de arroz;
- d) analisar o processo de formação e propagação das fissuras do solo tratado com areia, cal e cinza de casca de arroz em condição de secagem.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

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

O Capítulo 1 apresenta a introdução com um breve resumo sobre solos expansivos, a justificativa do trabalho, os principais objetivos desta pesquisa, assim como a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre solos expansivos, abordando os locais de ocorrência e critérios de identificação de solos expansivos. É apresentado também referências da literatura acerca do melhoramento de solos, reologia, squeeze-flow e fissuração em solos.

No Capítulo 3 são exibidos os materiais e métodos utilizados para a realização dos ensaios laboratoriais. É apresentada a escolha dos materiais e dosagem das misturas utilizadas, preparação das amostras e os ensaios realizados para o estudo.

O Capítulo 4 apresenta a análise dos resultados obtidos por meio dos ensaios de laboratório desenvolvidos ao longo do período da pesquisa.

No Capítulo 5, apresentam-se as principais conclusões obtidas a partir dos resultados discutidos no capítulo anterior e sugestões para trabalhos futuros sobre o tema.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É realizada uma revisão da literatura sobre o tema, servindo como auxílio para uma análise fundamentada em bases teóricas. A primeira parte discorre sobre os solos expansivos. Na segunda, sobre alguns métodos para a estabilização dos solos expansivos. Posteriormente é abordado o conceito de reologia e do ensaio squeeze-flow. Por último, o estudo do processo de propagação de fissuração do solo.

### 2.1 SOLOS EXPANSIVOS

Para Cavalcante et al. (2006), os solos expansivos são solos não saturados que podem sofrer variação volumétrica quando sujeitos a variação de umidade, por isso, seu comportamento depende das variações sazonais. As mudanças sazonais estão vinculadas às variações climáticas ao longo do ano. Nos períodos de estiagem, se encontram geralmente com uma sucção bastante elevada, a qual confere uma alta resistência, dificultando possíveis trabalhos de escavação e remoção. Porém, com o aumento da umidade esses solos apresentam muitas vezes elevados valores de expansão.

Para um solo ter caráter expansivo, primariamente, depende do argilomineral existente, uma vez que nem todos os minerais argilosos, experimentam modificações volumétricas. Essa instabilidade pode ser especialmente importante nas argilas esmectitas, em especial, a montmorilonita e a vermiculita. Também se produz nos interestratificados de montmorilonita com clorita, illita e vermiculita (FERREIRA, 1995).

Segundo Pereira (2004), um solo é considerado expansivo quando apresenta variação de volume superior a 1%, sendo resultante da mudança de umidade ou sucção, em que esse aumento é ocasionado apenas pela alteração da umidade, sem qualquer variação nas cargas aplicadas nesse solo. São materiais que possuem limites de liquidez elevados e alta plasticidade. Durante os períodos de estiagem, os solos expansivos apresentam uma aparência bastante fissurada, causada pela contração destes solos com a perda de umidade. Os solos expansivos podem ser encontrados em profundidades de até 6 metros. O nível do lençol freático encontrado em locais de solos expansivos está, normalmente, em profundidades maiores (CAVALCANTE et al., 2006).

Chen (1988) relata ocorrências de solos expansivos em todo o mundo, com situações confirmadas nos seguintes países: Argentina, Irã, Austrália, México, Marrocos, Canadá, Cuba, África do Sul, Etiópia, Espanha, Gana, Turquia, Índia, Estados Unidos, Israel e Venezuela. A lista foi atualizada por Mahler (1994), que incluiu Arábia Saudita, Brasil, Chile, China, França, Nigéria e Zimbábwe.

No Brasil, os solos expansivos são encontrados em diversas regiões. Ferreira et al. (2012) realizaram um levantamento da ocorrência de solos expansivos no Brasil e identificou esses solos nas regiões Sul-Sudeste, nos Estados do Paraná, São Paulo e Santa Catarina, no Nordeste, no norte da Bahia passando por Pernambuco até atingir o Ceará.

Amorim (2004) desenvolveu o mapa de suscetibilidade de solos expansivos em Pernambuco. A metodologia analisou o comportamento dos solos sob o ponto de vista geológico, pedológico e climatológico, relacionados com a variação de volume devido à mudança de umidade do solo. Esses fatores foram correlacionados com a suscetibilidade de ocorrência segundo a escala: baixa, média e alta. Os resultados da pesquisa mostram uma suscetibilidade à expansão alta em 12,5% do Estado, média em 38,7% e baixa em 42,5%.

Ferreira (1999) afirma que a identificação de solos expansivos é um estágio essencial no sucesso de projetos de engenharia, devido aos consequentes danos causados ao negligenciá-la. Falhas neste estágio podem ocasionar a instabilidade geral da edificação ou a necessidade de recuperação. A identificação e classificação da expansividade de um solo podem ser avaliadas através de duas etapas: a primeira é uma pesquisa no local para obtenção de informações como topografia, vegetação, sinais de contração no solo, fissuras nas edificações e informações com os moradores da região. A segunda etapa consiste na interpretação de ensaios de laboratório e utilização de métodos de identificação.

Segundo Schreiner (1987), os métodos de identificação de solos expansivos são os métodos indiretos e diretos. Métodos indiretos são aqueles que recorrem à identificação através de ensaios de laboratório como análise granulométrica, índices físicos, limites de consistência e índices ligados à textura, composição e comportamento do solo. Os métodos diretos são baseados nos parâmetros de Expansão Livre e Tensão de Expansão.

Tais solos, quando não são reconhecidos durante a fase de projeto, podem vir a provocar danos como, por exemplo, fissuras diagonais embaixo das janelas e acima das portas, ondulações e rupturas nos pavimentos, fissuras generalizadas longitudinais e transversais junto a bueiros, causando prejuízos financeiros maiores do que os causados por desastres naturais, como terremotos e inundações, de acordo com Jones e Holtz (1973). Em campo, observam-se fissuras ou fendas características, nas estações secas.

## 2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS

Estabilização de solos é o processo utilizado para aumentar a resistência e durabilidade do solo, tornando-o adequado para a finalidade desejada. Segundo Ataíde (2017), a estabilização dos solos é a alteração das características geotécnicas do sistema solo, água e ar, com a finalidade de melhorar os problemas ocasionados pela mudança de volume dos solos, evitando a expansibilidade.

A estabilização dos solos pode ser obtida através da aplicação de diferentes técnicas. Para Barbosa (2013), os principais fatores que influenciam na escolha do método a ser utilizado são: custos totais da obra, características dos materiais, finalidade da obra e propriedades do solo que devem ser corrigidas. Destacam-se alguns tipos de estabilização, como: física, mecânica e química.

Segundo Oliveira (1994), na estabilização física as propriedades do solo são alteradas através de tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, tratamento elétrico e eletro-osmose, que melhoram as características estruturais e de drenagem dos solos.

A estabilização mecânica do solo é um procedimento que altera apenas o arranjo das partículas do solo ou a sua granulometria, através da compactação e correção granulométrica (GONDIM, 2008). É a correção da composição granulométrica do solo através do rearranjo das partículas com o objetivo de melhorar as suas características através da manipulação de solos em proporções adequadas.

Já a estabilização química, é um fenômeno que provoca mudanças que influenciam as propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade do solo. São adicionados aditivos orgânicos ou inorgânicos, como a cal, o cimento Portland, silicatos de sódio, materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo e cinza de casca de arroz.

Nesta pesquisa aborda-se a estabilização do solo natural de Paulista-PE com areia e a estabilização química com cal e cinza de casca de arroz.

### 2.2.1 Estabilização do solo com areia

Entre os métodos de estabilização citados por Baptista (1976), pode-se empregar o processo físico de adição de areia, a fim de se obter um produto de estabilidade volumétrica superior ao solo original, com aumento da fração grossa e redução da parcela fina do solo.

Hudyma e Avar (2006) estudaram as mudanças no comportamento de solos expansivos com a adição de areia. Constataram que a medida que o percentual de areia aumenta, diminui o

potencial de expansão. Ataíde (2017) analisou o comportamento do solo expansivo de Ipojuca tratado com areia. Cavalcanti (2017) estudou o comportamento da estabilização granulométrica do solo de Paulista-PE com teores de areia de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.

Tabela 1 – Caracterização granulométrica do solo de Paulista-PE e da mistura solo-areia do estudo de Cavalcanti (2017).

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	Solo Paulista	Solo +10%	Solo +20%	Solo +30%	Solo +40%	Solo +50%	Solo Bezerros
Pedregulho %	0	0	0	0	0	0	0
Areia %	22	38	47	51	55	50	94
Silte %	30	19	16	14	13	20	0
Argila %	48	43	37	35	32	30	6
% < 0,002 mm	44	40	36	32	29	26	-
Limite de liquidez	62	59	46	51	40	38	-
Limite de plasticidade	27	30	20	26	14	22	-
Índice de plasticidade	35	29	26	25	26	16	-
Limite de contração	15	13	12	12	12	11	-
Classificação SUCS	CH	CH	CL	CH	CL	CL	SP
Classificação AASHTO/TRB/HRB	A-7-6	A-7-6	A-7-5	A-7-5	A-6	A-6	A-3
Peso específico real (kN/m <sup>3</sup> )	26,8	26,1	25,9	26,1	26,2	26,0	27,2

Fonte: Cavalcanti (2017).

Tabela 2 – Valores de expansão livre e tensão de expansão para o solo de Paulista-PE e misturas solo-areia do estudo de Cavalcanti (2017).

	Expansão Livre (%)	Tensão de Expansão (kPa)
Solo natural	42,05	372
Solo + 10% areia	40,00	271
Solo + 20% areia	31,45	212
Solo + 30% areia	34,55	122
Solo + 40% areia	42,50	165
Solo + 50% areia	32,00	170

Fonte: Cavalcanti (2017).

A argila de Paulista-PE apresentou expansividade alta, assim como todas as misturas (CAVALCANTI, 2017). A adição de areia a argila reduziu a tensão de expansão, mas não alcançou valores de tensão de expansão inferior a 20 kPa, que evitaria danos às construções segundo o critério Jimenez Salas (1980).

Amri et al. (2019) estudou a estabilização de um solo expansivo da Argélia com diferentes proporções de adição de areia das dunas. Ele concluiu que a adição de areia das dunas em solo argiloso reduz o índice de plasticidade, introduzindo uma grande quantidade de partículas granulares, o que melhora a resistência do solo. Porém, a presença de areia não evitou o processo de expansão do solo, observação semelhante foi realizada por Ataíde (2017). Para a realização dos ensaios dessa pesquisa utilizou-se o teor de areia igual a 50% na mistura solo-areia.

### **2.2.2 Estabilização do solo com cal**

A cal é um aglomerante aéreo, resultante da calcinação dos calcários ou dolomitos através de decomposição térmica e posterior hidratação formando o hidróxido de cálcio. Ao ser adicionado ao solo, o hidróxido de cálcio modifica imediatamente o pH deste solo. O cálcio evita a penetração de água nos vazios dos argilominerais neutralizando suas cargas negativas e favorecendo a floculação e troca catiônica.

Segundo Barbosa (2013), a cal tem propriedades físico-químicas capazes de conferir ao solo mudanças na microestrutura das partículas dos mesmos, através de mecanismo de troca catiônica, floculação, compressão da dupla camada elétrica, assim como reações de cimentação pozolânicas e a carbonatação.

A expansão e a contração de um solo são normalmente reduzidas quando o solo é tratado com cal. A cal tende, pela floculação das partículas, a reduzir as mudanças de volume apresentadas pelos solos. A diminuição da expansão e a contração é atribuída à redução da afinidade por água das argilas saturadas pelo íon cálcio e pela formação de uma matriz cimentante (FERREIRA et al., 2017).

Abass (2014) mostrou que a adição de cal foi efetiva na estabilização de solos expansivos. A mistura solo-cal melhora algumas propriedades do solo, como expansividade, umidade excessiva e plasticidade elevada.

Paiva (2016), estudou o comportamento dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista estabilizados com cal. Os teores de cal aplicados nestes solos foram

de 1%, 3%, 5% e 7%. O solo de Paulista-PE foi estabilizado quanto a expansão livre e tensão de expansão para teor de cal de 5%.

Tabela 3 – Caracterização granulométrica do solo de Paulista-PE e da mistura solo-cal do estudo de Paiva (2016).

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	Solo natural	Solo + 3%	Solo + 5%	Solo + 7%
Pedregulho %	0	0	0	0
Areia %	18	16	16	14
Silte %	32	27	28	28
Argila %	50	57	56	58
% < 0,002 mm	48	55	52	58
Limite de liquidez	61	55	54	58
Limite de plasticidade	31	36	42	41
Índice de plasticidade	30	18	12	17
Limite de contração	10,8	9,4	13,7	24,8
Classificação SUCS	CH	MH	MH	MH
Classificação AASHTO/TRB/HRB	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6
Peso específico real (kN/m <sup>3</sup> )	26,09	26,07	25,93	25,91

Fonte: Paiva (2016).

Tabela 4 – Valores de expansão livre e tensão de expansão para as misturas solo-cal no município de Paulista-PE do estudo de Paiva (2016).

	Expansão Livre (%)	Tensão de Expansão (kPa)
Solo natural	12,3	280
Solo + 3% cal	1,1	10
Solo + 5% cal	0,2	6
Solo + 7% cal	0,0	0

Fonte: Paiva (2016).

Como o solo foi estabilizado quanto a expansão livre e tensão de expansão para teor de cal de 5%, foi utilizado esse teor na mistura solo-cal na realização dos ensaios dessa pesquisa.

### 2.2.3 Estabilização do solo com cinza de casca de arroz

O acréscimo de cinza de casca de arroz desenvolve a formação de compostos cimentícios no solo ao reagir com o hidróxido de cálcio, em função de suas características pozolânicas. A utilização da cinza de casca de arroz (CCA) vem sendo estudada como aditivo a solos expansivos no intuito de estabilizar os solos a partir de reações pozolânicas geradas a partir do elevado percentual de sílica na cinza.

A adição de CCA ao solo apresenta vantagens como a melhoria das propriedades físicas e químicas do solo. A utilização da cinza de casca de arroz para a estabilização de solos expansivos vem sendo bastante estudada. Fattah et al. (2013) e Adhikary e Koyel (2016) constataram que o aumento do percentual de CCA adicionado ao solo provoca uma melhora significativa na resistência à compressão não confinada e diminuição do índice de plasticidade do solo. Constantino (2018) estudou a estabilização do solo expansivo de Paulista com a adição de CCA. Lacerda (2019) analisou o comportamento geotécnico do solo de Cabrobó estabilizado com CCA.

Tabela 5 – Caracterização granulométrica do solo de Paulista-PE e da mistura solo-CCA do estudo de Constantino (2018).

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	Solo natural	Solo + 2% CCA	Solo + 4% CCA	Solo + 6% CCA	Solo + 8% CCA	Solo + 10% CCA
Pedregulho %	0,28	0,48	0,43	0,52	0,43	1,12
Areia %	28,57	27,83	27,31	29,07	27,31	21,02
Silte %	17,75	20,27	21,63	19,38	21,63	23,06
Argila %	53,40	51,43	50,62	51,03	50,62	54,78
Limite de liquidez	58	57	57	54	60	61
Limite de plasticidade	25	25	26	26	31	29
Índice de plasticidade	33	32	31	28	29	32
Classificação SUCS	CH	CH	CH	CH	CH	CH
Classificação AASHTO/TRB/HRB	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-5	A-7-6
Peso específico real (kN/m <sup>3</sup> )	26,60	26,28	25,91	25,77	25,35	25,97

Fonte: Constantino (2018).

Tabela 6 – Valores de expansão livre e tensão de expansão para as misturas solo-CCA no município de Paulista-PE do estudo de Constantino (2018).

	Expansão Livre (%)	Tensão de Expansão (kPa)
Solo natural	15,7	81,7
Solo + 2% CCA	11,8	53,1
Solo + 4% CCA	8,0	46,6
Solo + 6% CCA	5,3	32,7
Solo + 8% CCA	6,8	19,6
Solo + 10% CCA	3,2	9,8

Fonte: Constantino (2018).

Com a adição de cinza de casca de arroz ao solo de Paulista-PE, houve tendência na redução da expansão do solo, apresentando apenas 3,2% de expansão com o percentual de 10% de CCA. Com isso, foi utilizado o teor de 10% de cinza de casca de arroz na mistura solo-CCA na realização dos ensaios dessa pesquisa.

### 2.3 REOLOGIA

Segundo Meschyan (1995), a reologia é a ciência da deformação e fluência de materiais destinada ao estudo de mudanças nos estados de tensão e deformação de materiais ao longo do tempo. Assim, são objeto de estudo da reologia os materiais que apresentam propriedades reológicas, como: elasticidade, plasticidade, viscosidade, relaxação e redução da resistência em longo prazo.

De acordo com Oliveira et al. (2000), independente do grau de complexidade das características reológicas de um material, seu comportamento pode ser descrito através de relações matemáticas entre a tensão aplicada e sua respectiva deformação, além de suas variações em relação ao tempo. Essa relação matemática pode ser expressa de forma gráfica de modo que represente o modelo de comportamento do material.

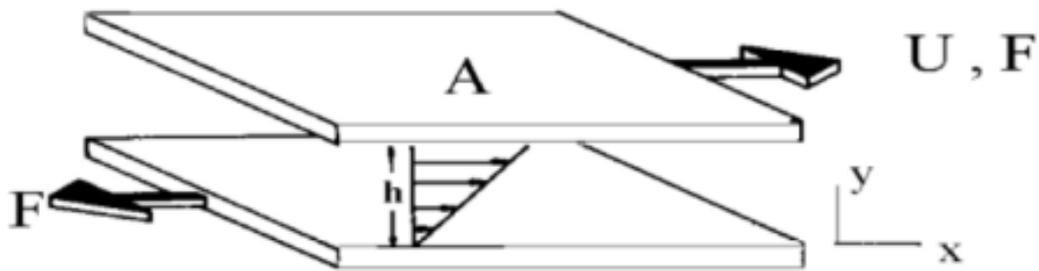
A reologia estuda as propriedades mecânicas dos materiais que determinam seu escoamento quando solicitados por forças externas. O estudo do comportamento reológico está relacionado com a interação entre as partículas do solo com o fluido, ou seja, é de grande importância para aplicação em obras de engenharia (NOTARO, 2012).

Diferentes materiais apresentam comportamentos diferentes quando submetidos à aplicação de força externa, por isso é necessário o estudo das propriedades reológicas.

### 2.3.1 Viscosidade

Isaac Newton definiu viscosidade através de ensaio de placas paralelas, na qual a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à variação de velocidade ao longo da direção normal às placas.

Figura 1 - Modelo de placas paralelas proposto por Newton para explicar a viscosidade.



Fonte: Barnes et al (1989).

De acordo com o modelo proposto por Newton, a força solicitada por unidade de área para manter uma diferença de velocidade entre as placas é denominada tensão de cisalhamento.

A taxa de cisalhamento, por outro lado, relaciona a diferença das velocidades entre duas partículas do fluido vizinhas com a distância entre elas. Para fluidos viscosos ideais, a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento.

De acordo com Barnes et al. (1989), a viscosidade pode ser considerada a principal propriedade reológica de um fluido, pois indica a facilidade de escoar continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento externa. Quanto menor a viscosidade de um fluido, menor é a tensão necessária para submetê-lo a uma determinada taxa de cisalhamento constante.

Segundo Pileggi (2001), a viscosidade é uma medida da resistência do fluido ao escoamento. Considerando um sistema que contenha partículas sólidas em sua composição, a dificuldade imposta pelas partículas ao fluxo do líquido que as circundam aumenta a viscosidade do fluido.

### 2.3.2 Fluidos Newtonianos e Não-Newtonianos

Na reologia, os materiais são classificados de acordo com seu comportamento em fluidos Newtonianos e fluidos não-Newtonianos. O primeiro caso representa os fluidos que

obedecem à lei de Newton, ou seja, apresentam comportamento linear entre tensão e deformação, e o segundo caso no qual a relação entre essas duas variáveis é não linear.

Pileggi (2001) afirma que existe uma relação proporcional referente à tensão e a taxa de cisalhamento para os fluidos newtonianos. Entretanto, os fluidos não-newtonianos não apresentam uma relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento. De acordo com estes fluidos, o conceito de viscosidade definido por Newton não possui aplicabilidade, por não haver uma simples constante de proporcionalidade. A viscosidade deixa de ser uma característica intrínseca do fluido, para tornar-se dependente da taxa de cisalhamento e de outros fatores.

### 2.3.3 Tensão de escoamento

Oliveira et al. (2000) explica que alguns fluidos exigem a aplicação de uma tensão mínima de cisalhamento para que o seu escoamento inicie, e quando são submetidos a valores de tensão inferiores à tensão de cisalhamento mínima esses fluidos se comportam como sólidos elásticos rígidos.

De acordo com Melo (2014), para solos a tensão de escoamento demonstra que o material apresenta uma estrutura, que é capaz de suportar algum esforço sem sofrer deformação. A tensão de escoamento nos solos deve variar, principalmente, segundo a umidade e a coesão da amostra ensaiada. Sendo possível prever que quanto maior a umidade, menor a tensão de escoamento e ainda que deve existir uma umidade limite a partir da qual a tensão de escoamento se anule.

## 2.4 SQUEEZE-FLOW

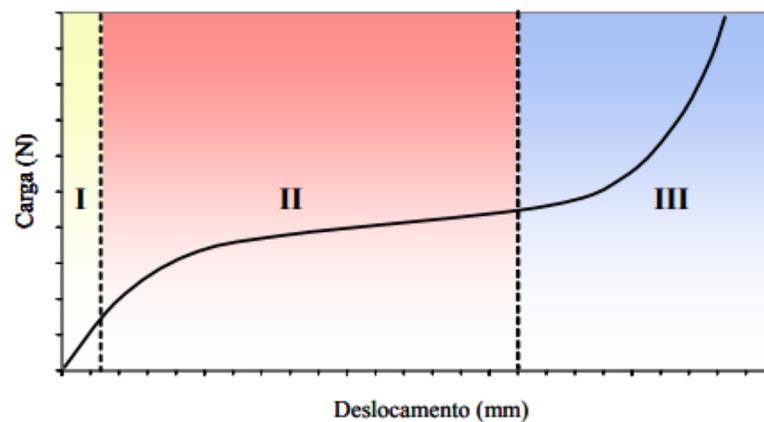
Segundo Melo (2014), no ensaio squeeze-flow a compressão pode se dar pela placa superior, pela placa inferior, ou por ambas. O ensaio pode ser realizado com controle de deslocamento ou controle de força e o diâmetro da placa superior pode ser menor, igual ou maior que o diâmetro da amostra. Cada uma das configurações é utilizada para especificar um determinado comportamento ou por ser mais adequada ao material ensaiado. O ensaio gera os parâmetros reológicos fundamentais, a viscosidade e a tensão de escoamento.

O ensaio squeeze-flow consiste em medir o esforço necessário para comprimir uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas. O ensaio realizado na pesquisa é realizado com controle por deslocamento em que o material é submetido a um deslocamento efetuado com velocidade constante enquanto a força é medida. É um método simples, capaz de avaliar com

precisão uma ampla faixa de consistência.

Os resultados são mostrados em uma curva de carga (N) *versus* deslocamento (mm), os resultados seguem um perfil reológico de três estágios, conforme a Figura 2. O estágio I equivale a um pequeno deslocamento, apresentando deformação elástica linear e está relacionado provavelmente à tensão de escoamento do material. O estágio II trata-se de um deslocamento intermediário, mostrando uma deformação plástica e/ou viscosa dependendo de suas características. Nesta etapa II o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento. Já no estágio III, ocorre um aumento expressivo da carga necessária para dar continuidade à deformação do material, influenciado pela aproximação dos agregados e o atrito entre eles (CARDOSO, 2009). A Figura 2 apresenta um perfil típico obtido de um ensaio squeeze-flow com deslocamento controlado expresso na forma de carga *versus* deslocamento.

Figura 2 – Perfil típico de uma curva carga *versus* deslocamento de um ensaio squeeze-flow.



Fonte: Cardoso (2009).

## 2.5 CONTRAÇÃO E FISSURAMENTO DOS SOLOS DEVIDO À PERDA DE UMIDADE

A formação de fissuras pela secagem do solo ocasionado pela perda de umidade é um fenômeno natural que pode afetar suas propriedades hidráulicas. Esse fenômeno é influenciado por diversas variáveis como a composição mineralógica, quantidade de argila, variação da sucção, umidade relativa do ar e temperatura, espessura das camadas, condições de contorno e outros (TANG et al., 2011a).

Segundo Lakshmikantha (2009), o surgimento de fissuras em um solo submetido a condições de ressecamento é iniciado quando é excedida a resistência à tração do solo pelas

forças de tensão. Essa resistência depende da umidade do solo e da sucção. Após o surgimento da fissuração, a propagação de fissuras será regida pelo estado de tensões existente no interior do solo e por sua capacidade de dissipar as energias. Portanto, embora seja a resistência à tração que determine o início da fissuração, é a mecânica da fratura que tende a conduzir a propagação das trincas.

As fissuras diminuem a capacidade de suporte do solo, o que pode afetar a estabilidade e integridade das estruturas. Para evitar tais efeitos, uma melhor compreensão do processo de inicialização, propagação e impacto das fissuras nos parâmetros do solo é necessária.

Tem-se registros de pesquisas em laboratório para acompanhamento do processo de fissuração desde a década de 60 por Corte e Higashi (1960). Eles propuseram uma teoria para a formação das fissuras por dessecação do solo indicando que o padrão das fissuras é mais dependente da espessura da amostra do que da umidade ou temperatura.

Chaduvula et al. (2016) realizaram ensaios de fissuração em laboratório com um solo argiloso de alta plasticidade, de modo a verificar a influência da adição de fibras sintéticas de PET. O estudo comprovou que o reforço das fibras alterou o padrão das fissuras e a dinâmica de fissuração do solo.

Resultados encontrados por Silva (2017) após a realização de ensaios do solo puro com adição de 10% de bentonita com ciclos de ressecamento e posterior saturação, mostraram uma tendência à estabilização das fissuras, tanto em abertura quanto em área fissurada.

Mais recentemente, Barbosa (2019) realizou o monitoramento do aparecimento de fissuras do solo de Paulista-PE em laboratório. As amostras eram submetidas à secagem, controlando o peso e monitorando a temperatura e umidade relativa do ar, com captura de imagens automática em intervalo de tempo pré-determinado. Por meio do processamento de imagens, o autor observou que a propagação de fissuras ocorre em formato de “X” e “T”, com crescimento do CIF ao longo do tempo até atingir um valor máximo e posterior estabilização.

Tais pesquisas mostram que vários fatores influenciam na morfologia e na propagação de fissuras em solos, expondo a complexidade do tema e necessidade de continuidade de pesquisas para entender o processo de contração do solo e desenvolvimento das fissuras.

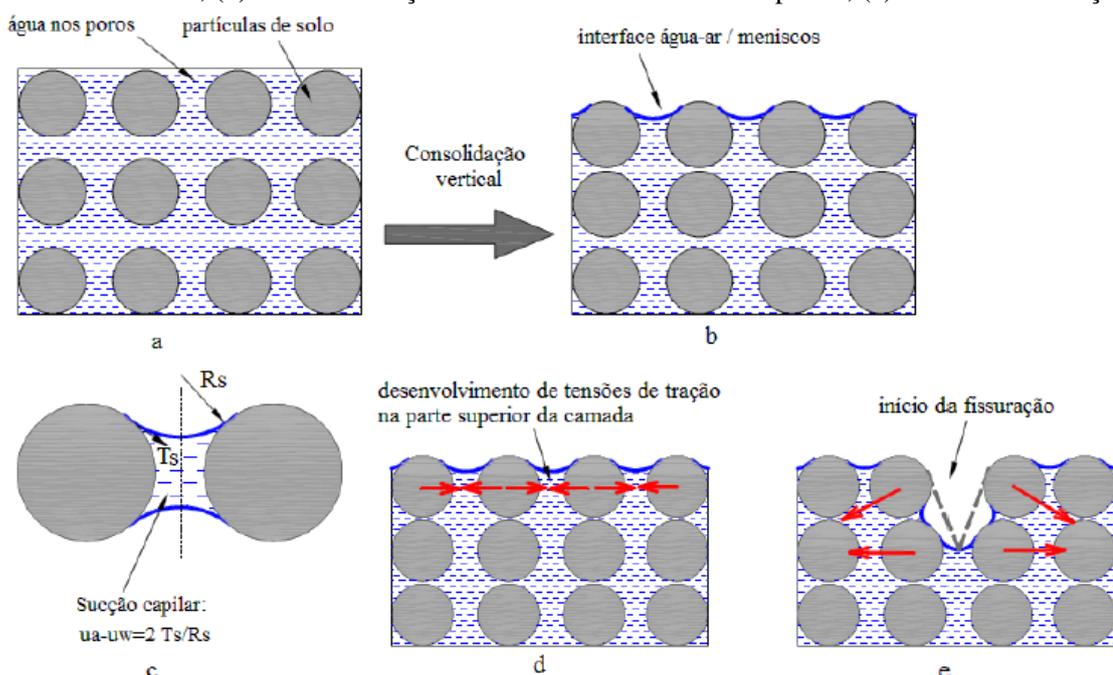
### **2.5.1 Processo de ressecamento do solo**

O processo de fissuramento do solo é um fenômeno complexo que envolve parâmetros físicos, químicos, mecânicos e hidráulicos do solo. As fissuras aparecem nos solos à medida que eles secam, formando um padrão complexo e aleatório, mas único. Uma ou várias fissuras

podem iniciar ao mesmo tempo nos estágios iniciais de secagem. À medida que o processo continua, várias novas fissuras secundárias são formadas e as fissuras primárias se propagam e aumentam (LAKSHMIKANTHA, 2009).

Tang et al. (2011b) descrevem o processo de formação de fissuras mostrado na Figura 3. O processo de formação das fissuras pode ser descrito quando uma argila homogênea e completamente saturada é submetida ao ressecamento, dando início a evaporação da água superficial. Durante esta fase inicial, a estrutura e os estados de tensão *versus* deformação do solo não são afetados (Figura 3a). Com a continuação do processo, um menisco é formado no momento em que a interface água-ar alcança a superfície (Figura 3b). Com isso, a sucção capilar começa a se desenvolver na parte superior da camada entre essa interface e as partículas de solo (Figura 3c). Com a continuação da evaporação, a curvatura do menisco capilar aumenta sendo acompanhada pelo acréscimo da sucção capilar e da tensão efetiva entre as partículas de argila, como consequência a camada de argila acaba se consolidando e retraindo. Cada partícula da camada superficial sofre a ação de uma força de tração induzida pela sucção capilar desenvolvida entre as partículas vizinhas (Figura 3c), o que cria um “campo” de tensões de tração na superfície da camada (Figura 3d). No momento em que essas tensões ultrapassam a resistência à tração do solo surgem as primeiras fissuras (Figura 3e).

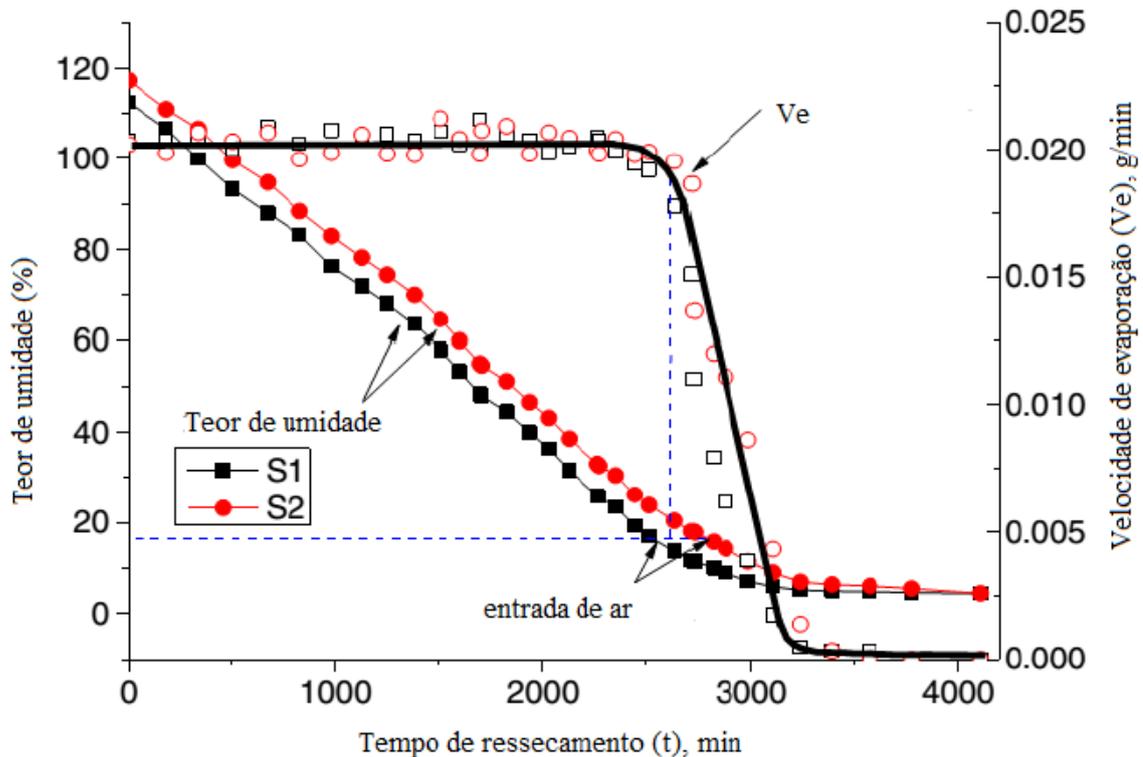
Figura 3 – Desenho esquemático do processo de formação de fissuras: (a) solo inicialmente saturado; (b) menisco da interface água-ar desenvolvido entre as partículas de solo; (c) sucção capilar entre as partículas do solo; (d) tensão de tração desenvolvida na camada superior; (e) início da fissuração.



Fonte: Costa (2015); Tang et al (2011b).

Os resultados obtidos por Tang et al. (2011b) indicam que a evaporação da água presente nas amostras analisadas é composta de três estágios: uma zona inicial onde 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 nenhuma perda de água (Figura 4).

Figura 4 – Variação da umidade e da velocidade de evaporação com o tempo de ressecamento.

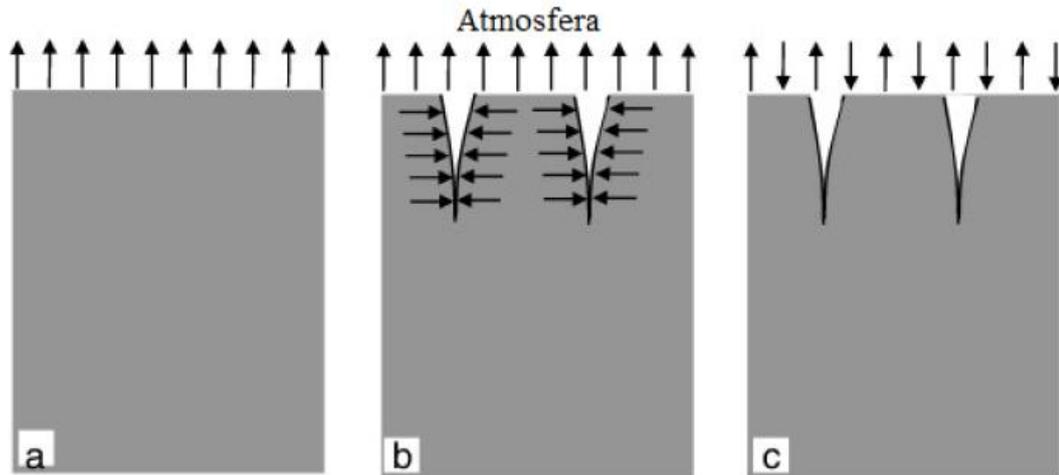


Fonte: Costa (2015); Tang et al (2011b).

Li e Zhang (2011) realizaram ensaios de campo em duas argilas siltosas, de média e baixa expansividade, para avaliar o processo de formação e propagação de fissuras por ressecamento. Esses pesquisadores quantificaram os índices geométricos das fissuras em função do teor de umidade e do tempo de ressecamento, baseado nos ensaios de campo, nos ensaios de sucção e nas propriedades de retração do solo obtidas em laboratório. Como resultado, foi verificado que as fissuras se desenvolvem em três estágios (Figura 5). No estágio inicial se desenvolvem lentamente, com a evaporação da água ocorrendo unidirecionalmente no sentido vertical e com uma pequena taxa de evaporação (Figura 5a). Posteriormente ao aparecimento das primeiras fissuras, através das paredes das fissuras a água passa a evaporar também no sentido horizontal (Figura 5b). Com a evaporação nas duas direções, o processo de ressecamento é acelerado e o desenvolvimento das fissuras entra no estágio primário. 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 5c). A taxa de evaporação dos solos é reduzida e o desenvolvimento das fissuras diminui até estabilizar-se.

Figura 5 – Estágios de desenvolvimento das fissuras: (a) estágio inicial; (b) estágio primário; (c) estágio estacionário.



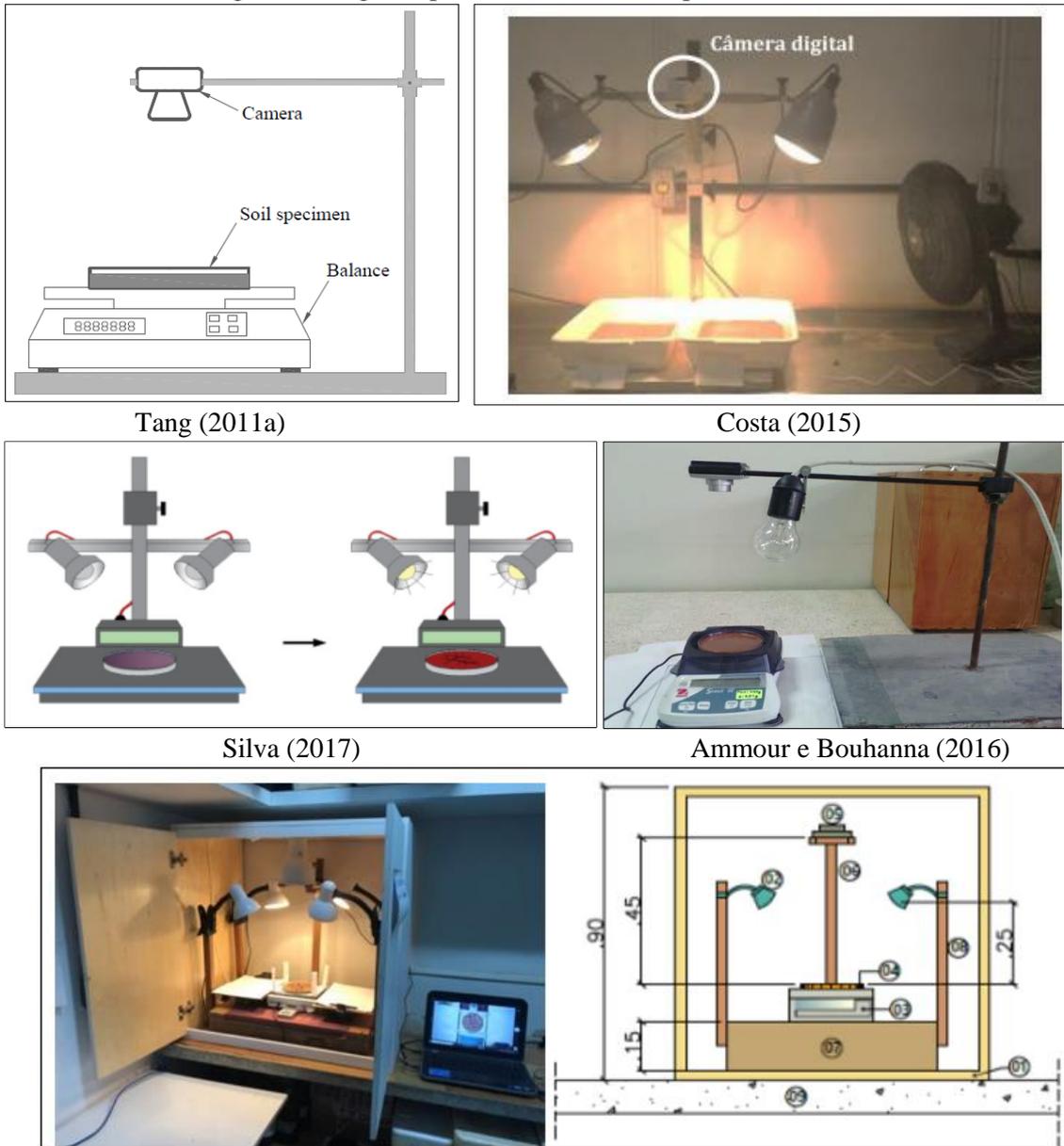
Fonte: Costa (2015).

Tang et al. (2011b) compararam a formação de fissuras com os estágios de evaporação e concluíram que existem dois tipos de fissuras: as fissuras que aparecem durante o período em que a velocidade de evaporação é constante e as que aparecem durante o período com velocidade de evaporação decrescente. Segundo os pesquisadores, na fase de evaporação constante é que 90% das fissuras ocorreram, quando as amostras ainda estavam completamente saturadas.

As fissuras podem ser classificadas em primárias, secundárias e terciárias. O primeiro conjunto de fissuras que surge na superfície do solo antes da geração de outras derivações são as fissuras primárias. As fissuras secundárias são consideradas como o segundo conjunto de fissuras que ocorrem entre duas fissuras primárias. Já as fissuras terciárias ocorrem entre fissuras primárias e secundárias ou entre duas fissuras secundárias (NAHLAWI E KODIKARA, 2006).

O estudo do processo de fissuração em solos é realizado em laboratório. Consiste na captura de imagens por meio de uma câmera ou webcam e análise dessas imagens através de algum software. Este procedimento permite uma análise do padrão de fissuras, da quantidade, largura média das fissuras, comprimento total das fissuras e do desenvolvimento da dinâmica de fissuração.

Figura 6 – Alguns aparatos desenvolvidos para ensaio de fissuras.



Tang (2011a)

Costa (2015)

Silva (2017)

Ammour e Bouhanna (2016)

Ferreira et al. (2019)

01 - Caixa de MDF; 02 – Luminárias; 03 - Balança com sensibilidade de 0,01 g; 04 - Conjunto solo-placa Petri; 05 – Webcam; 06 - Haste de suporte da Webcam; 07 - Base de madeira; 08 – Hastes de suporte das Luminárias; 09 – Bancada.

## 2.5.2 Índices geométricos e quantificação das fissuras

A geometria e o padrão das fissuras formadas durante o processo de secagem influenciam diretamente o comportamento hidromecânico dos solos fissurados, portanto, é de grande importância que sejam caracterizados. Novas pesquisas têm utilizado métodos diretos baseados em análises de imagens para determinar os índices geométricos das fissuras.

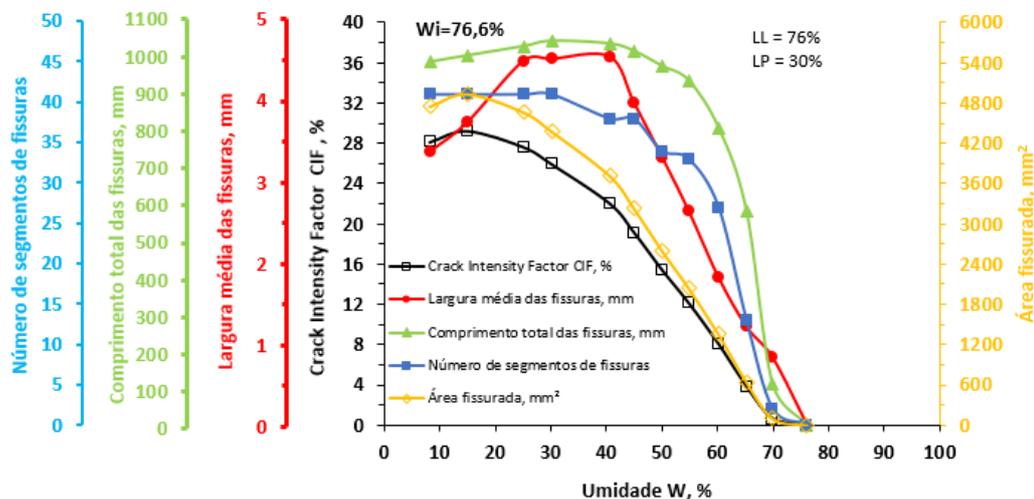
De forma geral, as pesquisas mostram que o padrão de fissuração ao final do ressecamento apresenta uma rede de fissuras composta por três tipos de polígonos: triângulo, quadrado e pentágono. Os segmentos são quase perpendiculares entre si com interseção entre as fissuras nas formas de “T” ou de “+” (TANG et al., 2011b).

O CIF (*Crack Intensity Factor*) foi definido por Miller et al. (1998) como a razão entre a área de fissura e toda a superfície da amostra, representando o percentual de fissuração da amostra. A evolução do CIF é quantificada usando o solo inicialmente saturado submetido a secagem.

Tang et al. (2019) determinaram ao final do processo de secagem, além do CIF, outros índices geométricos como largura média da fissura, comprimento total da fissura e número de segmentos de fissura (os elementos entre duas interseções adjacentes são definidos como um segmento de fissura).

A Figura 7 mostra a variação dos valores médios dos índices geométricos da fissura, incluindo CIF, a largura média da fissura, o comprimento total da fissura, o número de segmentos da fissura e a área fissurada ao longo da superfície da amostra, com a diminuição do teor de água para o solo natural de Paulista-PE, Ferreira et al. (2019). Esses índices aumentaram significativamente com a diminuição do teor de água e depois diminuíram. Isso implica que solos argilosos tendem a fissurar mais facilmente com alto teor de água e o potencial de retração e fissuração atenua com a diminuição do teor de água. Comportamento semelhante em solo argiloso foi encontrado por Tang et al., 2011b e Tang et al., 2019. A formação do padrão de fissuração por dessecação associada ao início, propagação e união da fenda contribuiu predominantemente para o aumento de todos os índices geométricos.

Figura 7 – Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração para o solo de Paulista.



Fonte: Ferreira et al. (2019).

## 2.6 ANÁLISE DE IMAGENS

Análise de imagens é o processo que permite extrair informações importantes a partir de imagens, principalmente a partir de imagens digitais por meio de técnicas de processamento computacional (SILVA, 2017).

A técnica de análise de imagem é composta basicamente de duas etapas. A primeira etapa consiste na preparação da imagem, a imagem original colorida é convertida para uma imagem em escala de cinza e, em seguida, para uma imagem binária (preto e branco). A segunda etapa compreende a análise da imagem processada para obter os índices que caracterizam o padrão da fissura, como: o Crack Intensity Factor – CIF, que representa a intensidade da fissuração em uma amostra por meio da relação entre a área superficial fissurada da amostra e a área superficial da amostra no estado inicial; a largura média das fissuras é calculada pela distância mais curta de um ponto de uma borda ao limite oposto de um fissura; o comprimento total de fissuras é calculado contando o número total de pixels pretos após a imagem ter sido esqueletizada; e o número de segmentos de fissuras são os elementos entre duas interseções adjacentes que são definidos como um segmento de fissura, conforme Tang et al. (2019). Também é possível identificar o início do processo de fissuração e seu desenvolvimento. O programa de domínio público e gratuito ImageJ foi utilizado para a análise das imagens. O ImageJ possibilita a exibição, edição, análise e processamento de imagens.

### 2.6.1 Conversão de uma imagem colorida para escala de cinza

A primeira etapa é a conversão de uma imagem de cor RGB para pixels em uma escala de cinza. Uma imagem RGB é definida como uma matriz de dados que define os componentes das cores vermelho, verde e azul de cada pixel individual. A cor de cada pixel é determinada pela combinação das intensidades de vermelho, verde e azul armazenadas em cada plano de cores na localização do pixel. Uma imagem em escala de cinza é aquela em que as únicas cores são tons de cinza. Uma cor cinza é aquela em que os componentes vermelho, verde e azul têm intensidade igual no espaço RGB e, portanto, é necessário especificar apenas um valor de intensidade para cada pixel, em oposição às três intensidades necessárias para especificar cada pixel em uma imagem colorida (LAKSHMIKANTHA, 2009).

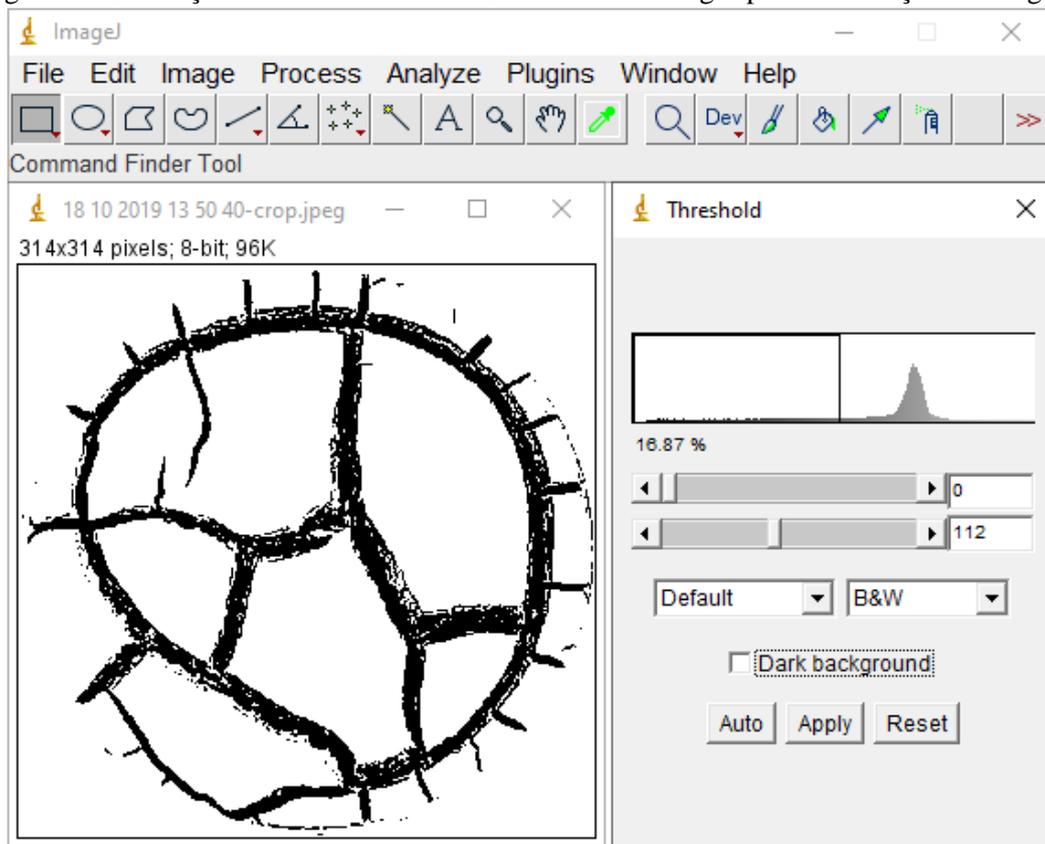
A necessidade de transformação para uma escala de cinza se dá por duas razões: a redução da dimensão do vetor de matrizes que simplifica as operações sobre os dados e a definição do valor do pixel por um único valor que permite a transformação da imagem em uma

matriz binária por meio de uma simples aplicação de um limiar ou *threshold* discreto. O objetivo de *threshold* é selecionar o valor da intensidade do pixel, que separa os objetos de um plano de fundo geral.

## 2.6.2 Transformação binária

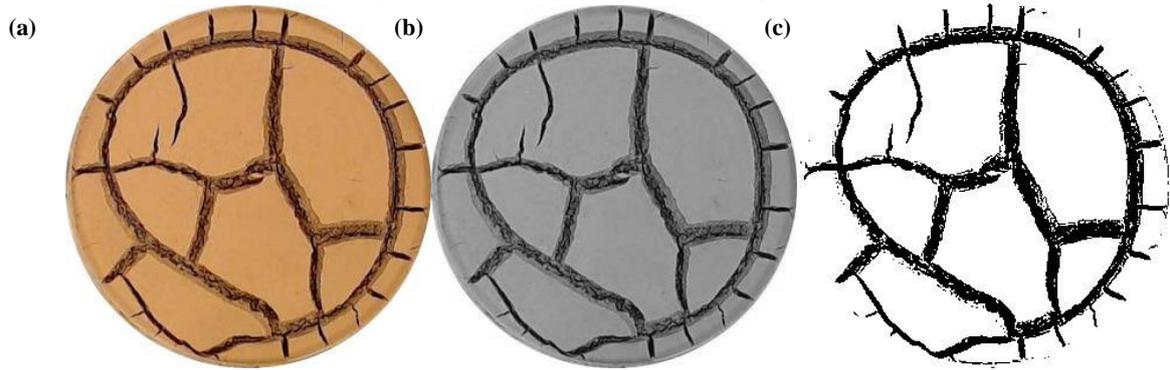
Segundo Silva (2017), a transformação de uma imagem em escala de cinza para uma matriz pode ser descrita por uma operação lógica simples, na qual todos os elementos da escala de cinza abaixo de um valor definido se tornam 0 (preto) e todos os valores acima se tornam 1 (branco). Esse valor é chamado de *threshold* e sua determinação é de interesse para a transformação das imagens em uma matriz binária.

Figura 8 – Utilização do comando *threshold* no software ImageJ para binarização da imagem.



Fonte: a autora, 2020.

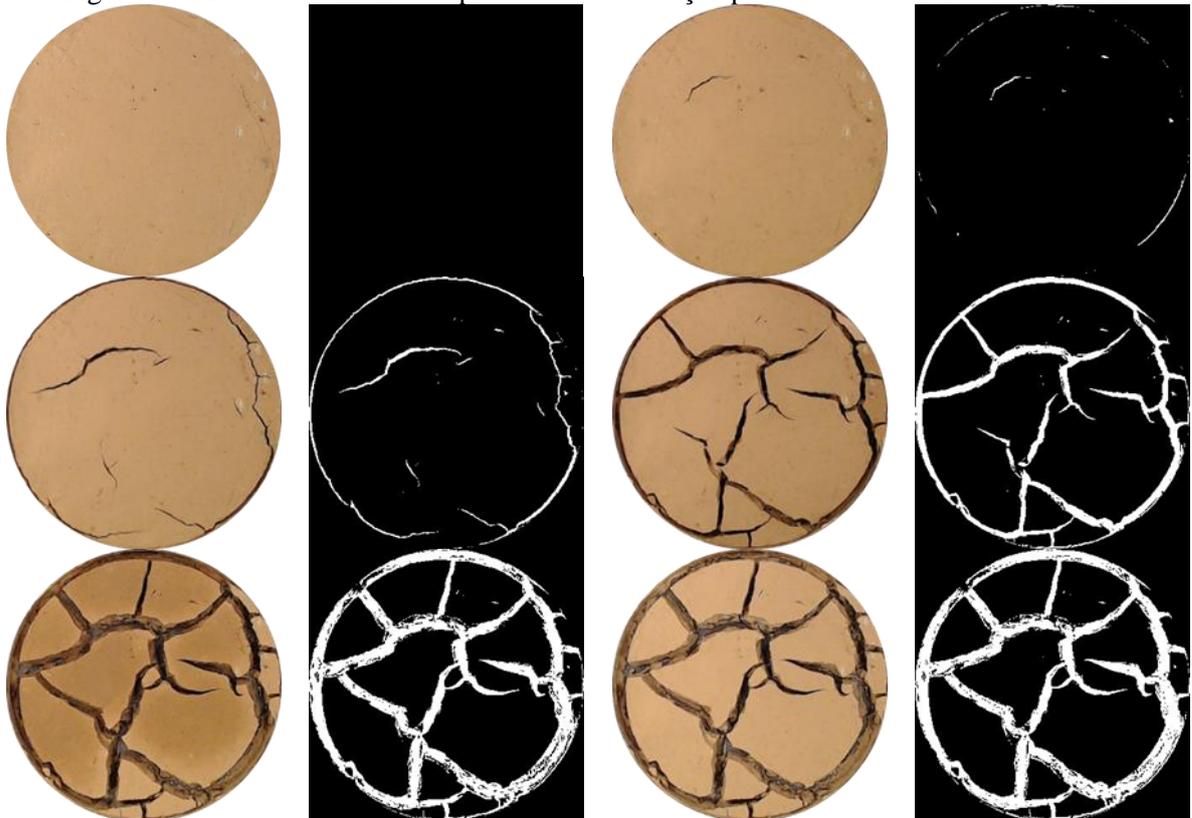
Figura 9 – Diferentes estágios do processamento de imagem: (a) imagem original colorida; (b) imagem em escala de cinza; (c) imagem binária.



Fonte: a autora, 2020.

A Figura 10 apresenta o desenvolvimento do processo de secagem e fissuração, com as imagens coloridas e binarizadas para o solo natural de Paulista-PE com umidade inicial igual a 76 %.

Figura 10 – Desenvolvimento do processo de fissuração para o solo natural de Paulista-PE.



Fonte: Barbosa (2019).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no programa de investigação geotécnica de um solo expansivo, com o objetivo de obter a caracterização física e reológica do solo natural e de suas misturas (solo-areia, solo-cal e solo-CCA). Como também, avaliar a influência desses materiais no comportamento do solo e na dinâmica de fissuração.

#### **3.1 MATERIAIS UTILIZADOS**

Os materiais utilizados são: solo de Paulista-PE, areia de Bezerros-PE, cal hidratada comercializada na cidade de Recife do tipo CH-1 e cinza de casca de arroz de Cabrobó.

##### **3.1.1 Solo de Paulista**

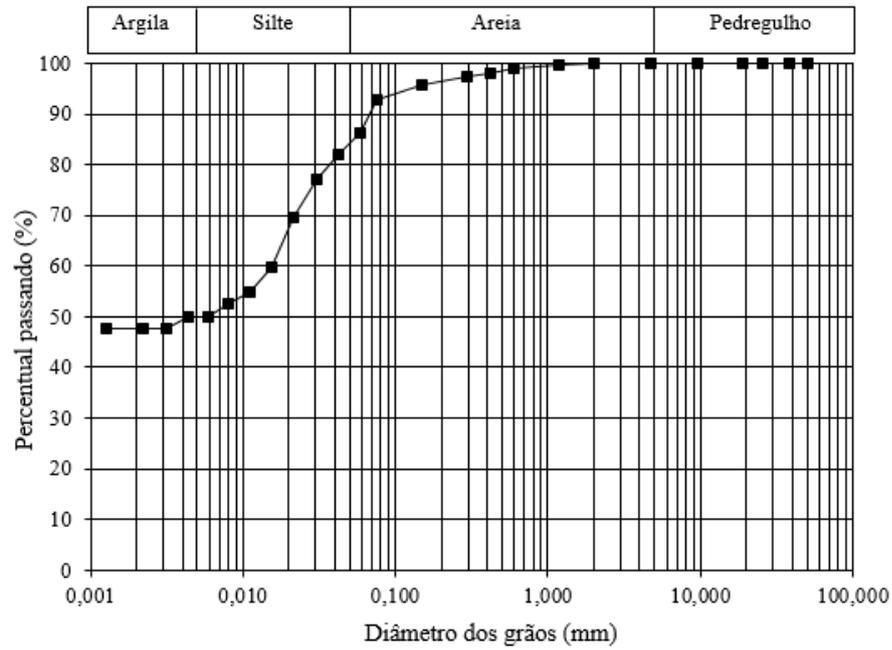
Foram coletadas amostras deformadas do solo argiloso do município de Paulista-PE. O local de pesquisa está situado na estação de tratamento de esgoto da Companhia de Saneamento do Estado de Pernambuco (COMPESA), localizada no bairro do Janga, litoral sul do município de Paulista-PE.

O município de Paulista localiza-se na região Metropolitana do Recife, distando 17 quilômetros da capital do Estado. Limita-se ao norte com o município de Abreu e Lima, ao sul com o município de Olinda e ao leste com o oceano Atlântico. O solo é proveniente do intemperismo físico-químico de argilitos e calcário margoso da Formação Maria Farinha (BASTOS, 1994).

O estudo do comportamento do solo de Paulista iniciou em 1992. Jucá et al. (1992) analisou o comportamento da argila expansiva através de ensaios laboratoriais e de campo. Em seguida, Bastos (1994) e Justino da Silva (2001) por meio da instrumentação de campo, avaliaram o deslocamento vertical do maciço quando submetido a diferentes condições climáticas, tendo caracterizado a camada ativa do solo até uma profundidade de 3,0 a 3,5 m.

Paiva (2016), Moraes (2017) e Constantino (2018) complementaram o programa experimental por meio de ensaios de caracterização física, química, mecânica e mineralógica. Paiva (2016) e Constantino (2018) realizaram experimentos para tratamento do solo por meio da adição de cal hidratada e cinza de casca de arroz (CCA), respectivamente. A Figura 11 mostra a curva granulométrica do solo natural de Paulista-PE.

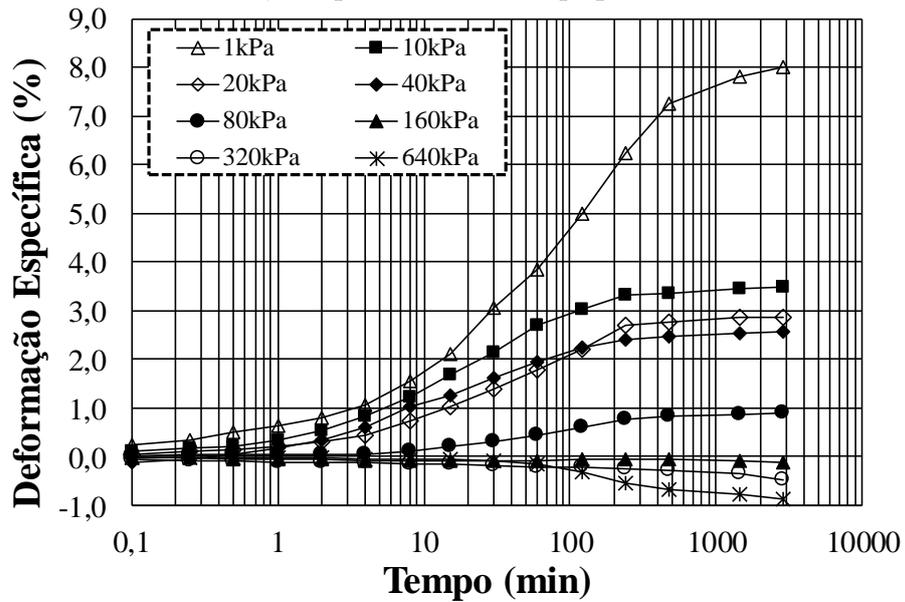
Figura 11 – Curva granulométrica do solo de Paulista-PE.



Fonte: Morais (2017).

Barbosa (2019) encontrou valores de expansão de 8,00% e 3,49% para as sobrecargas de 1 kPa e 10 kPa, respectivamente, para o solo de Paulista-PE. Sendo o solo classificado com um grau de expansividade médio, segundo o critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973).

Figura 12 – Curva de deformação específica com o tempo para o solo de Paulista-PE.



Fonte: Barbosa (2019).

### 3.1.2 Areia

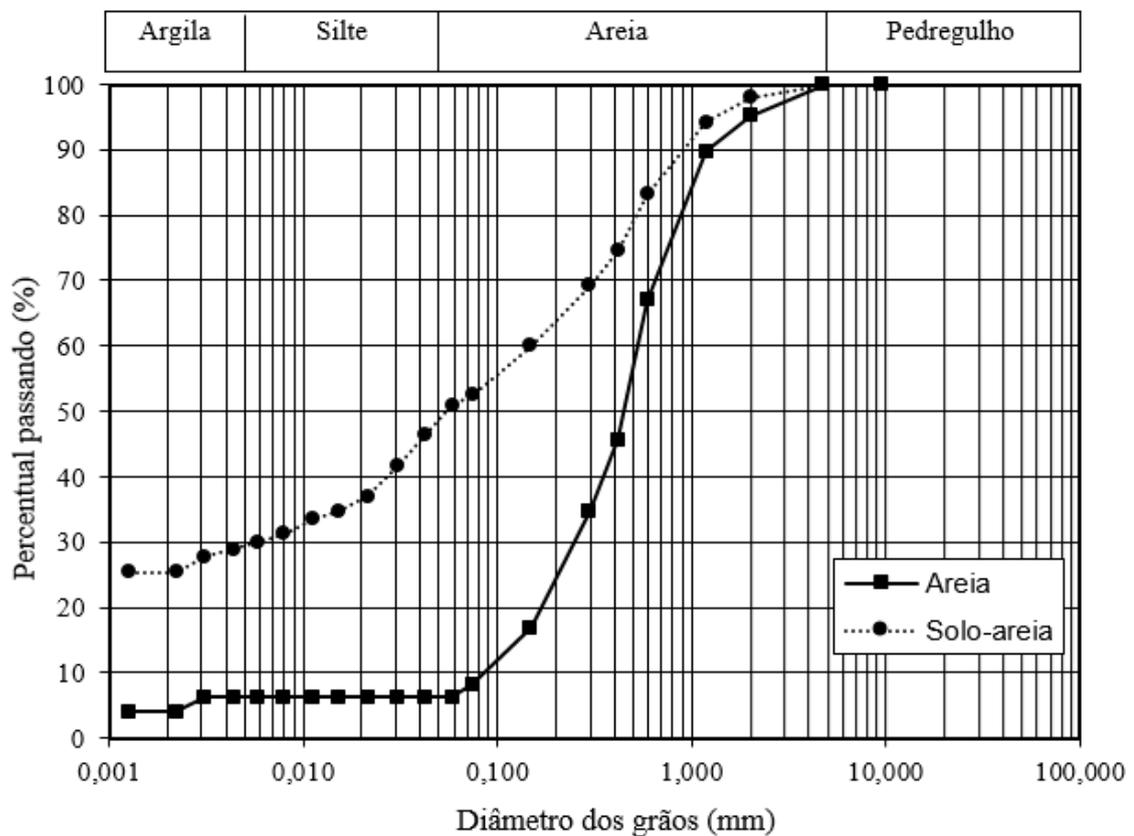
Foram coletadas amostras deformadas de areia do leito do rio Ipojuca, no município de Bezerros-PE. Esse município localiza-se no agreste pernambucano, distante cerca de 115 km de Recife. Trata-se de um solo arenoso, escolhido para estudar a expansividade da argila de Paulista-PE por Cavalcanti (2017). Foi utilizado o teor de 50% de areia na mistura solo-areia.

Tabela 7 – Caracterização Física da areia de Bezerros-PE.

Caracterização física	CCA
Peso específico aparente seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )	19,68
Umidade ótima (%)	7,44
Limite de Liquidez (%)	-
Limite de Plasticidade (%)	NP

Fonte: Cavalcanti (2017).

Figura 13 – Curvas granulométricas da areia e da mistura solo-areia (50%).



Fonte: Cavalcanti (2017).

### 3.1.3 Cal

A cal hidratada utilizada é comercializada na cidade de Recife-PE, sendo classificada como CH, atendendo aos requisitos da NBR 7175/2003. Esta cal foi caracterizada por Paiva (2016) e os resultados estão expostos nas Tabelas 8 e 9. A curva granulométrica da mistura solo-cal com teor de cal igual a 5%, teor que estabilizou o solo quanto a expansão, é mostrada na Figura 14.

Tabela 8 – Análise química da cal utilizada nesta pesquisa.

Determinações	Unidade	Resultado
Umidade	%	1,31
Perda ao fogo (PF)	%	24,23
Óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	%	0,22
Óxido de cálcio total ( $\text{CaO}_T$ )	%	66,93
Óxido de cálcio disponível ( $\text{CaO}_D$ )	%	58,49
Anidrido Carbônico ( $\text{CO}_2$ )	%	4,09
Massa específica	kg/m <sup>3</sup>	445
Finura: Peneira 30 – 0,600 mm	%	0,1
Peneira 200 – 0,075 mm	%	0,13
Retenção de água	%	87

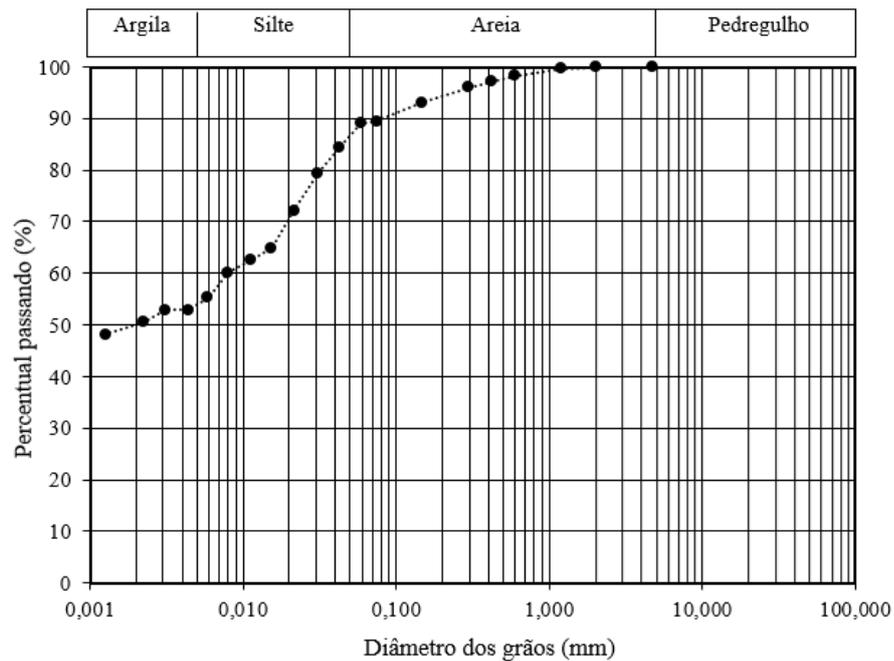
Fonte: Paiva (2016).

Tabela 9 – Resultados dos óxidos da cal por fluorescência de raios-X.

Amostra	Óxidos											Total
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ t	MgO	MnO	CaO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	PF	
Cal	0,00	1,50	0,00	1,93	0,00	66,42	0,00	0,12	0,06	0,01	27,44	97,48

Fonte: Paiva (2016).

Figura 14 – Curva granulométrica da mistura solo-cal (5%).



Fonte: Paiva (2016).

### 3.1.4 Cinza de casca de arroz

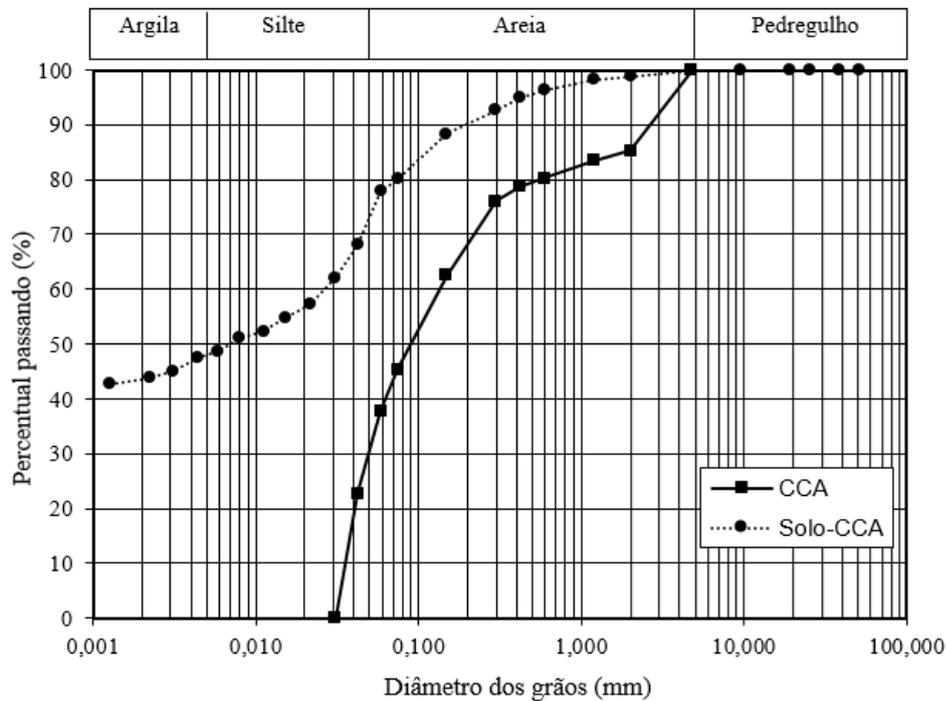
A cinza de casca de arroz utilizada neste estudo é proveniente da queima não controlada da casca do arroz coletada em uma fábrica de arroz da cidade de Cabrobó-PE. A CCA utilizada foi caracterizada por Lacerda (2018) e algumas das suas características físicas são apresentadas na Tabela 10. A Figura 15 apresenta as curvas granulométricas da cinza de casca de arroz e da mistura solo-CCA, com teor de CCA igual a 10%, percentual que estabilizou o solo quanto a expansão.

Tabela 10 – Caracterização Física da cinza de casca de arroz.

Caracterização física	CCA
Peso específico aparente seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )	5,15
Umidade ótima (%)	109
Peso específico dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	19,1
Limite de Liquidez (%)	Não líquida
Limite de Plasticidade (%)	Não plástica

Fonte: Lacerda (2018).

Figura 15 – Curvas granulométricas da cinza de casca de arroz e da mistura solo-CCA (10%).



Fonte: Constantino (2018).

## 3.2 MÉTODOS

Os ensaios de caracterização física e squeeze-flow foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI/UFPE). Já os ensaios de fissuração por ressecamento foram realizados no Laboratório de Solos Não Saturados (LabÑSat/UFPE).

### 3.2.1 Preparação das amostras

Para a realização dos ensaios foi feito o peneiramento do solo coletado da profundidade de 0,10 a 2,00 m, sem secagem prévia e sem destorroamento, e foi passado na peneira de abertura igual a 4,76 mm para uniformização dos grumos.

As amostras foram preparadas segundo as recomendações da ABNT, NBR 6457/16. Os teores, em peso, utilizados nas misturas foram os seguintes: 5% de cal na mistura solo-cal e 10% de CCA na mistura solo-CCA, valores que estabilizaram o solo de Paulista-PE quanto a expansão conforme Paiva (2016) e Constantino (2018), respectivamente. A mistura de solo com areia foi preparada na proporção de 1:1, com esta proporção a tensão de expansão do solo reduz 54% conforme Cavalcanti (2017). As misturas foram realizadas no momento de cada ensaio.

Figura 16 – Preparação das amostras: a) solo natural, b) solo-areia, c) solo-CCA, d) solo-cal.



Fonte: a autora, 2020.

### 3.2.2 Caracterização Física

Os ensaios de caracterização Física do solo natural de Paulista-PE e das misturas foram: limite de plasticidade, limite de liquidez e densidade real dos grãos. Foram utilizadas as seguintes normas brasileiras:

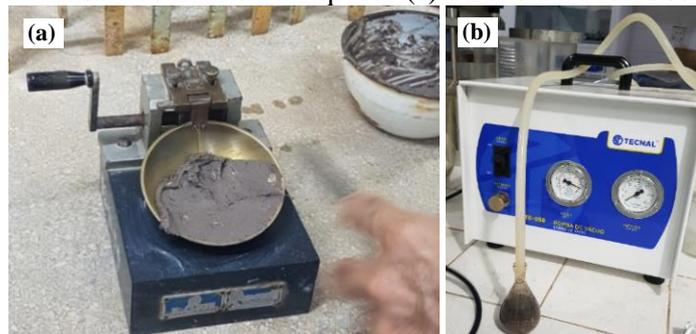
Limite de Plasticidade: ABNT, NBR 7180/2016;

Limite de Liquidez: ABNT, NBR 6459/2016;

Densidade Real dos Grãos: ABNT, NBR 6508/2016.

Os ensaios de Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez foram realizados sem secagem prévia para evitar a formação de grumos mais resistentes devido à secagem ao ar. A presença de grumos tem importância significativa na homogeneidade das amostras, na análise de fissuras e na interação entre as partículas.

Figura 17 – Ensaio de Limite de Liquidez (a) e Densidade real dos grãos (b).

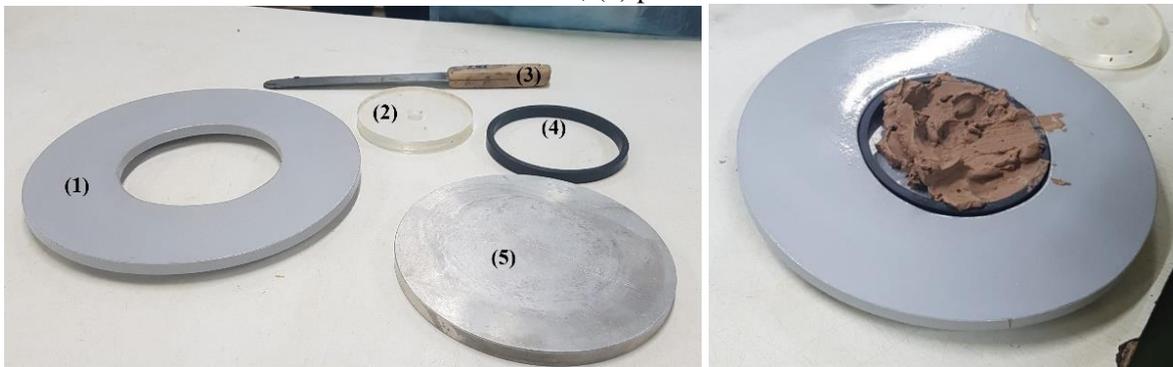


Fonte: a autora, 2020.

### 3.2.3 Squeeze-flow

O equipamento utilizado foi uma prensa universal com controle de deslocamento e com anel dinamométrico de 1000 N e 5000 N. Gabarito plástico para auxiliar na moldagem e garantir a centralização da amostra. Placa superior e anel para moldagem com diâmetro interno de 100,2 mm e altura de 10 mm. A velocidade do ensaio foi de 0,04 mm/s e deslocamento máximo de 8 mm. A moldagem é realizada com auxílio de espátula que serve também para nivelar a superfície da amostra. A Figura 18 mostra as ferramentas utilizadas no ensaio.

Figura 18 – Conjunto de ferramentas necessárias para moldagem das amostras para o ensaio squeeze-flow: (1) gabarito; (2) placa superior; (3) espátula; (4) anel para moldagem 100,2 mm de diâmetro e 10 mm de altura; (5) placa inferior.

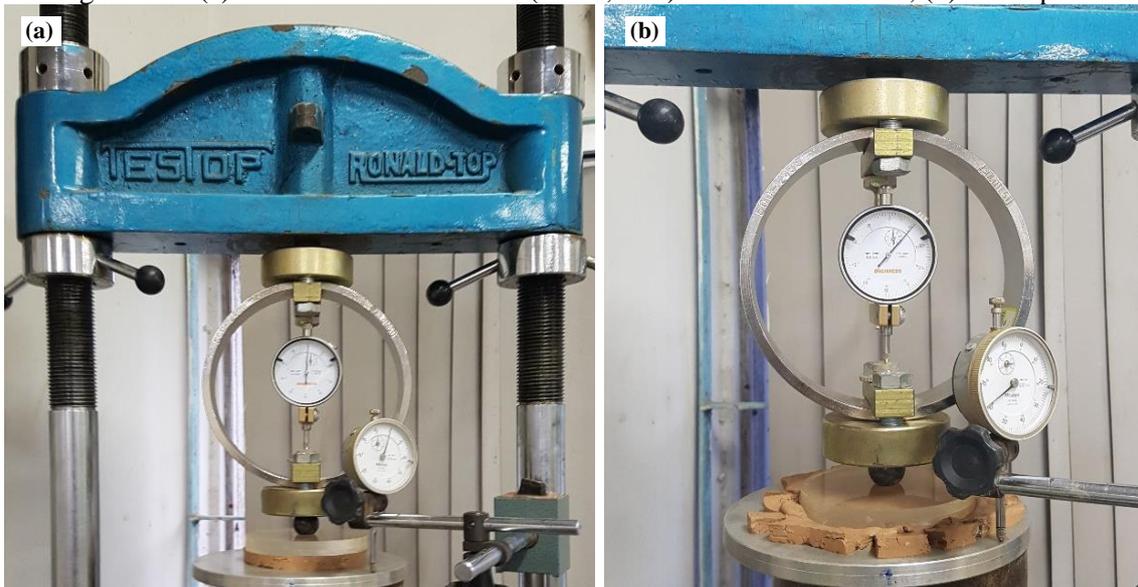


Fonte: a autora, 2020.

Foi calculada a massa de solo necessária para preencher o anel de moldagem, mantendo o índice de vazios constante e igual a 1,72 para todas as amostras ensaiadas. Foram realizados ensaios squeeze-flow nas amostras de solo natural, solo-areia, solo-cal e solo-CCA nas umidades dos ensaios do limite de liquidez e limite de plasticidade.

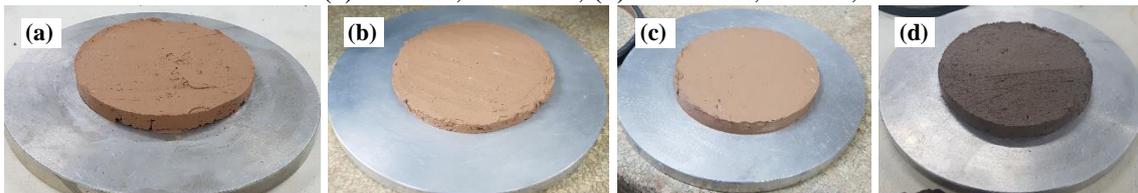
A amostra de solo é colocada sobre a placa inferior utilizando o anel de moldagem e o gabarito. Com o auxílio da espátula, coloca-se uma quantidade do material dentro do molde e faz o preenchimento uniforme. Retira-se o gabarito e em seguida o anel de moldagem. Faz o transporte da placa inferior com a amostra centralizada para a máquina do ensaio e acopla a placa sobre a base. Após regularizar o anel de carga e o deslocamento, o ensaio está pronto para ser realizado, Figura 19. Os corpos de prova de uma das amostras no início do ensaio são mostrados na Figura 20.

Figura 19 – (a) Amostra de solo natural ( $w=60,50\%$ ) no início do ensaio; (b) Solo após ensaio.



Fonte: a autora, 2020.

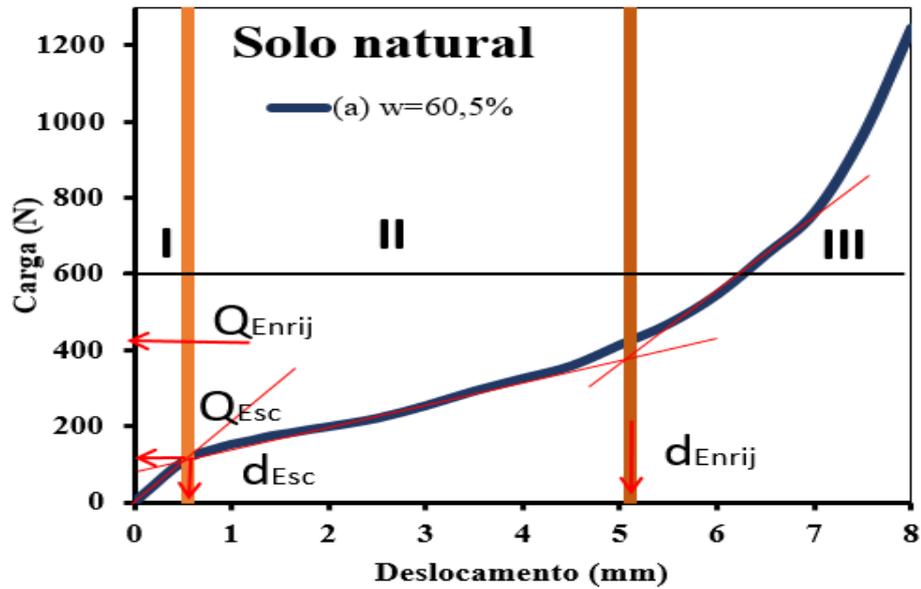
Figura 20 – Corpos de prova no início dos ensaios: (a) solo natural,  $w = 64\%$ ; (b) solo-areia,  $w = 54\%$ ; (c) solo-cal,  $w = 83\%$ ; (d) solo-CCA,  $w = 74,5\%$ .



Fonte: a autora, 2020.

Com a curva carga *versus* deslocamento (Figura 21) os três estágios do comportamento reológico foram aqui definidos pela mudança de comportamento da interação entre as partículas. O final do Estágio I e início do Estágio II é caracterizado pela carga de escoamento ( $Q_{Esc}$ ) e o deslocamento de escoamento ( $d_{Esc}$ ). O final do Estágio II e início do Estágio III é caracterizado pela carga inicial de enrijecimento ( $Q_{Enrij}$ ) e o deslocamento de inicial de enrijecimento ( $d_{Enrij}$ ). O final do Estágio III é considerado o final do ensaio (no caso para deslocamento de 8 mm, valor máximo adotado para o deslocamento já que o anel de moldagem tem 10 mm de altura).

Figura 21 - Curva carga *versus* deslocamento com definição dos três estágios do comportamento reológico.



### 3.2.4 Ensaio de fissuras

A seguir são apresentados os procedimentos adotados para a realização dos ensaios de fissuração por ressecamento nas misturas solo-areia, solo-cal e solo-CCA.

#### 3.2.4.1 Equipamentos e procedimentos utilizados

O aparato montado no Laboratório de Solos Não Saturados da UFPE permitiu monitorar amostras de solo submetidas à secagem, onde a temperatura e umidade relativa foram monitoradas com o auxílio de um termo higrômetro, como também o peso do conjunto (amostra + placa) que foi registrado com uma balança de precisão 0,01 g (Figura 22).

Foi utilizado um aparato de madeira, o qual possui uma base com cinco hastes que servem de apoio para a balança, luminárias e webcam. Além disso, foi confeccionada uma caixa de madeira para envolver o aparato, com a finalidade de estabilizar a temperatura ambiente ao longo do ensaio. Um termo higrômetro digital do fabricante Inconterm foi instalado dentro do aparato e próximo as amostras para monitorar a temperatura e umidade relativa do ar durante a realização do ensaio. A Figura 22 ilustra o aparato utilizado e o posicionamento dos equipamentos.

Figura 22 – Aparato do ensaio de propagação de fissuras.



Fonte: a autora, 2020.

Para as secagens das amostras foram utilizadas quatro lâmpadas incandescentes de 40 W direcionadas para a balança/amostra ensaiada, posicionadas a uma altura de 25 cm da amostra. Todos os ensaios foram monitorados com o auxílio de uma webcam localizada no aparato de madeira, a uma altura de 45 cm.

#### 3.2.4.2 Moldagem e realização dos ensaios

Foram realizados ensaios para analisar a propagação de fissuras nas amostras de solo-areia, solo-cal e solo-CCA. Todos seguiram o mesmo procedimento de preparação e moldagem, Figura 23.

O solo foi misturado com água de forma gradual até chegar a umidade estabelecida. As amostras de solo-cal e solo-CCA foram preparadas com umidade próxima a 1,5 vezes o Limite de Liquidez da mistura, 115,5% e 108,9% respectivamente. Já a amostra de solo-areia ficou com umidade igual a 2 vezes o LL (107,6%), para iniciar com umidade próxima aos ensaios solo-cal e solo-CCA. A pasta de solo foi derramada em placas Petri de vidro e pequenos golpes foram dados na borda para remover as bolhas de ar. A superfície da amostra foi nivelada com uma régua para obter uma uniformização. Uma quantidade de solo foi retirada para determinar a umidade inicial.

Após a moldagem, a placa Petri de 146 mm de diâmetro e 15 mm de altura era colocada em cima de uma balança de precisão com sensibilidade de 0,01 g e anotava-se o peso inicial, Figura 24. Essa placa com o solo permanecia, durante todo o ensaio, sobre a balança. Isso

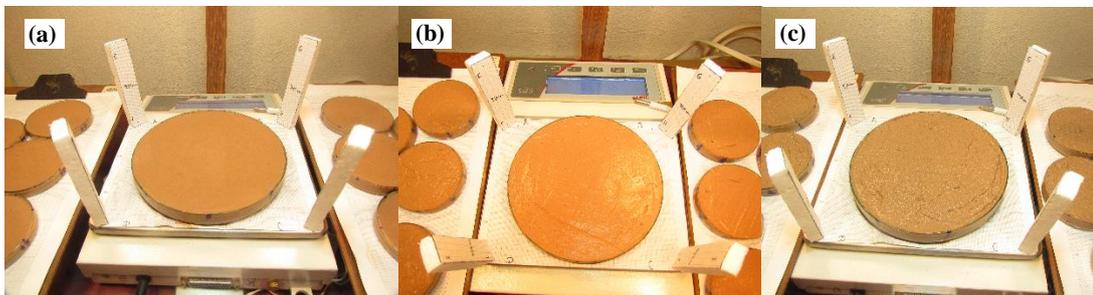
permitia a obtenção do peso do conjunto em tempo real, possibilitando a determinação da umidade do solo em qualquer instante. Ao término do ensaio, parte da amostra de solo era destinada para a obtenção da umidade final pelo método da estufa.

Figura 23 – Preparação de amostra para ensaio de propagação de fissuras.



Fonte: a autora, 2020.

Figura 24 – Início do ensaio de propagação de fissuras para as amostras: (a) solo-areia; (b) solo-cal; (c) solo-CCA.



Fonte: a autora, 2020.

Durante o ensaio, as amostras foram monitoradas para obtenção de características relevantes, como o início da primeira fissura, separação do solo das bordas da placa, comprimento total das fissuras, largura média das fissuras, número de segmentos de fissuras e CIF. Para isso, foram tiradas fotografias a cada 10 minutos para serem usadas no processo de análise de imagem. A partir das imagens obtidas verificou-se a formação de fissuras sobre a superfície de cada amostra ensaiada, Figura 25.

Placas menores também foram colocadas dentro do aparato, porém fora da balança para determinação da sucção. A sucção total das misturas solo-areia, solo-cal e solo-CCA foi medida por meio da técnica de papel filtro durante o processo de fissuras. Após 20 dias de equalização,

o papel filtro era pesado em uma balança com precisão de 0,0001 g e em seguida colocado em estufa para secagem. Após 24 h de secagem o papel era pesado novamente, obtendo a umidade do papel filtro após equalização. Com os valores de umidade do papel e utilizando o modelo de Van Genuchten (1980) para definição da curva característica de retenção foram obtidos os valores de sucção para diferentes umidades e para todas as misturas.

Figura 25 – Fim do ensaio de propagação de fissuras para as amostras: (a) solo-areia; (b) solo-cal; (c) solo-CCA.



Fonte: a autora, 2020.

### 3.2.4.3 Sistema de aquisição de imagens

Para verificação e acompanhamento do processo de formação e propagação de fissuras, imagens foram obtidas por meio de uma webcam Logitech C922 PRO STREAM Full HD ligada a um notebook. Através do software livre Auto Screenshot Capture foi possível controlar a captura automática de imagens por um tempo predeterminado de 10 min.

Após a realização dos ensaios, foi feito o processo de seleção das imagens a ser utilizadas para o cálculo dos índices estabelecidos. Como padrão, foi feita a escolha das imagens correspondente a uma variação aproximada de 5% de umidade. A análise de imagens permitiu realizar comparações entre os padrões de fissuração das amostras ensaiadas, determinar o tempo para o surgimento das primeiras fissuras e calcular diversos índices geométricos.

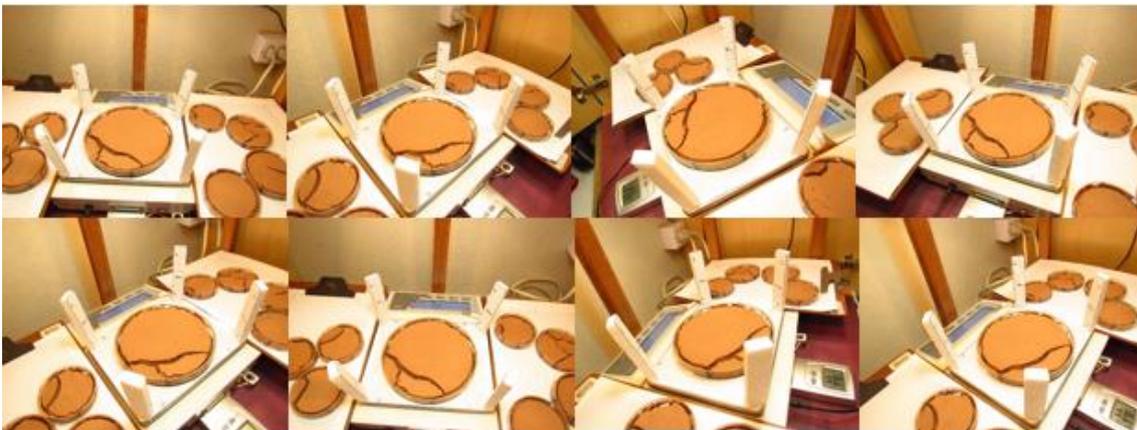
Figura 26 – Imagem do início do ensaio de propagação de fissuras para a amostra solo-CCA obtida com o software Auto Screenshot Capture.



Fonte: a autora, 2020.

No início do ensaio, após a retirada de cada placa Petri pequena e ao final do ensaio era realizada uma sequência de fotos de diversos ângulos com uma câmera profissional para geração de um modelo tridimensional da amostra colocada na balança, Figura 27. Para a criação do modelo tridimensional foi utilizado o software Agisoft Metashape (Figura 28), já para a visualização do modelo foi utilizado o software 3DS Max da Autodesk (Figura 29).

Figura 27 – Imagens obtidas por meio de uma câmera fotográfica profissional para geração do modelo tridimensional da amostra solo-cal.



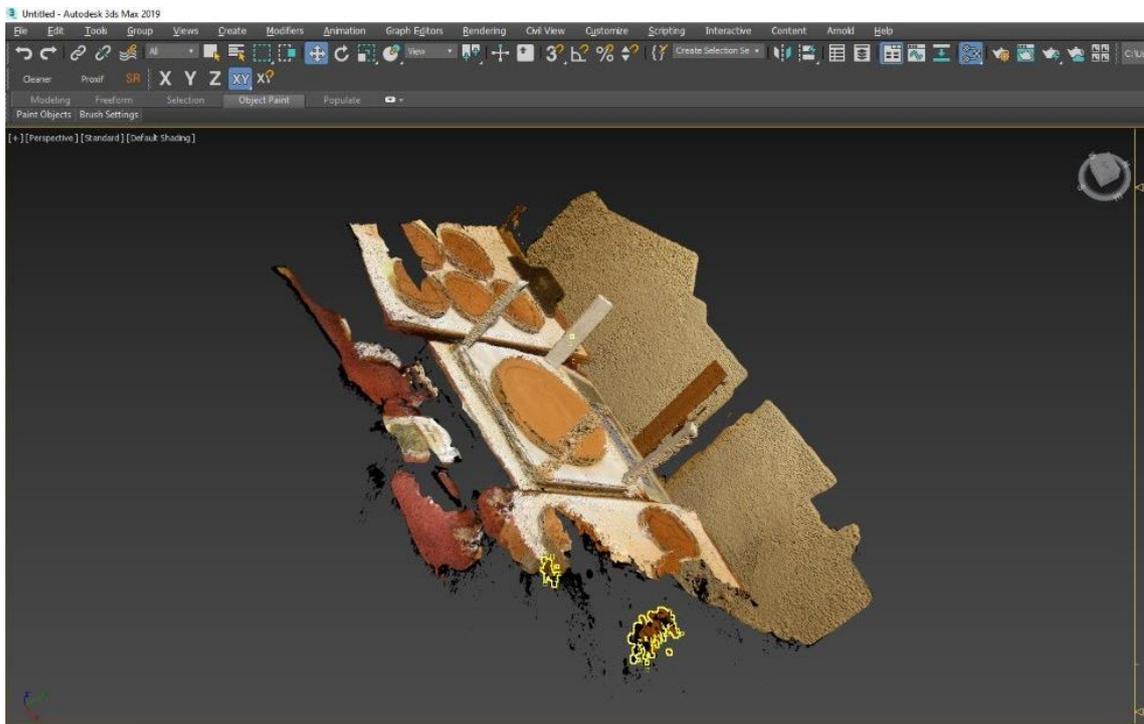
Fonte: a autora, 2020.

Figura 28 – Modelo tridimensional da amostra solo-cal desenvolvido com o software Agisoft Metashape.



Fonte: a autora, 2020.

Figura 29 – Visualização do modelo tridimensional da amostra solo-cal no software 3DS Max.



Fonte: a autora, 2020.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

São apresentados os resultados dos ensaios realizados no solo natural de Paulista-PE e suas misturas com areia, cal e cinza de casca de arroz.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os resultados da caracterização física do solo natural e das misturas solo-areia, solo-cal e solo-CCA são mostrados na Tabela 11. O limite de liquidez, tanto do solo natural quanto das misturas, ficou acima de 50%. O limite de plasticidade varia entre 22 e 29%. A Figura 30 mostra a distribuição granulométrica do solo, da areia, da cinza de casca de arroz e das misturas e a Figura 31 a Carta de Plasticidade e Atividade.

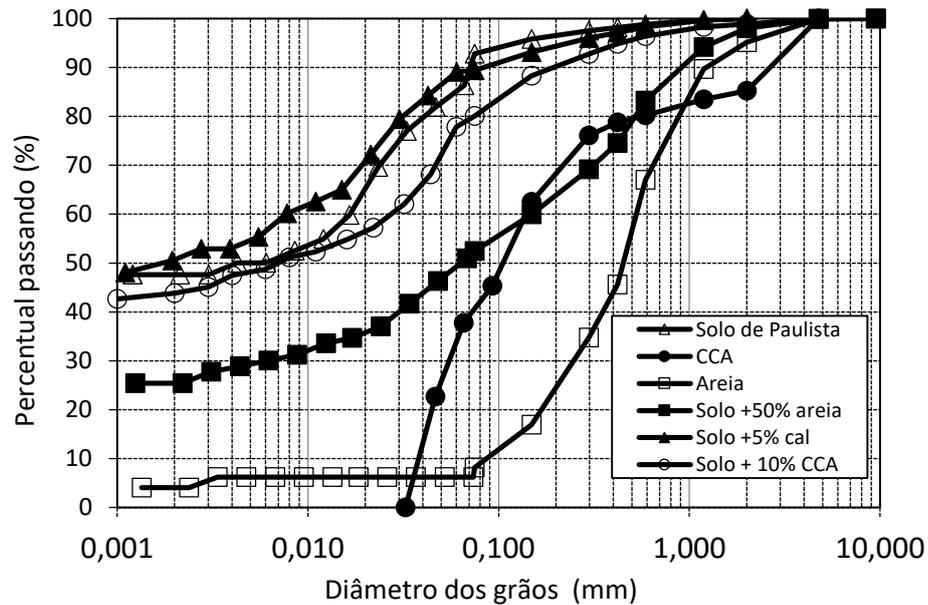
Tabela 11 – Caracterização Física do solo natural e das misturas solo-areia, solo-cal e solo-CCA.

AMOSTRA	Solo natural	Solo + areia	Solo + cal	Solo + CCA
Pedregulho %	0,28*	0**	0***	1,12*
Areia %	28,57*	50**	16***	21,02*
Silte %	17,75*	20**	28***	23,06*
Argila %	53,40*	30**	56***	54,78*
% < 0,002 mm	47	25	50	43
Limite de liquidez	74	54	78	77
Limite de plasticidade	26	22	27	29
Índice de plasticidade	48	32	51	48
Classificação SUCS	CH	CH	CH	CH
Classificação AASHTO/TRB/HRB	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6
Peso específico real (kN/m <sup>3</sup> )	26,80	26,70	25,80	25,60
CTC cmolc/kg	46,30***	29,47**	97,60***	209,37*
Condutividade elétrica do estrato de saturação $\mu\text{S}/\text{cm}/25^\circ\text{C}$	303***	921,81**	1165***	379,20*

Fonte: a autora, 2020.

\*Constantino (2018), \*\*Cavalcanti (2017), \*\*\*Paiva (2016).

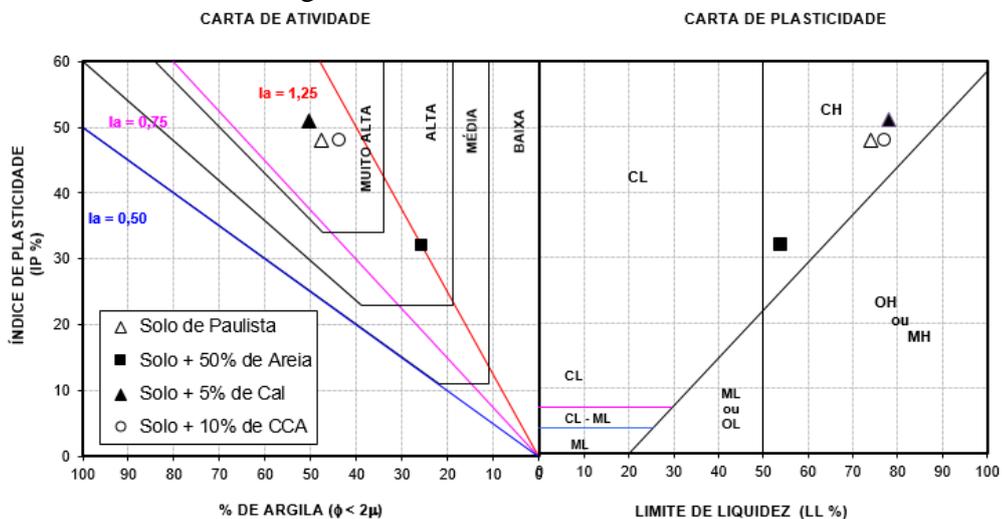
Figura 30 - Distribuição granulométrica do solo, areia, CCA e das misturas.



Fonte: a autora, 2020.

\*Solo de Paulista-PE: Morais, 2017; CCA e Solo + 10% CCA: Constantino, 2018; Areia e Solo + 50% areia: Cavalcanti, 2017; Solo + 5% cal: Paiva, 2016.

Figura 31 - Carta de Plasticidade e Atividade.



Fonte: a autora, 2020.

Pela classificação SUCS, tanto o solo natural como as misturas são considerados argilas muito plásticas e altamente compressível (CH) e pela classificação HRB da AASHTO, solo argiloso fraco (A-7-6).

A adição de 50% de areia ao solo de expansivo de Paulista-PE reduziu 27% do valor do limite de liquidez e 33% o índice de plasticidade; isto se deve a substituição de argila por areia constituída preponderantemente por quartzo, material inerte. A adição de 5% cal hidratada ou

10% de CCA ao solo expansivo não causaram variações significativas ao limite de liquidez e índice de plasticidade mas reduziu o peso específico real dos grãos em média 4%.

Fattah, Rahil e Al-Soudany (2013) realizaram ensaios em três solos argilosos coletados em Balad Ruz, Naravã e Nassíria, cidades localizadas no Iraque. Ao se adicionar 6% de CCA aos três solos ocorreu pequena redução nos valores de LL e IP. A adição de 8% de CCA aos solos de Buruku (AKINYELE et al., 2015), de Brejo da Madre de Deus (BEZERRA, 2019) e de Paulista (CONSTANTINO, 2018) causou acréscimo no LL e no de Agrestina (SILVA, 2018) decréscimo e nos valores de IP há um decréscimo em todos os solos.

No solo de Agrestina a adição de 5% de Cal-Hidratada causou acréscimo de 11% no LL e houve decréscimo nos valores do IP (SILVA, 2018). Nos solos expansivos de Ipojuca e Cabrobó, Paiva (2016) verificou acréscimo de até 15% nos valores de LL e redução de 10% no solo de Paulista e com relação ao IP houve redução nos solos de Cabrobó e Paulista e acréscimo no solo de Ipojuca.

Os ensaios de limites de consistência foram realizados sem o destorroamento e a secagem prévia do solo, medida adotada para evitar formação de grumos no solo e nas misturas e evitar uma maior perturbação da estrutura do solo, Tabela 12. Os valores de limite de liquidez apresentam-se superiores aos obtidos com secagem prévia e os valores de limite de plasticidade praticamente não houve alteração exceto na mistura solo-cal. Há, portanto acréscimo no índice de plasticidade. A secagem prévia das amostras causa a formação de grumos de alta resistência seca, devido à alta sucção, e a molhagem e homogeneização durante o ensaio do limite de liquidez leva a não uniformidade na umidade e a uma granulometria dos grumos com maior dimensão, reduzindo assim a capacidade de armazenar água e a umidade, reduzindo o LL.

Tabela 12 – Comparativo dos Limites de Atterberg para o solo natural e misturas na literatura.

AMOSTRA	AUTOR	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
Solo natural	Paiva (2016)	61	31	30
	Cavalcanti (2017)	62	27	35
	Constantino (2018)	58	25	33
	Autora (2020)	74	26	48

Fonte: a autora, 2020.

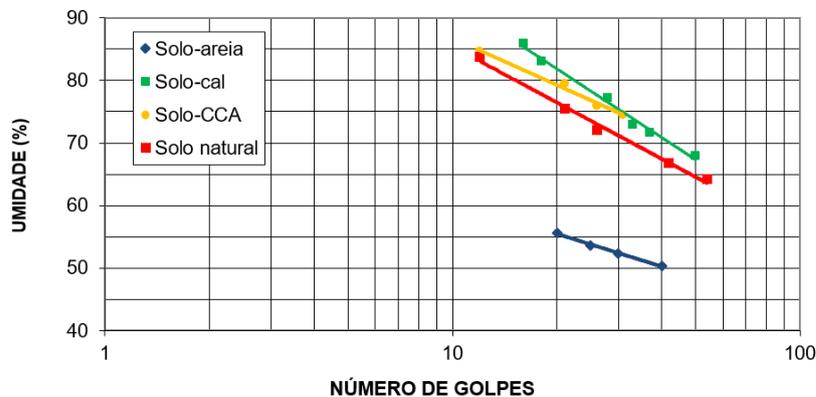
Tabela 12 – Comparativo dos Limites de Atterberg para o solo natural e misturas na literatura (continuação).

AMOSTRA	AUTOR	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
Solo-areia (50%)	Cavalcanti (2017)	38	22	16
	Autora (2020)	54	22	32
Solo-cal (5%)	Paiva (2016)	54	42	12
	Autora (2020)	78	27	51
Solo-CCA (10%)	Constantino (2018)	61	29	32
	Autora (2020)	77	29	48

Fonte: a autora, 2020.

Na Figura 32, são mostrados os resultados dos ensaios de limite de liquidez para o solo natural e misturas. As umidades dos pontos da reta do limite de liquidez de cada amostra foram utilizadas para a moldagem das amostras no ensaio squeeze-flow.

Figura 32 – Resultados dos ensaios de limites de liquidez para as amostras de solo natural, solo-areia, solo-cal e solo-CCA.



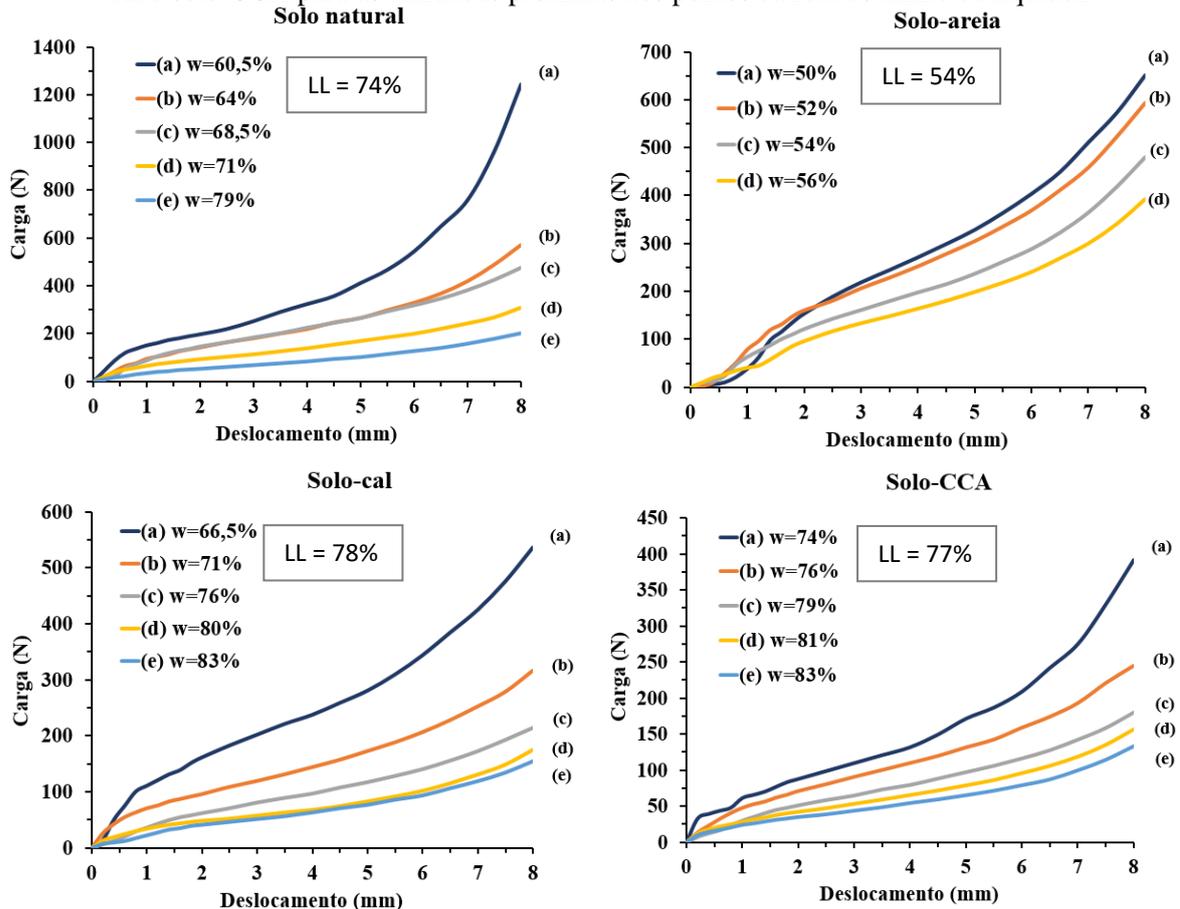
Fonte: a autora, 2020.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

A Figura 33 apresenta as curvas carga *versus* deslocamento obtidas do ensaio squeeze-flow correspondentes às umidades utilizadas no ensaio para determinação do limite de liquidez. Observa-se que as curvas do solo e das misturas fluem de forma contínua, sem que haja alguma parada de carga ou de fluir, mostrando a homogeneidade das amostras, dos mecanismos internos de deformação e do fluido do material e a redução do atrito entre a placa (punção) do solo ou misturas. Não se verifica oscilação de carga. São observados os três estágios do perfil reológico. Devido a escala adotada, algumas curvas aparentam não possuir todos os estágios no

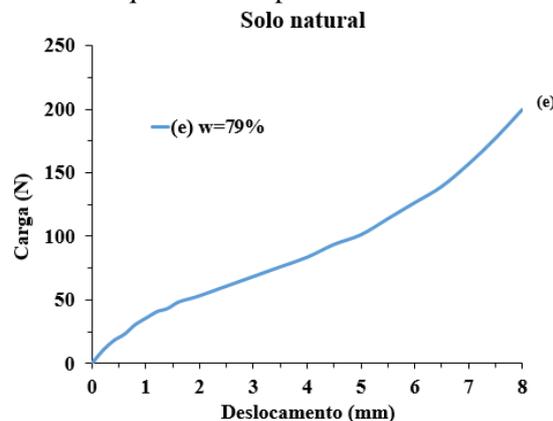
gráfico com todas as umidades ensaiadas (Figura 33). Porém, quando analisadas separadamente é possível observar todos os três estágios, Figura 34. As formas das curvas carga *versus* deslocamento dos solos e saibros estudados por Notaro (2012) nas umidades do Limite de Liqueidez apresentaram apenas dois trechos, II e III.

Figura 33 – Resultados dos ensaios de squeeze-flow para as amostras de solo natural, solo-areia, solo-cal e solo-CCA para as umidades próximas aos pontos da reta do limite de liqueidez.



Fonte: a autora, 2020.

Figura 34 – Resultado do ensaio de squeeze-flow para o solo natural na umidade igual a 79%.



Fonte: a autora, 2020.

Na Tabela 13 é mostrada a carga ( $Q_{Esc}$ ) e o deslocamento de escoamento ( $d_{Esc}$ , final do Estágio I) e carga inicial de enrijecimento ( $Q_{Enrij}$ ) e o deslocamento inicial de enrijecimento ( $d_{Enrij}$ ), final do Estágio II e início do Estágio III, seguindo o procedimento indicado na Figura 21.

Tabela 13 – Índices e dados do comportamento reológico do solo e das misturas.

AMOSTRA	Índices e dados do comportamento reológico									
	W (%)	$Q_{Esc}$ (N)	$\sigma_{Esc}$ (kPa)	$d_{Esc}$ (mm)	$\epsilon_{Esc}$ (%)	$Q_{Enrij}$ (N)	$\sigma_{Enrij}$ (kPa)	$d_{Enrij}$ (mm)	$\epsilon_{Enrij}$ (%)	$Q_{Final}$ (N)
Solo natural	60,5	120	15,22	0,55	5,5	440	55,80	5,25	52,40	1245
	64	90	11,41	0,80	8,0	290	36,78	5,30	52,89	573
	68,5	80	10,15	0,90	9,0	260	32,97	4,75	47,41	475
	71	52	6,59	0,60	6,0	147	18,64	4,20	41,92	308
	79	31	3,93	0,85	8,5	112	14,20	5,50	54,89	199
Solo-areia	50	165	20,93	1,90	19,0	380	48,19	5,70	56,89	651
	52	150	19,02	1,70	17,0	405	51,36	6,40	63,87	595
	54	110	13,95	1,60	16,0	325	41,22	6,50	64,87	481
	56	130	16,49	2,80	27,9	250	31,70	6,20	61,88	393
Solo-cal	66,5	105	13,32	0,80	8,0	340	43,12	5,40	53,89	535
	71	50	6,34	0,50	5,0	200	25,36	5,85	58,38	317
	76	50	6,34	1,50	15,0	145	18,39	6,10	60,88	215
	80	30	3,80	0,60	6,0	94	11,92	5,60	55,89	175
	83	36	4,57	1,50	15,0	82	10,40	5,35	53,39	154
Solo-CCA	74	40	5,07	0,30	3,0	185	23,46	5,50	55,00	392
	76	41	5,20	0,85	8,5	144	18,26	5,55	55,50	245
	79	50	6,34	1,40	14,0	130	16,49	6,60	66,00	180
	81	18	2,28	0,40	4,0	89	11,29	6,00	60,00	157
	83	14,6	1,85	0,40	4,0	79	10,02	6,00	60,00	134

Fonte: a autora, 2020.

W= umidade;  $Q_{Esc}$ = carga de escoamento;  $\sigma_{Esc}$ = tensão de escoamento;  $d_{Esc}$ = deslocamento de escoamento;  $\epsilon_{Esc}$ = deformação de escoamento;  $Q_{Enrij}$ = carga inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III);  $\sigma_{Enrij}$ = tensão inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III);  $d_{Enrij}$ = deslocamento inicial de enrijecimento (final Estágio II e início III);  $\epsilon_{Enrij}$ = deformação inicial de enrijecimento (final Estágio II e início III);  $Q_{Final}$ = carga para deslocamento de 8 mm.

No Estágio I, o material comporta-se como um material sólido apresentando deformação elástica linear e está relacionado à tensão de escoamento do solo e das misturas. É caracterizado por pequenos deslocamentos ( $< 1$  mm) em sua quase totalidade para o solo e misturas solo-cal e solo-CCA. Na mistura solo-areia os deslocamentos elásticos são maiores (1,6 a 2,8 mm). As maiores tensões de escoamento ocorrem na mistura solo-areia.

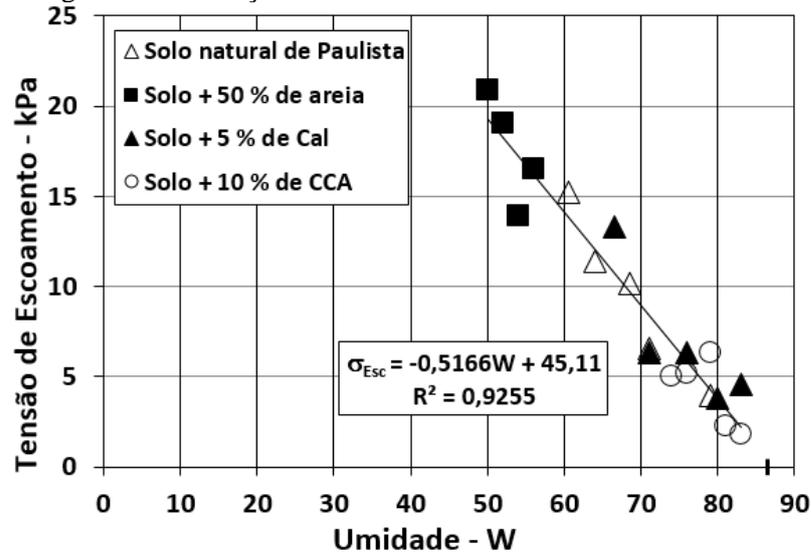
O Estágio II inicia no término do Estágio I e se estende até a 4,2 mm a 6,6 mm, início do Estágio III. Ocorrem deslocamentos intermediários e a compressão resulta da deformação radial de cisalhamento superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico, trata-se de deslocamento plástico e ou viscoso.

No Estágio II, o solo e as misturas são capazes de apresentar deslocamentos sem aumento significativa de força, exceto para a mistura solo-areia que apresenta aumento mais expressivo de carga. As maiores tensões de início de enrijecimento ocorrem no solo natural.

No Estágio III, (para deslocamentos superiores a 4,2 mm a 6 mm) há um aumento significativo da carga necessária para dar continuidade ao deslocamento, influenciada pela aproximação das partículas e a redução do teor de água do centro para a periferia. A aproximação das partículas e de outros componentes do sistema submetido a grandes deslocamentos gera força restritiva ao fluxo devido à maior interação por embricamento das unidades móveis. Assim as forças de atrito preponderam nessa situação. A carga para o deslocamento máximo (8 mm) é maior no solo natural (1245 N) do que nas misturas solo-areia (651 N), solo-cal (535 N) e solo-CCA (392 N).

A Figura 35 apresenta os resultados da variação da tensão de escoamento com a umidade. Confirma-se a verificação de Melo (2014) de que a tensão de escoamento nos solos deve variar segundo a umidade e a coesão da amostra. O solo natural e as misturas apresentaram um comportamento em que os valores de tensão de escoamento diminuem com o aumento da umidade. Através de aproximações lineares é possível determinar a umidade que anula a tensão de escoamento, esse valor foi igual a 87,3 %.

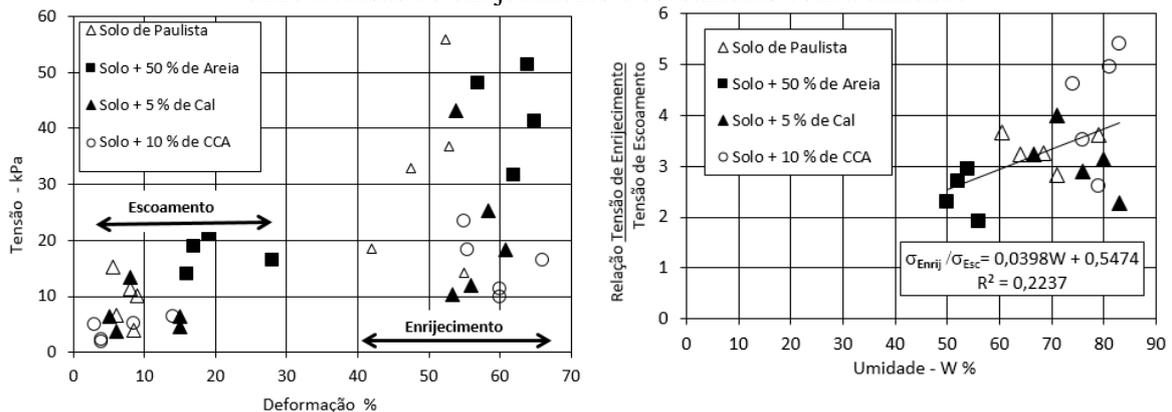
Figura 35 – Variação da tensão de escoamento com a umidade.



Fonte: a autora, 2020.

As deformações limites do escoamento elástico variam de 3% na mistura solo + 10% de CCA para 27,9 % da mistura solo + 50 % de areia (Figura 36a) com média de 10,95 %. As deformações iniciais do enrijecimento variam de 41,92% no solo argiloso a 66 % na mistura solo + 10 % CCA (Figura 36a) com média de 56,90%. A relação entre a tensão de enrijecimento e de escoamento é de 3,3 vezes, Figura 36b.

Figura 36 – Variação da tensão de escoamento e enrijecimento com a deformação e da relação entre a tensão de enrijecimento e escoamento com a umidade.



Fonte: a autora, 2020.

A Tabela 14 apresenta os valores das umidades antes e após a realização de cada ensaio. A umidade no final do ensaio foi determinada no centro e na periferia da amostra. A redução da umidade ocorre devido à expulsão da água, do centro para a periferia, ocasionada pela aplicação da carga. O maior valor médio percentual da migração da água do centro para a periferia, ao atingir o deslocamento máximo, é no solo (6,83%) e o menor no solo-CCA

(1,58%). Verifica-se que há uma perda de umidade por evaporação do início em relação a umidade final quer no centro ou periferia.

Tabela 14 – Valores das umidades inicial e final (no centro e na periferia das amostras) dos ensaios de squeeze-flow para solo natural, solo-areia, solo-cal e solo-CCA.

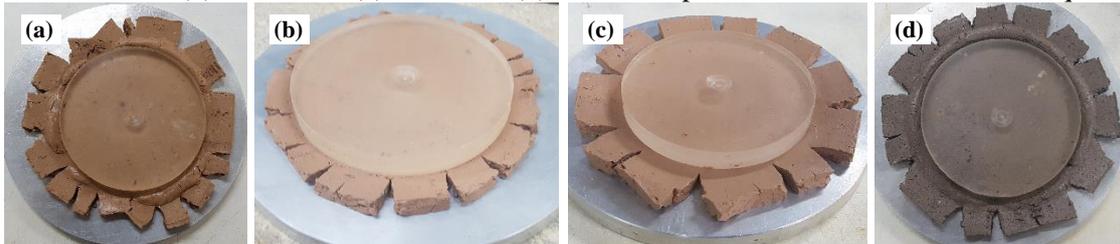
AMOSTRA	W <sub>inicial</sub> (%)	W <sub>final</sub> no centro da amostra (%)	W <sub>final</sub> na periferia da amostra (%)
Solo natural	21	20,1	20,4
	60,5	53,3	58,9
	64	58,3	60,6
	68,5	59,8	62,4
	71	61	66,2
	79	66,4	78,2
Solo-areia	22	21,6	22,3
	50	47,3	48
	52	48,7	50,1
	54	49,7	51,2
	56	51,6	53,2
Solo-cal	25	24	24,5
	66,5	64,7	65,3
	71	69,3	69,7
	76	71,5	75,3
	80	73,6	79,5
	83	77,3	82,3
Solo-CCA	30	29	29,3
	74	69,7	72,1
	76	73,7	74,8
	79	76,6	77,1
	81	79,7	80,5
	83	80,4	81,9

Fonte: a autora, 2020.

A Figura 37 mostra as formas dos corpos de prova após a realização do ensaio squeeze-flow para as umidades do limite de liquidez do solo natural, solo-areia, solo-cal e solo-CCA. A

forma se assemelha a flor *Zinnia angustifolia* Profusion Orange com números de pétalas variáveis, Figura 38. A mistura solo-cal apresenta 11 “pétalas” e as demais misturas e o solo natural 13. É essa mistura que apresenta maior limite de liquidez e índice de plasticidade em relação ao solo e as demais misturas favorecendo ao menor número de pétalas.

Figura 37 – Formas dos corpos de prova ao final do ensaio squeeze-flow para as amostras de (a) solo natural, (b) solo-areia, (c) solo-cal e (d) solo-CCA para as umidades do limite de liquidez.



Fonte: a autora, 2020.

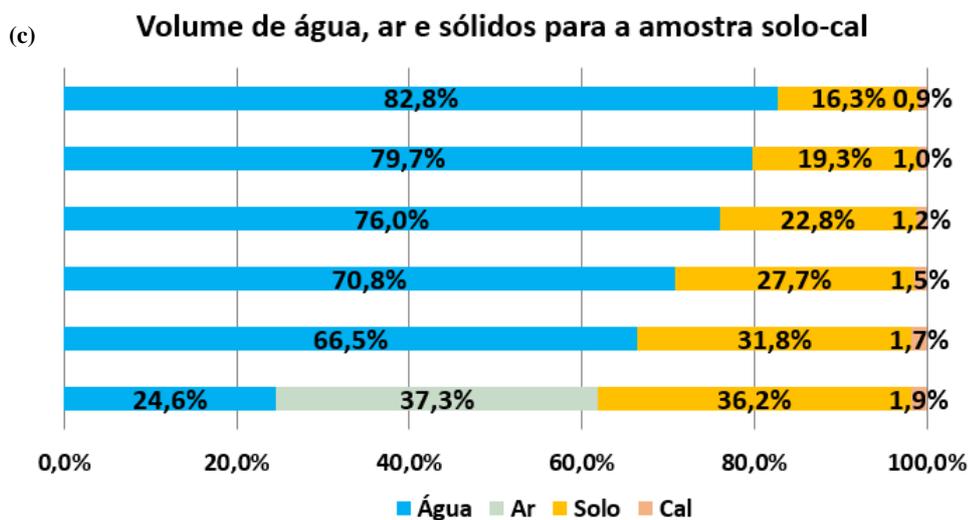
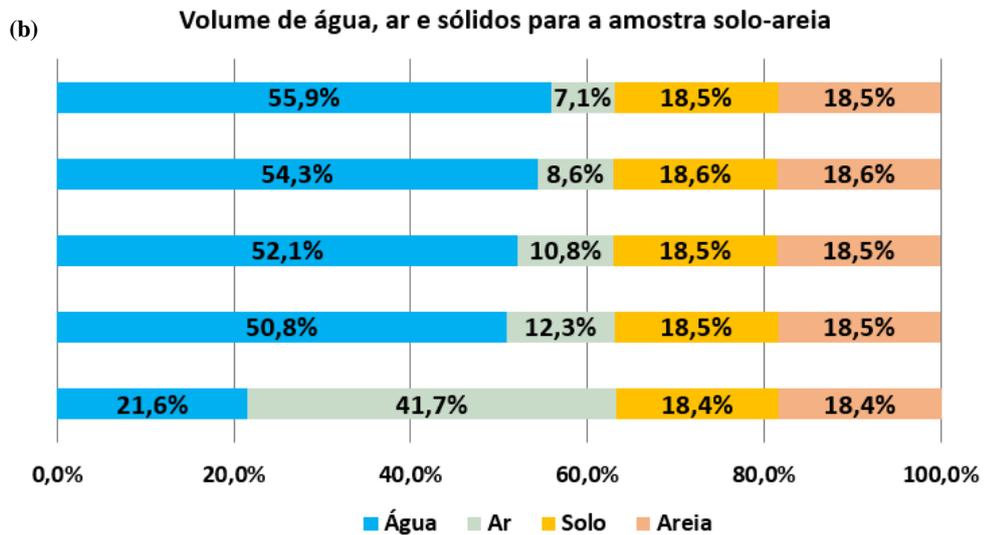
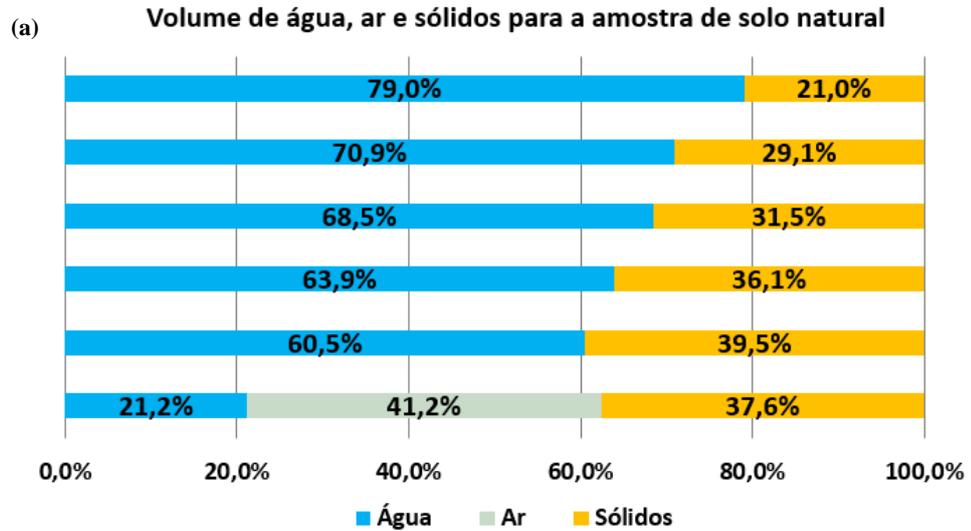
Figura 38 – *Zinnia angustifolia* Profusion Orange, um cultivar da série Profusion.



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Zinnia\\_angustifolia](https://pt.wikipedia.org/wiki/Zinnia_angustifolia) acesso em 28/12/2019.

Na Figura 39, são apresentados os valores percentuais em volume de água, ar e sólidos. Nas umidades superiores a 60%, as amostras encontram-se saturadas. Com isso, a interação entre as partículas sólidas é somente com a água. Nas umidades inferiores a esse valor, a amostra é não saturada e a interação é trifásica, apresentando maiores cargas para um mesmo deslocamento. Para um mesmo deslocamento a carga cresce quanto menor o índice de vazios, Figura 40.

Figura 39 – Percentual de água, ar e sólidos para as amostras de: (a) solo natural; (b) solo-areia; (c) solo-cal; (d) solo-CCA.



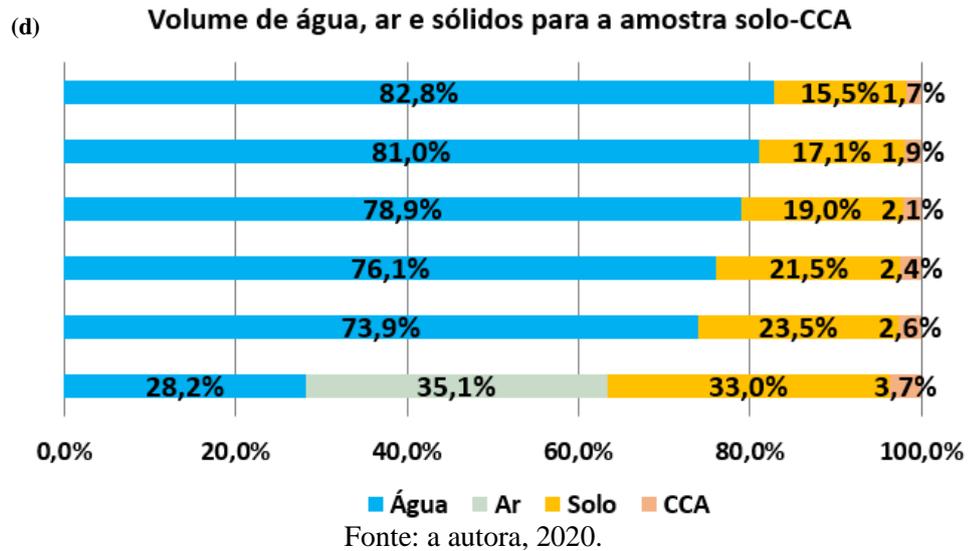
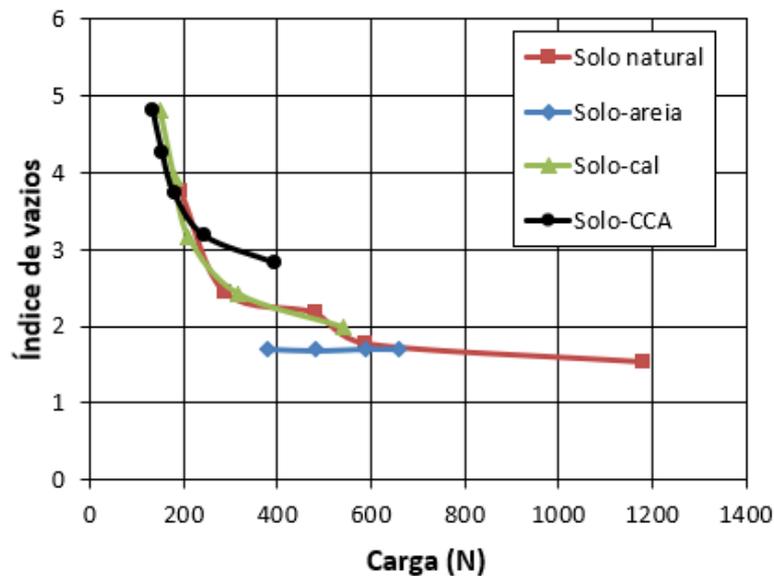


Figura 40 – Relação Carga máxima (para 8 mm de deslocamento) *versus* Índice de vazios no ensaio Squeeze-flow.

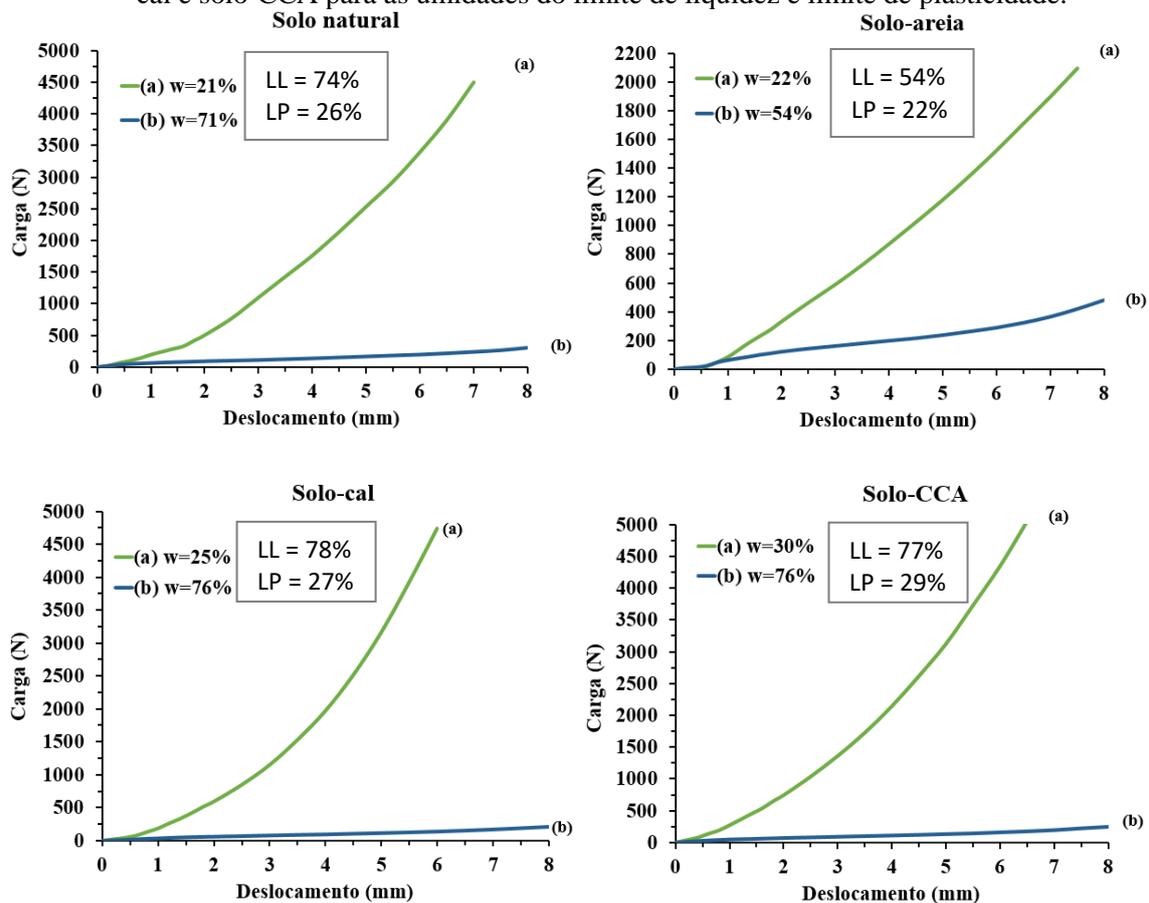


De acordo com Meschyan (1995), as propriedades reológicas de um solo argiloso podem variar consideravelmente dependendo de seu estado, que é determinado pela sua densidade, sua umidade e sua resistência.

A Figura 41 apresenta as curvas carga *versus* deslocamento correspondentes as umidades do ensaio do limite de plasticidade e limite de liquidez. As curvas das amostras com maiores umidades apresentam um maior deslocamento para determinada força aplicada. As curvas correspondentes ao limite de plasticidade apresentam apenas o Estágio III, enrijecimento por deformação, com um aumento significativo da carga necessária para dar continuidade a

deformação do material, conseqüentemente, as forças de atrito são predominantes nesse estágio. Observa-se que quanto menor o teor de água maior a viscosidade elongacional e mais difícil o espalhamento do material. A aproximação e o rearranjo das partículas geram forças restritivas ao fluxo. Não foi verificada nenhuma oscilação de carga, confirmando a homogeneidade das amostras. A variação de umidade altera as características reológicas modificando o perfil das curvas.

Figura 41 – Resultados dos ensaios de squeeze-flow para as amostras de solo natural, solo-areia, solo-cal e solo-CCA para as umidades do limite de liquidez e limite de plasticidade.



Fonte: a autora, 2020.

Para umidade próxima ao limite de plasticidade o maior valor da tensão de enrijecimento se verifica no solo natural e o menor na mistura do Solo + 50% de areia, Tabela 15. Nas misturas solo + 5 % de cal e solo + 10% de CCA o ensaio foi limitado pela carga máxima do deflectômetro e não pelo deslocamento de 8 mm.

Tabela 15 – Índices e dados do comportamento reológico do solo e das misturas no limite de plasticidade.

AMOSTRA	Índices e dados do comportamento reológico						
	Wi (%)	LP (%)	Q <sub>Enrij</sub> (N)	$\sigma_{Enrij}$ (kPa)	d <sub>Enrij</sub> (mm)	$\epsilon_{Enrij}$ (%)	Q <sub>Final</sub> (N)
Solo natural	21	26	550	70,06	2,15	21,5	4495
Solo-areia	22	22	100	12,74	1,00	10,0	2095
Solo-cal	25	27	336	42,80	1,40	14,0	4737*
Solo-CCA	30	29	452	57,58	1,40	14,0	5000*

Wi= umidade inicial; LP = Limite de Plasticidade, Q<sub>Enrij</sub>= carga inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III);  $\sigma_{Enrij}$ = tensão inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III); d<sub>Enrij</sub>= deslocamento inicial de enrijecimento (final Estágio. II e início III);  $\epsilon_{Enrij}$ = deformação inicial de enrijecimento (final Estágio II e início III); Q<sub>Final</sub>= carga para deslocamento de 8 mm ou limitada a capacidade máxima do anel de carga.

\* limitada a carga máxima do anel.

Fonte: a autora, 2020.

#### 4.3 PROCESSO DE FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO

Foi utilizado um programa de processamento de imagem de domínio público (ImageJ) para a obtenção de informações detalhadas sobre a mecânica de fissuração da amostra de solo. As fotos tiradas por meio de uma webcam foram processadas com esse software, obtendo vários índices para caracterização do padrão de fissuras: comprimento total das fissuras, largura média das fissuras, número de segmentos de fissuras e CIF.

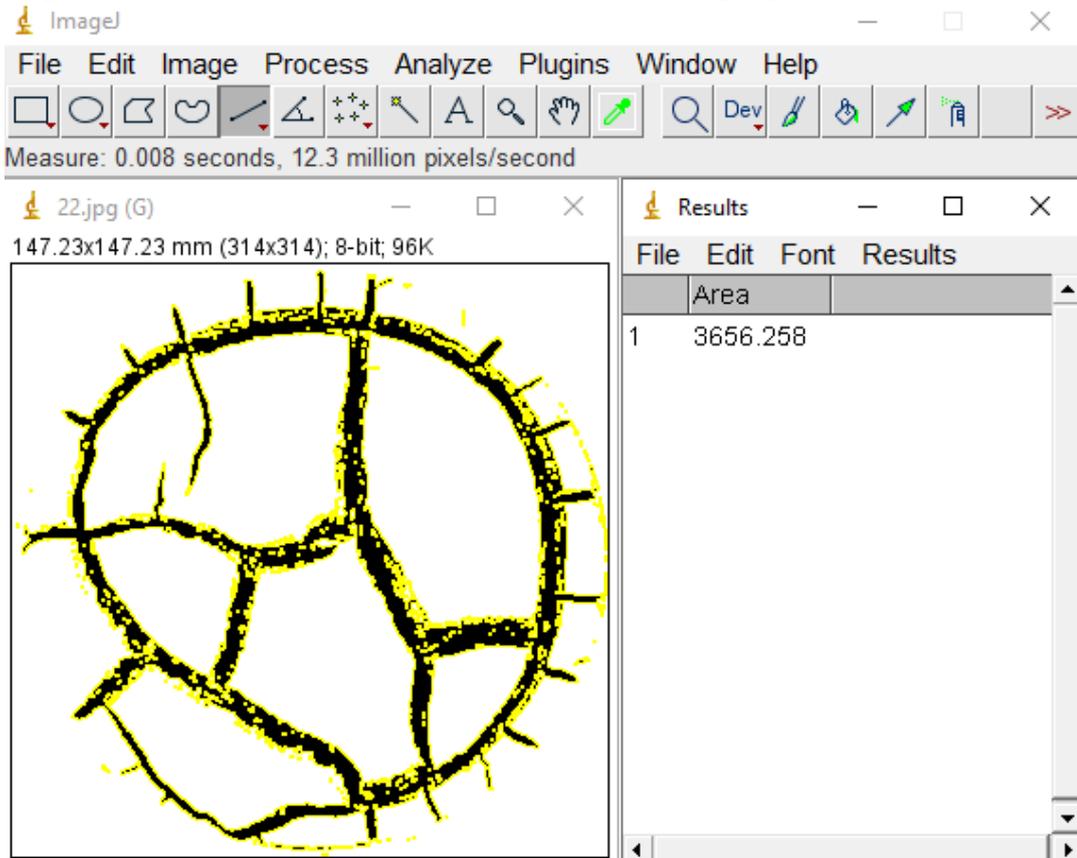
##### 4.3.1 Obtenção dos índices geométricos de fissuração no ImageJ

Após a seleção das imagens, é iniciado o procedimento de análise para obtenção dos diversos índices necessários para avaliação do processo de fissuração.

Inicialmente foi feita a calibração da escala de acordo com o diâmetro da placa Petri. Na barra de ferramentas utilizou-se a linha (*Straight*) para medir o diâmetro na imagem. Em seguida, no menu *Analyze* e com o comando *Set Scale* inseriu-se o valor do diâmetro em *Known distance*. A escala vai calcular automaticamente quantos pixels existem para cada unidade de medida na imagem.

A Figura 42 mostra a obtenção da área fissurada através do software ImageJ. Foi utilizado o comando *Create Selection* dentro do menu *Edit*, para que fosse selecionada toda a área fissurada, posteriormente selecionou o menu *Analyze* e *Measure* para calcular a área fissurada. Com a área fissurada é possível calcular o valor do CIF, que é a área fissurada dividida pela área inicial da amostra.

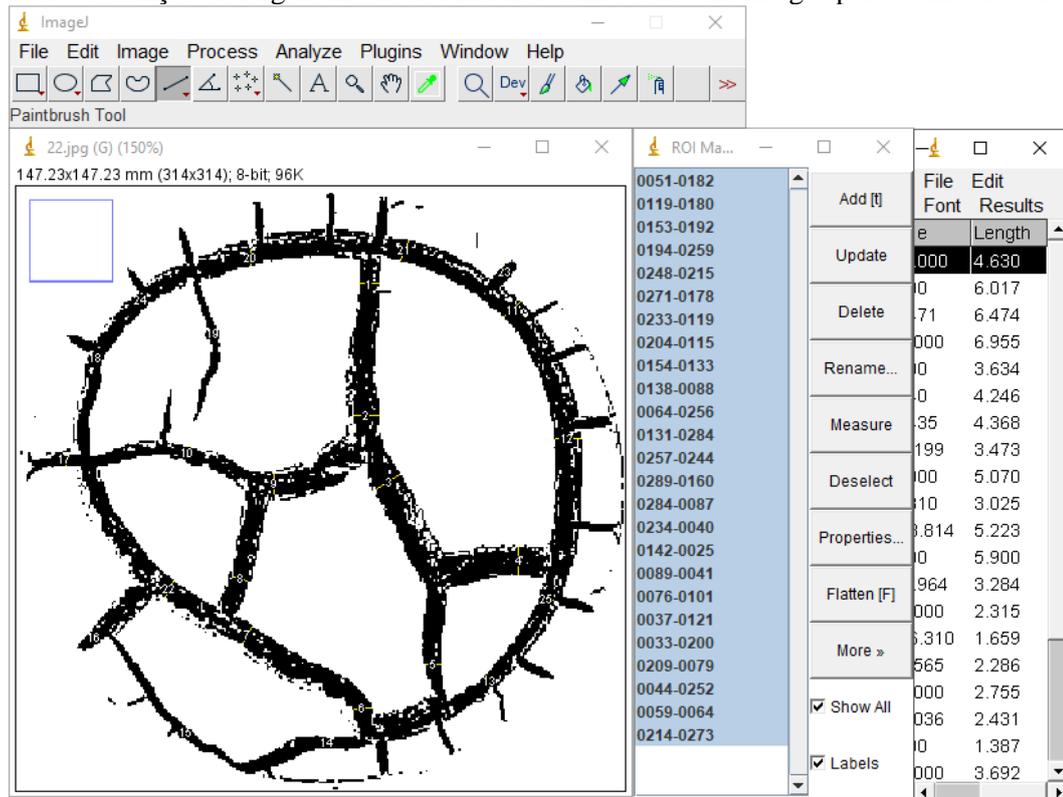
Figura 42 – Obtenção da área fissurada com o software ImageJ para a amostra solo-areia.



Fonte: a autora, 2020.

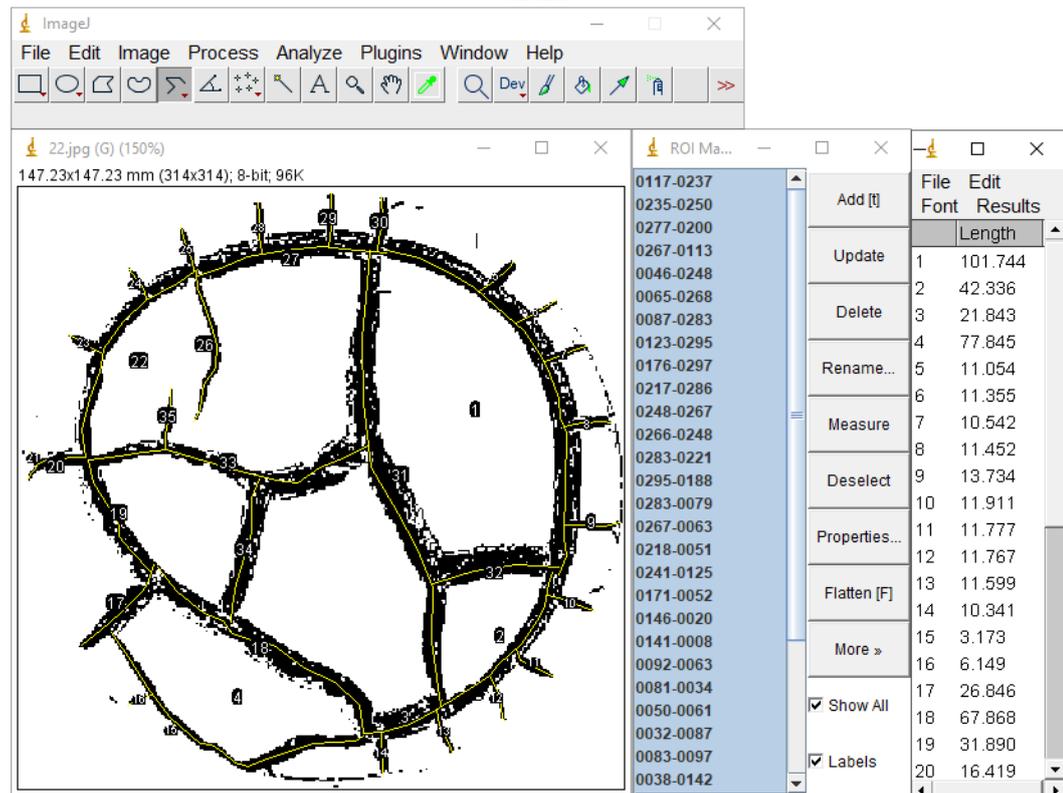
Para a obtenção da largura média das fissuras (Figura 43) e comprimento total das fissuras (Figura 44), foi utilizada a ferramenta *ROI Manager* no submenu *Tools* do menu *Analyze* para que fosse possível desenhar várias linhas na mesma imagem. Foram adicionados 25 segmentos de linha na imagem e depois calculou-se os comprimentos dessas linhas e com a média desses valores obteve-se a largura média das fissuras. Para o comprimento total das fissuras, foram desenhadas linhas até representar todo o comprimento das fissuras e depois calculado o valor do comprimento dessas linhas e somado esses valores.

Figura 43 – Obtenção da largura média das fissuras com o software ImageJ para a amostra solo-areia.



Fonte: a autora, 2020.

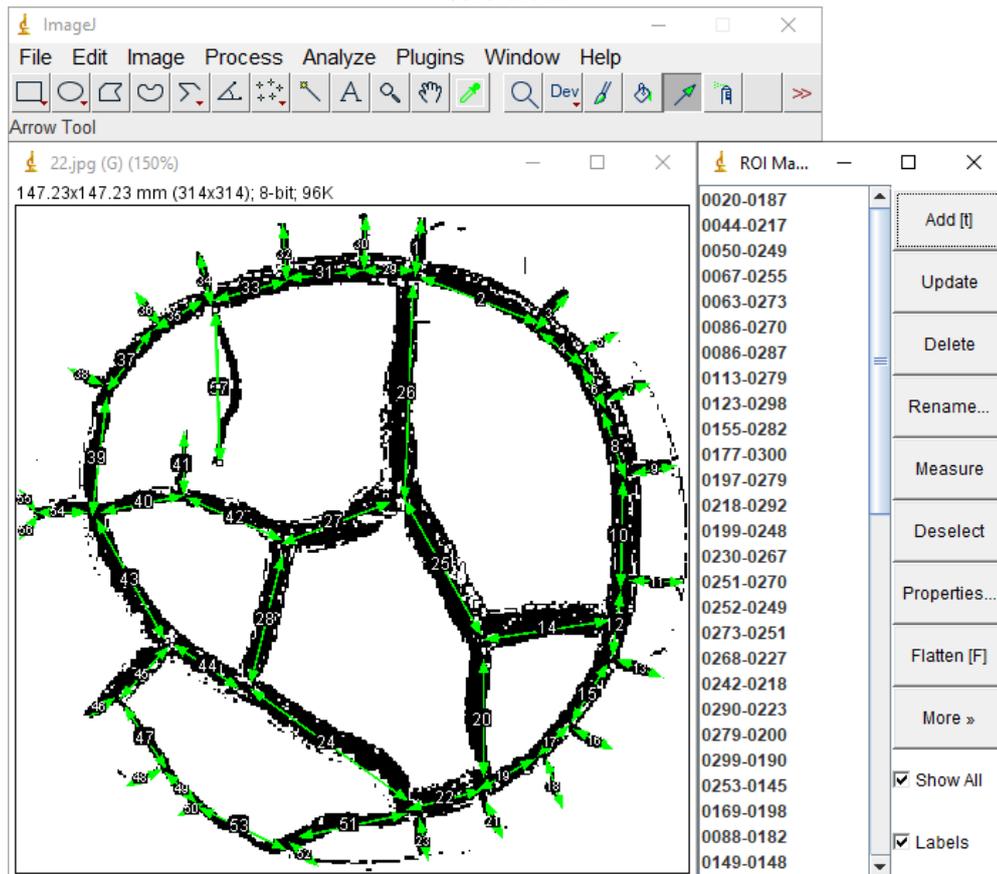
Figura 44 – Obtenção do comprimento total das fissuras com o software ImageJ para a amostra solo-areia.



Fonte: a autora, 2020.

A Figura 45 mostra a obtenção do número de segmentos de fissuras. Novamente foi utilizada a ferramenta *ROI Manager* para desenhar várias setas na imagem. Cada seta desenhada representa um segmento de fissura. Com o valor final da quantidade de setas desenhadas foi possível obter o número de segmentos de fissuras para cada imagem.

Figura 45 – Obtenção do número de segmentos de fissuras com o software ImageJ para a amostra solo-areia.



Fonte: a autora, 2020.

#### 4.3.2 Tempo para surgimento das primeiras fissuras

A primeira fissura inicia num determinado valor de umidade em que as tensões de tração prevalecem por tempo suficiente para provocar o surgimento da fissura. A partir das fotografias, observou-se que em um determinado estágio do processo de secagem, nenhuma fissura foi propagada ou iniciada. Este ponto ocorre quando um aumento adicional das tensões de tração não provoca o aparecimento de novas fissuras nem a propagação de fissuras já existentes.

O tempo decorrido para o aparecimento inicial das fissuras e da umidade inicial do processo de fissuração depende de vários fatores como umidade inicial, temperatura e umidade relativa do ar, heterogeneidade e mineralogia (ALBRECHT E BENSON, 2011; NAHLAWI E

KODIKARA, 2006; TANG et al., 2010). Os valores de densidade real dos grãos ( $\gamma_d$ ) e umidade inicial ( $W_i$ ) tomados para preparação e moldagem das amostras são mostrados na Tabela 16. Podem ser vistos ainda os valores correspondentes ao tempo para o surgimento das primeiras fissuras ( $T_{fi}$ ), a umidade da amostra no momento inicial da fissuração ( $W_{fi}$ ) e a relação percentual de perda de umidade entre a umidade de fissuração e a umidade inicial da amostra. No solo natural a  $W_i$  foi próxima ao LL, na mistura solo-areia próxima a 2 vezes a umidade do LL da mistura, e nas misturas solo-cal e solo-CCA a umidade inicial foi próxima a 1,5 do LL dessas misturas. A Figura 46 apresenta as imagens das primeiras fissuras para cada uma das amostras ensaiadas. As imagens mostram que as fissuras iniciais das amostras solo-areia, solo-cal e solo-CCA surgiram mais próximas as bordas da placa Petri.

Tabela 16 – Umidade das amostras no momento do início das primeiras fissuras.

AMOSTRA	$W_i$ (%)	LL (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$T_{fi}$ (h)	$W_{fi}$ (%)	$(W_i - W_{fi})/W_i$ (%)
Solo natural*	76,1	74	26,81	4,8	69,9	8,1
Solo-areia	107,6	54	26,67	22,17	43,3	59,8
Solo-cal	115,5	78	25,84	6,17	100,3	13,2
Solo-CCA	108,9	77	25,64	8,17	85,3	21,7

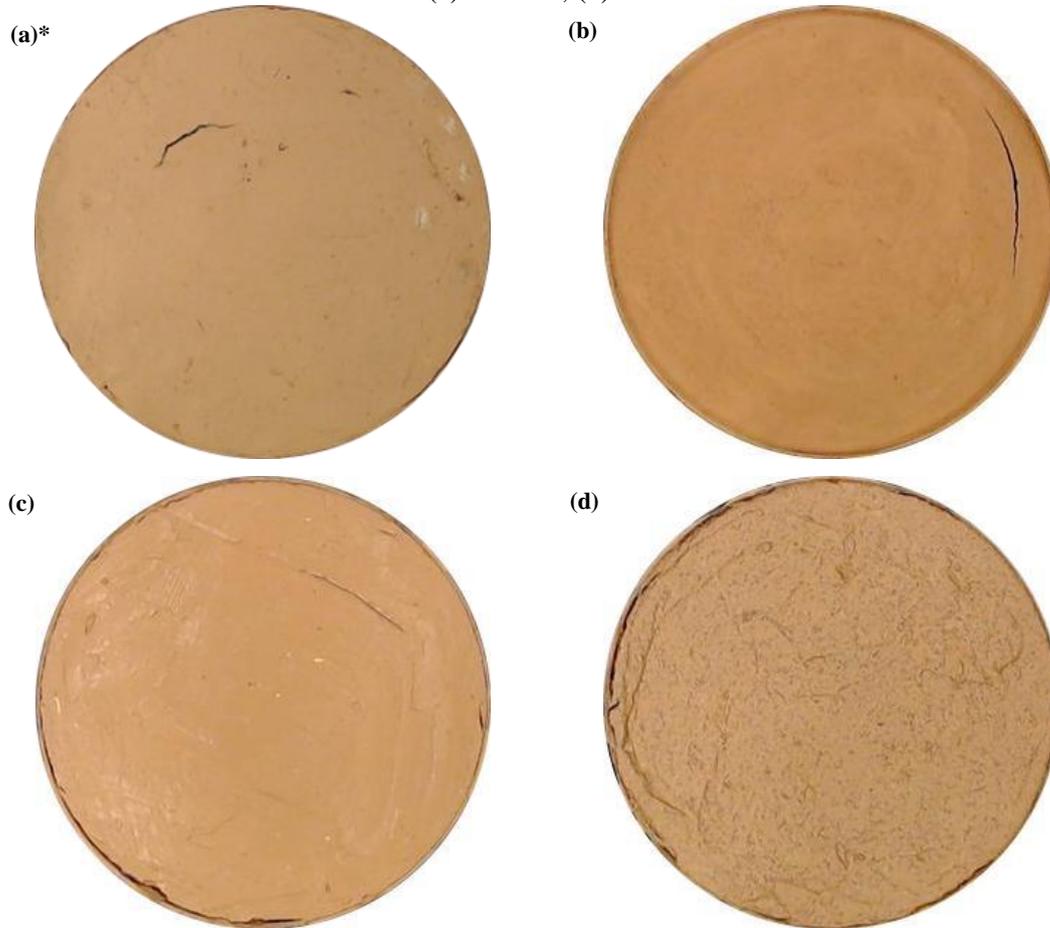
Fonte: a autora, 2020.

\* Barbosa (2019);  $W_i$  - Umidade inicial do ensaio, LL – Limite de liquidez,  $\gamma_d$  - Peso específico real dos grãos,  $T_{fi}$  (h) - Tempo para surgir as primeiras fissuras,  $W_{fi}$  - umidade no início da fissuração.

Observa-se que a amostra de solo natural fissurou para o menor tempo de ensaio (4 horas e 48 min), seguida pela amostra solo-cal, fissurada após 6 horas e 10 min, em seguida aparece a amostra solo-CCA fissurada após 8 horas e 10 minutos, por último a amostra solo-areia levou 22 horas e 10 min para que as primeiras fissuras visíveis surgissem na superfície da amostra.

A amostra de solo-areia foi a que perdeu mais umidade antes do surgimento das primeiras fissuras, 59,8% em relação à umidade inicial. Já o solo natural, fissurou com apenas 8,1 % de perda de umidade. As amostras de solo com menor teor de areia iniciam a fissuração com maior teor de água. O valor da umidade inicial (no caso estudado, o quanto está acima do limite de liquidez) influencia no tempo para surgir as primeiras fissuras,  $T_{fi}$  (h), e na umidade no início da fissuração  $W_{fi}$ .

Figura 46 – Primeiras fissuras nas amostras ensaiadas: (a) solo natural de Paulista-PE; (b) solo-areia; (c) solo-cal; (d) solo-CCA.



\*Barbosa (2019).

Fonte: a autora, 2020.

### 4.3.3 Análise da propagação de fissuras

Foram selecionadas imagens para avaliar a evolução das fissuras e a determinação do CIF e demais índices ao longo da secagem das amostras. Observou-se que em todos os ensaios houve mudança na cor do solo úmido para a cor do solo após secagem, no final dos ensaios (através da análise das fotografias). Nenhuma mudança significativa de cor ocorreu nos estágios iniciais de secagem. Isto indicou que a perda de umidade era uniforme sobre a superfície da amostra no estado inicial de secagem. Analisando as imagens dos ensaios com amostras de solo com adição de areia, cal e CCA, percebe-se que as fissuras seguem um padrão diferente para cada material adicionado ao solo.

#### 4.3.3.1 Análise da propagação de fissuras na mistura solo-areia

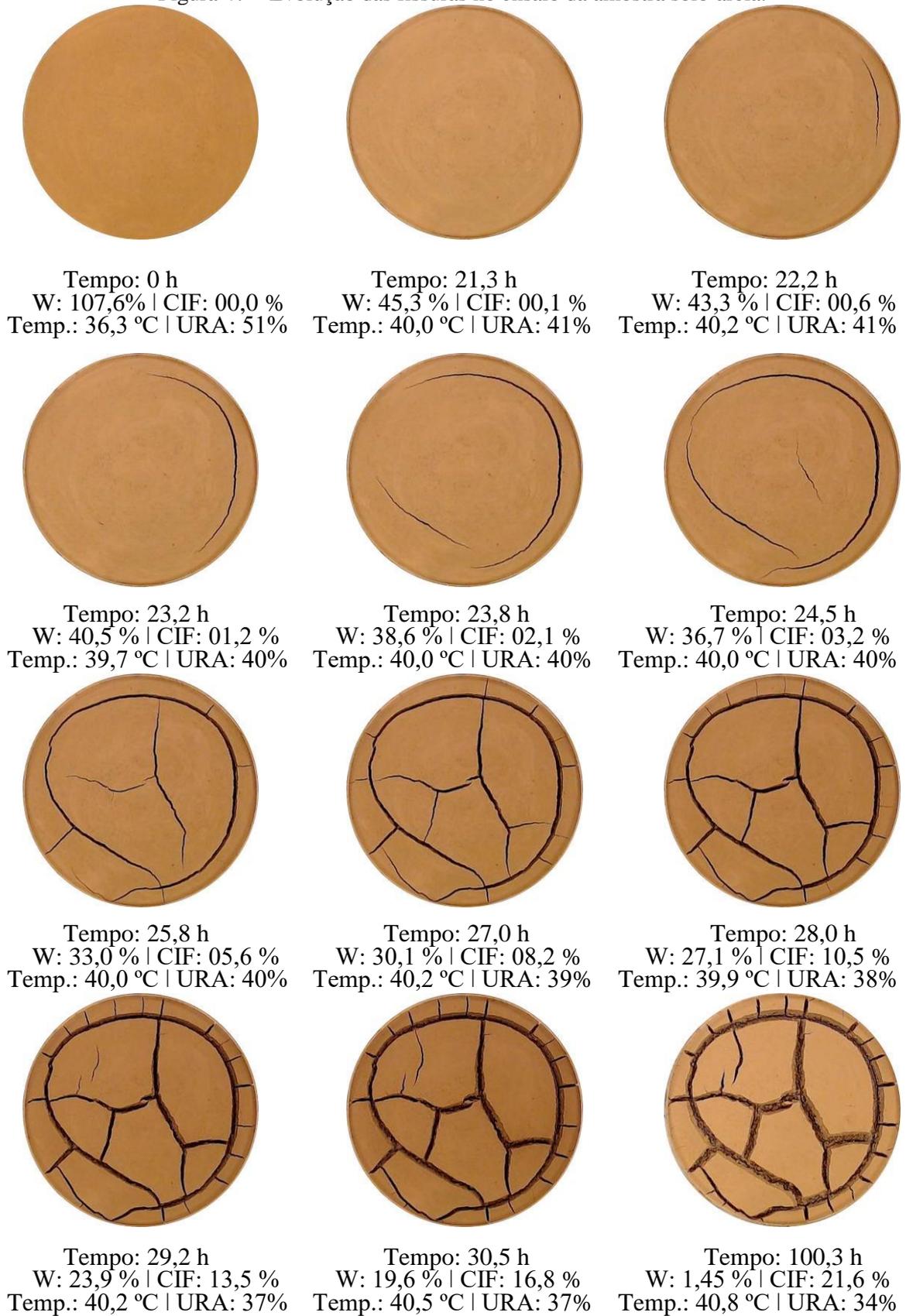
A umidade inicial do ensaio solo-areia é de 107,6 % (correspondente a 2 vezes o limite de liquidez) e índice de vazios de 2,98. A sequência de imagens da Figura 47 mostra o aparecimento e evolução das fissuras ao longo de aproximadamente 100 horas de ensaio. Este ensaio teve o surgimento de fissuras com direcionamento da borda para o centro, a partir da contração do solo. Considerando que o ensaio teve duração de 100,3 horas, que as primeiras fissuras apareceram a 22,2 horas e que após 30,5 horas de observação praticamente não se observa mais desenvolvimento de fissuras, o processo de fissuração teve duração de 8,3 horas.

À medida que a umidade do solo foi reduzindo, ocorreu contração e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo. De modo geral, uma fissura secundária tem origem em uma fissura primária, mostrando o formato “T” ou “Y”, semelhante ao encontrado por Tang et al., 2011b. A Figura 48, apresenta as curvas Tempo *versus* Umidade em escala aritmética e logarítmica, a variação da Temperatura e Umidade Relativa do Ar com o tempo, CIF *versus* Umidade e evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração (CIF, comprimento total das fissuras, largura média das fissuras, número de segmentos de fissuras e área fissurada).

Na curva Tempo *versus* Umidade, Figuras 48a, são visíveis três trechos equivalentes a diferentes taxas de perda de umidade ao longo do tempo. O primeiro trecho inicia-se com o ensaio e vai até 36,8 h, apresentando uma taxa de perda de umidade de 2,8 % /h. O segundo trecho tem início no fim do primeiro trecho e vai até 40,5 h de ensaio, apresentando uma taxa de perda de umidade de 0,7 % /h. Já o último trecho, tem início no fim do segundo trecho e vai até 100,3 h, apresentando taxa de perda de umidade de 0,02 % /h. Esse último trecho representa a umidade residual. A temperatura média é de  $39,8 \pm 0,97$  °C, com o coeficiente de variação de 0,02. A umidade relativa do ar média foi de  $39,6 \pm 3,76$  %, com o coeficiente de variação de 0,10, Figura 48c.

Na Figura 48d, curva CIF *versus* Umidade, pode-se observar um aumento não linear do CIF com a perda de umidade, após 22 % de umidade o CIF tem uma tendência de estabilização e apresenta decréscimo próximo ao fim do ensaio, quando a umidade atinge 2,5 %.

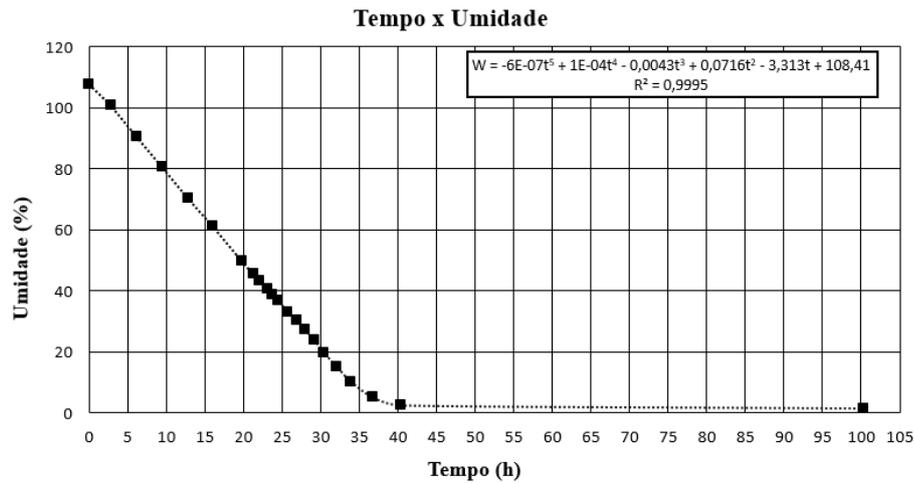
Figura 47 – Evolução das fissuras no ensaio da amostra solo-areia.



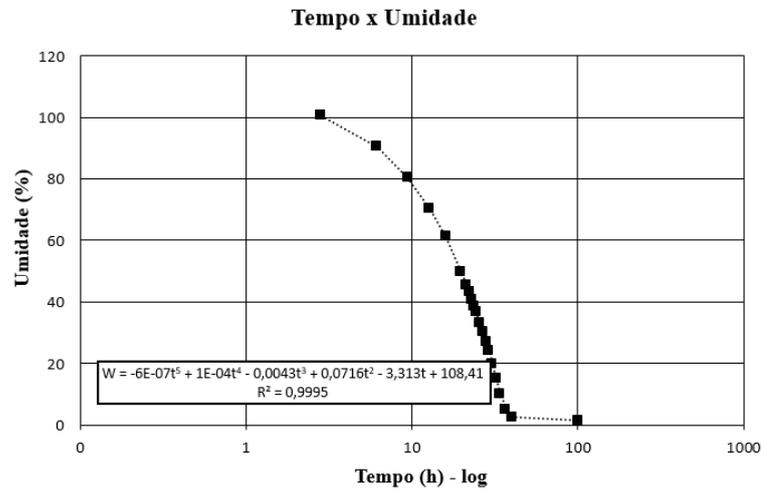
Fonte: a autora, 2020.

A Figura 48e mostra a variação do CIF, comprimento total das fissuras, largura média das fissuras, número de segmentos de fissuras e área fissurada com a diminuição do teor de água. Esses índices aumentaram substancialmente com a diminuição da umidade e depois diminuíram. Comportamento semelhante foi encontrado por Harianto et al. (2008), Rafizul e Data (2018), Tang et al. (2019) e Ferreira et al. (2019).

Figura 48 – Resultados do ensaio da amostra solo-areia.

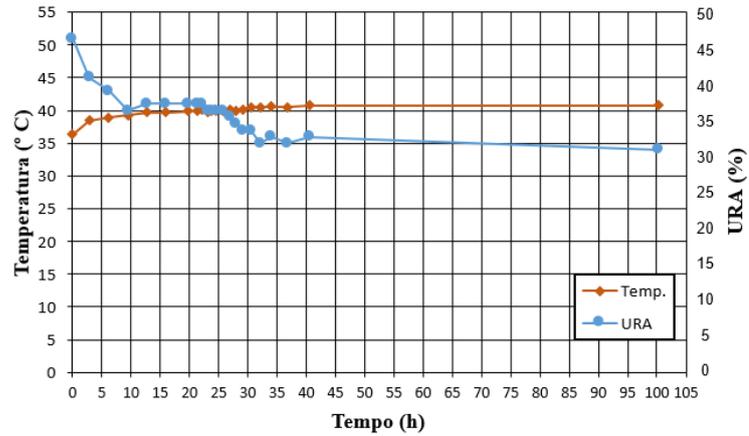


a) Curva Tempo *versus* Umidade



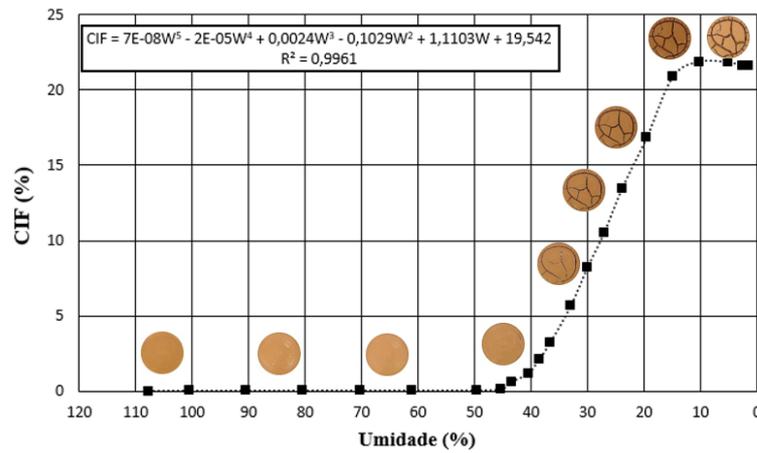
b) Curva Tempo *versus* Umidade (escala Log.)

Tempo x Temperatura e URA

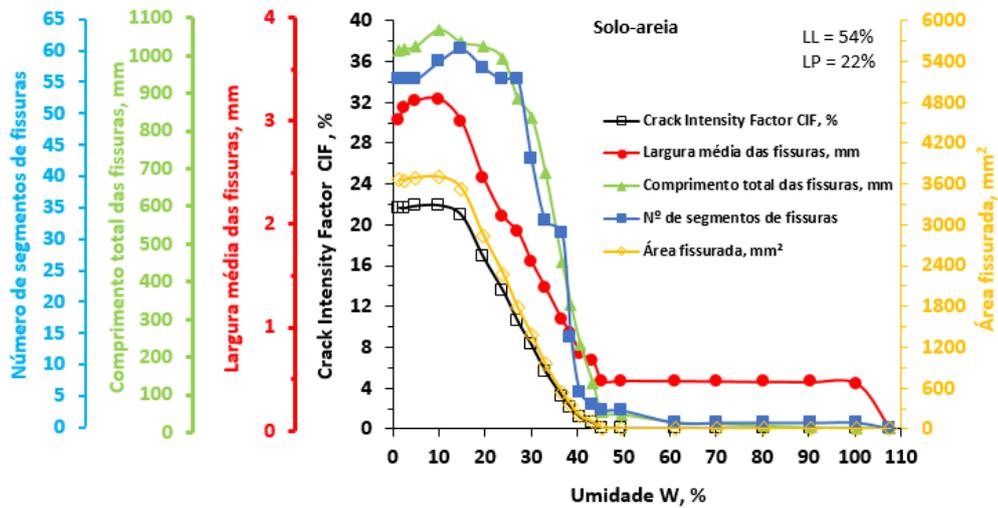


c) Curva Temperatura e Umidade Relativa do Ar versus Tempo

Umidade x CIF



d) Curva CIF versus Umidade



e) Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração

Fonte: a autora, 2020.

#### 4.3.3.2 Análise da propagação de fissuras na mistura solo-cal

A umidade inicial da mistura solo-cal é de 115,5 % (próximo a 1,50 do limite de liquidez) e índice de vazios de 3,03. A sequência de imagens da Figura 49 mostra o desenvolvimento das fissuras ao longo de aproximadamente 100,2 horas de ensaio. Observa-se que o processo inicial de fissuração ocorre de forma diferente em relação a mistura solo-areia embora ocorra contração nas bordas, como a mistura solo-areia, há o aparecimento de fissuras no interior da mistura que se propagam para a periferia por meio de fissuras primárias e secundárias. Considerando que o ensaio teve duração de 100 horas, que as primeiras fissuras apareceram a 6,17 horas e que após 43,20 horas de observação praticamente não se observa mais desenvolvimento de fissuras, o processo de fissuração teve duração de 37,03 horas.

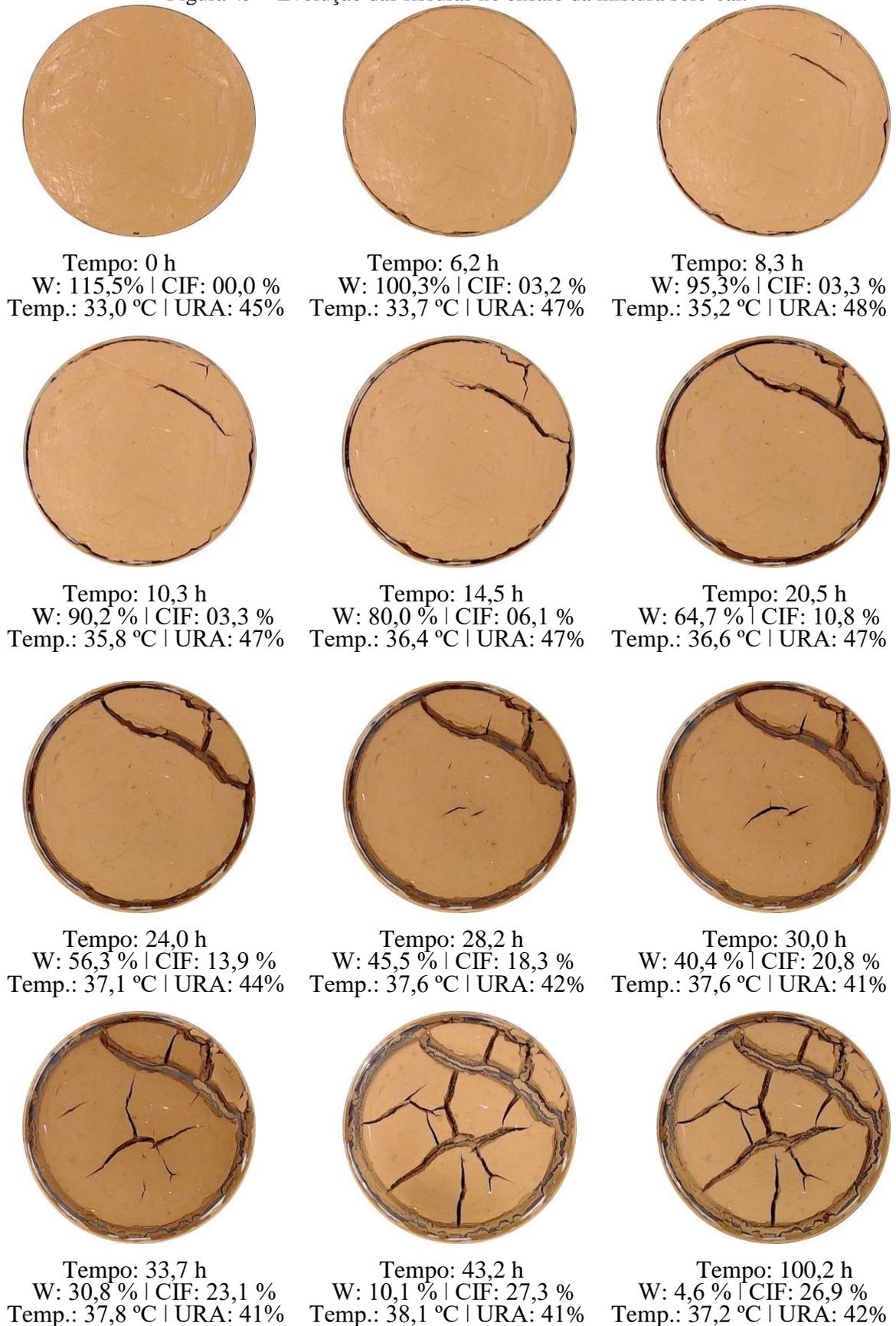
A Figura 50 apresenta as curvas Tempo *versus* Umidade em escala aritmética e logarítmica, a variação da Temperatura e Umidade Relativa do Ar com o tempo, CIF *versus* Umidade e evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração. Na curva Tempo *versus* Umidade, Figura 50a, são visíveis três trechos equivalentes a diferentes taxas de dessecação ao longo do tempo. O primeiro trecho inicia-se com o ensaio e vai até 43,2 h, apresentando uma taxa de perda de umidade de 2,4 % / h. O segundo trecho tem início no fim do primeiro trecho e vai até 53,3 h de ensaio, apresentando uma taxa de perda de umidade de 0,5 % / h. Já o último trecho, tem início no fim do segundo trecho e vai até 100,2 h, apresentando taxa de perda de umidade de 0,01 % / h. No último trecho tem a representação da umidade residual.

A temperatura apresenta média de  $36,5 \pm 1,70$  °C, com o coeficiente de variação de 0,05. A umidade relativa do ar média é de  $43,8 \pm 2,73$  %, com o coeficiente de variação de 0,06, Figura 50c.

A curva CIF *versus* Umidade é mostrada na Figura 50d, pode-se observar um aumento gradual e não linear do CIF com a perda de umidade. No final do ensaio, com umidade igual a 4,6 %, nota-se uma diminuição do valor do CIF.

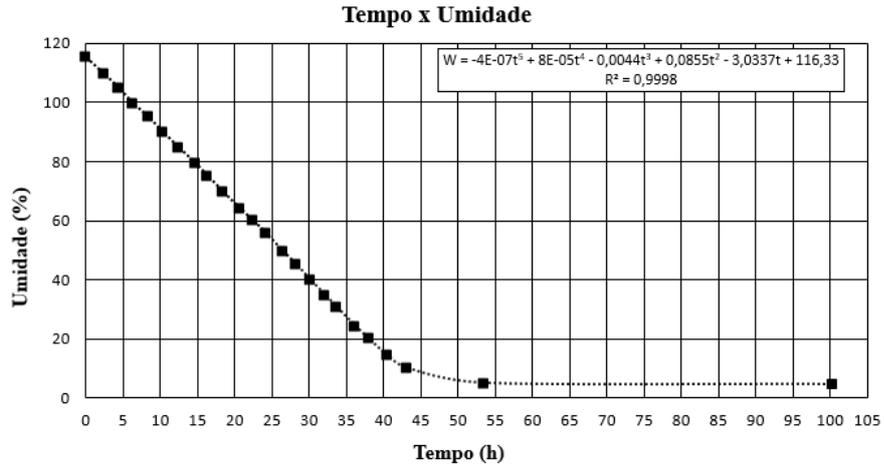
A Figura 50e mostra a variação dos diversos índices geométricos com a diminuição do teor de água. Esses índices aumentaram com a diminuição da umidade e posteriormente diminuíram. Comportamento similar a mistura solo-areia e aos resultados encontrados por Harianto et al. (2008), Rafizul e Data (2018), Tang et al. (2019) e Ferreira et al. (2019).

Figura 49 – Evolução das fissuras no ensaio da mistura solo-cal.

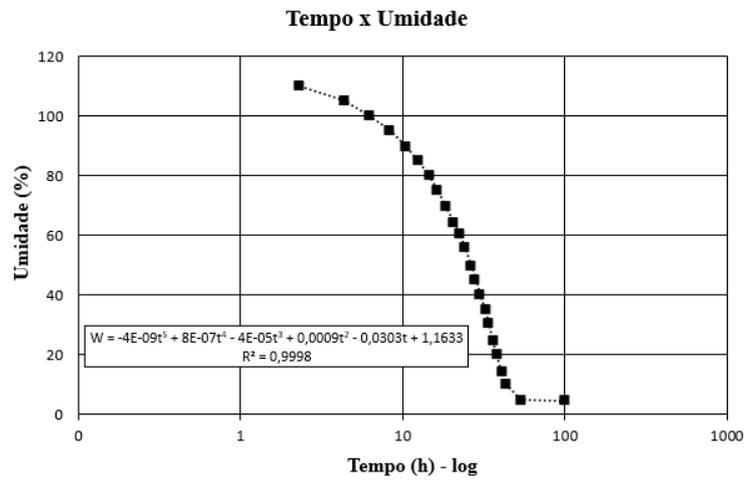


Fonte: a autora, 2020.

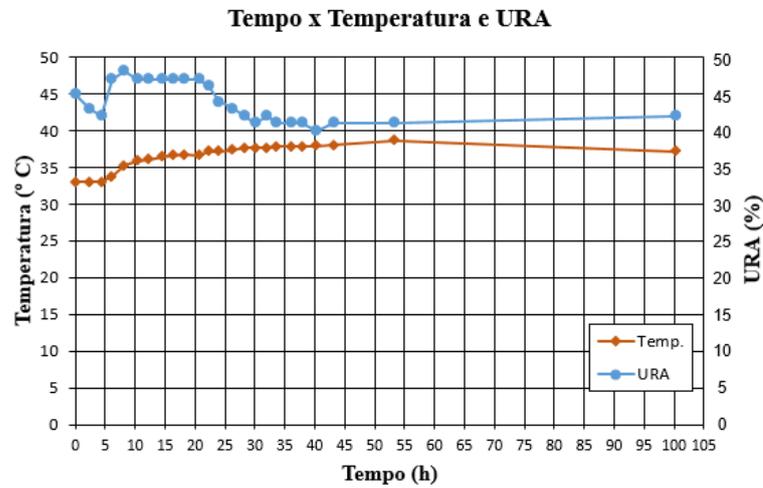
Figura 50 – Resultados do ensaio da amostra solo-cal.



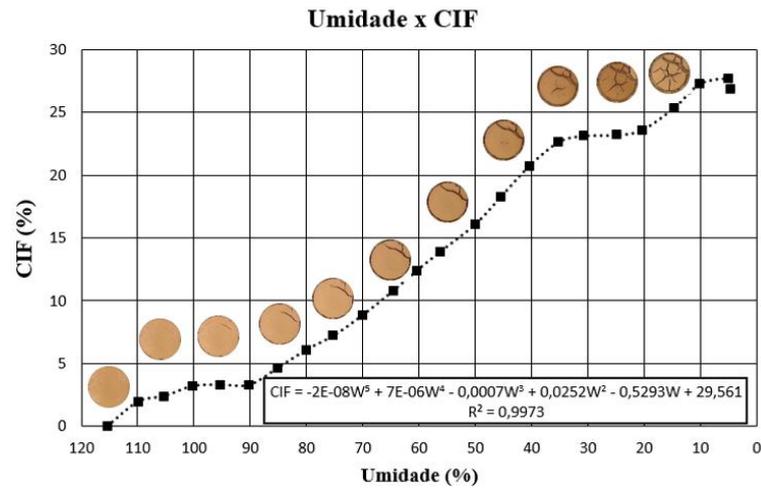
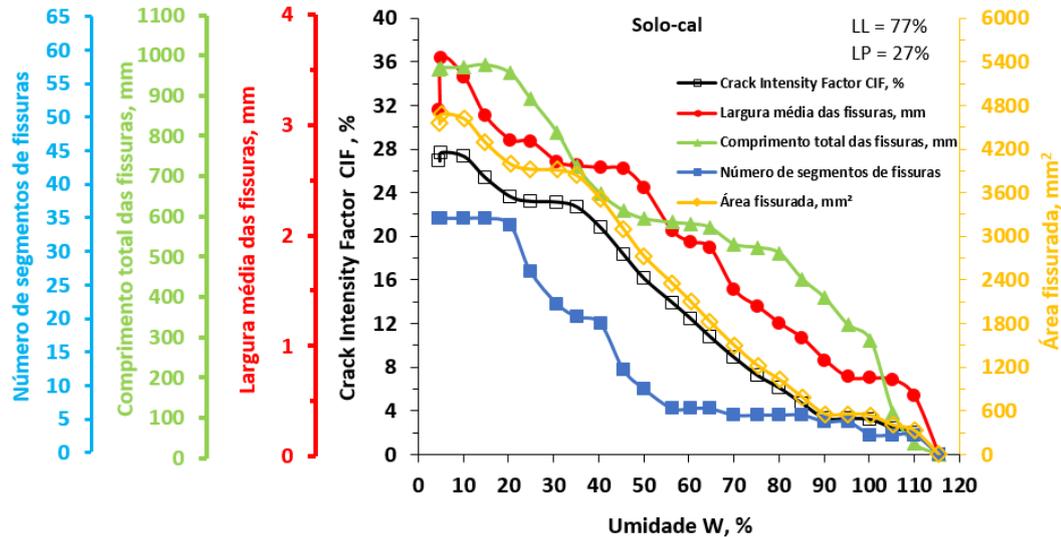
a) Curva Tempo *versus* Umidade



b) Curva Tempo *versus* Umidade (escala Log.)



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

d) Curva CIF *versus* Umidadee) Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração  
Fonte: a autora, 2020.

#### 4.3.3.3 Análise da propagação de fissuras na mistura solo-CCA

A umidade inicial do ensaio solo-CCA foi de 108,9 % (equivalente a 1,50 do limite de liquidez) e índice de vazios de 2,90. A sequência de imagens da Figura 51 mostra o aparecimento e evolução das fissuras ao longo de aproximadamente 117,5 horas de ensaio. O ensaio teve duração de 117,5 horas, as primeiras fissuras apareceram a 8,2 horas e que após 35,0 horas de observação praticamente não se observa mais desenvolvimento de fissuras, o processo de fissuração teve duração de 26,8 horas.

As imagens mostram uma grande contração da amostra antes de iniciar a formação das fissuras. O padrão das fissuras não ocorreu de maneira ortogonal. As formas da interseção das fissuras são predominantemente em formato “Y”.

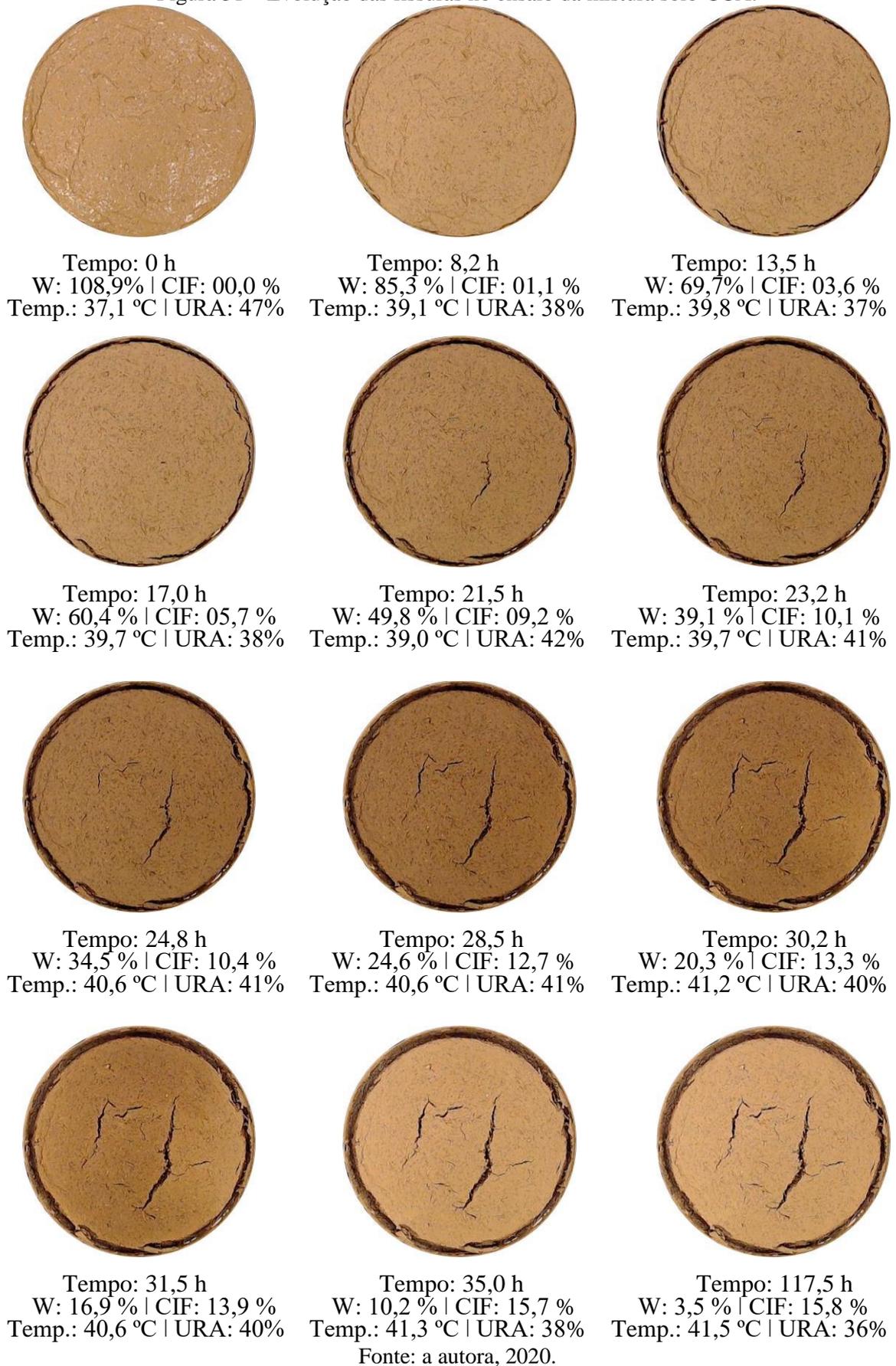
A amostra solo-CCA apresenta os menores valores de CIF, demonstrando que a adição da cinza não impediu o surgimento de fissuras, mas reduziu a propagação ao longo do processo de ressecamento.

Os resultados do ensaio da mistura solo-CCA são mostrados na Figura 52. Na curva Umidade *versus* Tempo, Figura 52a, são visíveis três trechos equivalentes a diferentes taxas de perda de umidade ao longo do tempo. O primeiro trecho inicia-se com o ensaio e vai até 21,5 h, apresentando uma taxa de perda de umidade de 2,7 % / h. O segundo trecho tem início no fim do primeiro trecho e vai até 41,5 h de ensaio, apresentando uma taxa de perda de umidade de 2,2 % / h. Já o último trecho, tem início no fim do segundo trecho e vai até 117,5 h, apresentando taxa de perda de umidade de 0,02 % / h. Esse último trecho representa a umidade residual. A Figura 52c apresenta a curva temperatura e umidade relativa do ar *versus* tempo. A temperatura apresenta média de  $39,8 \pm 1,27$  °C, com o coeficiente de variação de 0,03. A umidade relativa do ar média é de  $39,5 \pm 2,60$  %, com o coeficiente de variação de 0,07.

Neste ensaio a perda de umidade proporcionou inicialmente a contração da amostra e posteriormente o surgimento das primeiras fissuras. O CIF apresentou crescimento nas primeiras 35 h de ensaio, após isso manteve-se praticamente constante e apresentou uma pequena queda no final, atingindo o valor de 15,8 % após 117 h da realização do ensaio. A Figura 52d mostra o valor final do CIF igual a 15,8 %, com umidade final do ensaio de 3,5 %.

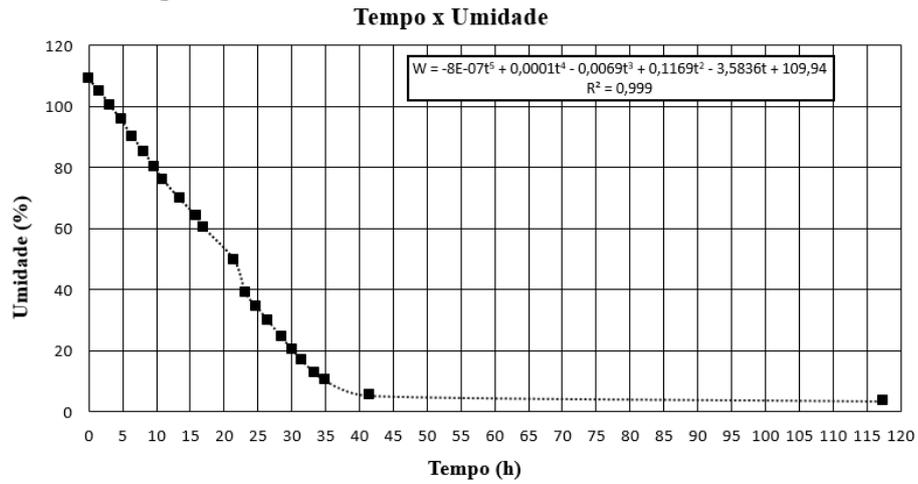
A Figura 52e mostra a variação de vários índices geométricos (CIF, largura média das fissuras, comprimento total da fissura, número de segmentos de fissuras e área fissurada) com a diminuição do teor de água. Observou-se um aumento desses índices com a diminuição da umidade e posteriormente apresentaram diminuição com o fim do ensaio. Comportamento semelhante a mistura solo-areia, solo-cal e aos resultados encontrados por Harianto et al. (2008), Rafizul e Data (2018), Tang et al. (2019) e Ferreira et al. (2019).

Figura 51 – Evolução das fissuras no ensaio da mistura solo-CCA.

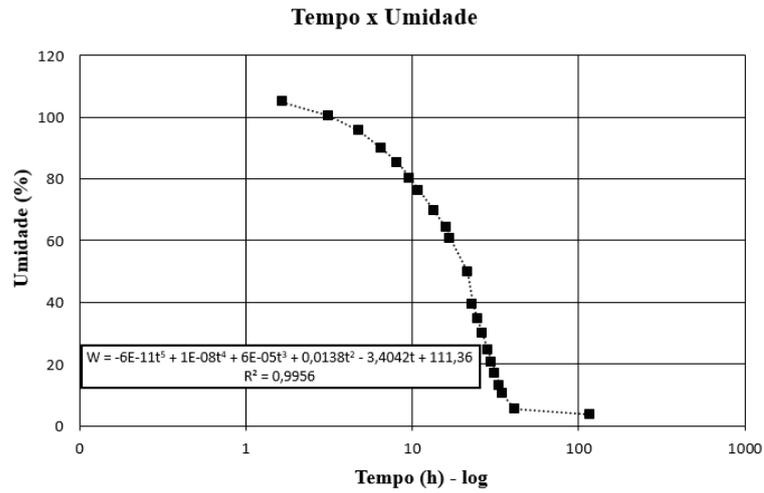


Fonte: a autora, 2020.

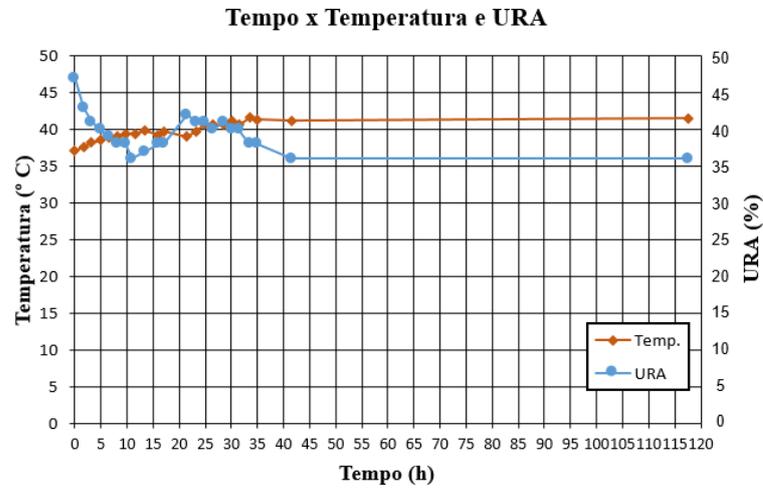
Figura 52 – Resultados do ensaio da amostra solo-CCA.



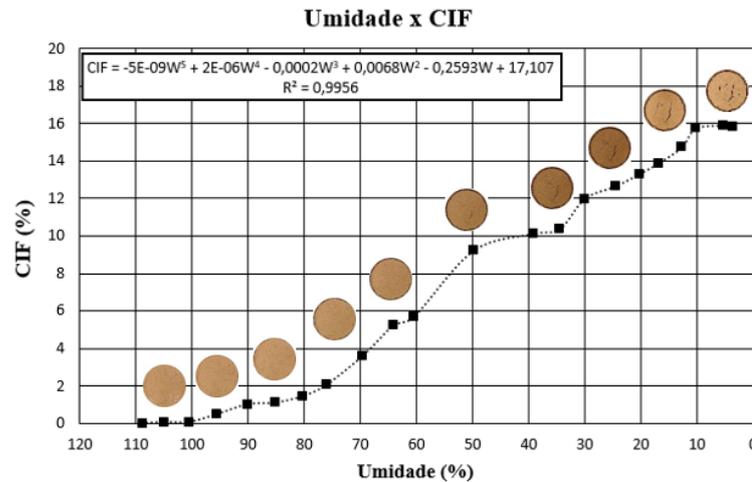
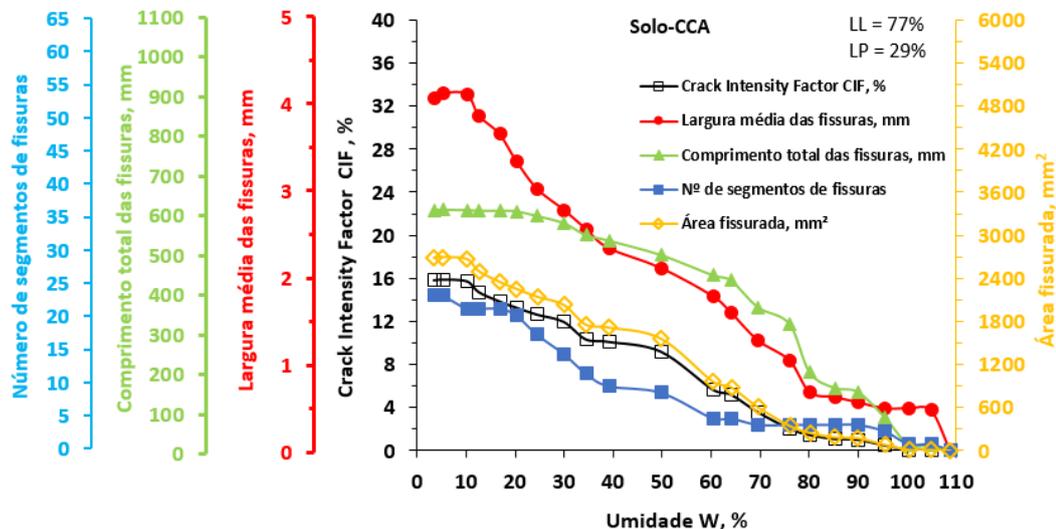
a) Curva Tempo *versus* Umidade



b) Curva Tempo *versus* Umidade (escala Log.)



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

d) Curva CIF *versus* Umidade

e) Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração

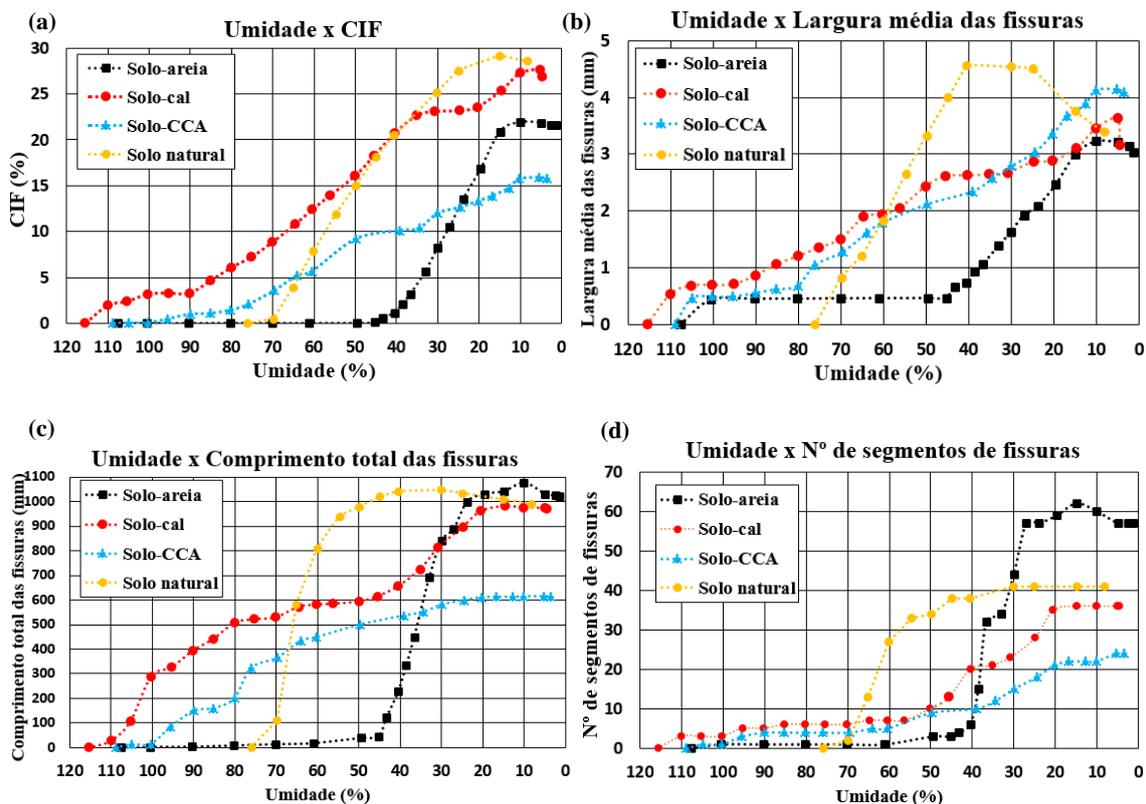
Fonte: a autora, 2020.

#### 4.3.3.4 Comparação do processo de propagação de fissuras no solo e nas misturas solo-areia, solo-cal e solo-CCA

Durante o ressecamento, o CIF da amostra de solo natural foi superior ao CIF das amostras com misturas. O valor final do CIF foi reduzido em cerca de 23,1% para a mistura solo-areia, 4,3% para a mistura solo-cal e 43,8% para a mistura solo-CCA. Os resultados mostram que o CIF aumenta rapidamente para a amostra de solo natural. Isso indica que os materiais utilizados nas misturas reduziram a tendência de fissuração do solo. Os resultados observados são consistentes com os relatados por Chaduvula et al., 2016.

A mistura solo-CCA apresenta os menores valores de CIF, comprimento total das fissuras e número de segmento de fissuras. Porém, apresentou o maior valor para a largura média das fissuras devido à grande contração inicial da amostra antes de iniciar o processo de fissuração, Figura 53.

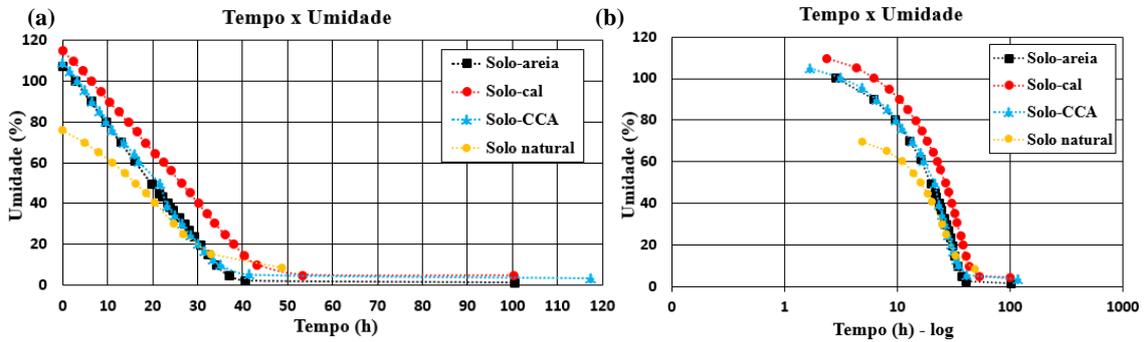
Figura 53 – Comparativo dos ensaios no solo e misturas: (a) Umidade *versus* CIF; (b) Umidade *versus* Largura média das fissuras; (c) Umidade *versus* Comprimento total das fissuras; (d) Umidade *versus* N° de segmentos de fissuras.



Fonte: a autora, 2020.

O estágio primário do processo de dessecação é caracterizado pelas taxas mais altas de dessecação para as misturas solo-areia, solo-cal e solo-CCA e iniciação do processo de fissuras para o solo natural e misturas, Figura 54. A taxa de evaporação e o comportamento do solo e das misturas no processo de fissuração são influenciados diretamente pela altura da amostra, geometria da placa, composição granulométrica e temperatura e umidade relativa do ar (ATIQUÉ E SANCHEZ, 2011). Quando o teor de água no solo ou na mistura é muito baixo, as trincas se desenvolvem muito lentamente e aproximam-se da condição de estado estacionário. Esse comportamento foi constatado por Li e Zhang (2011).

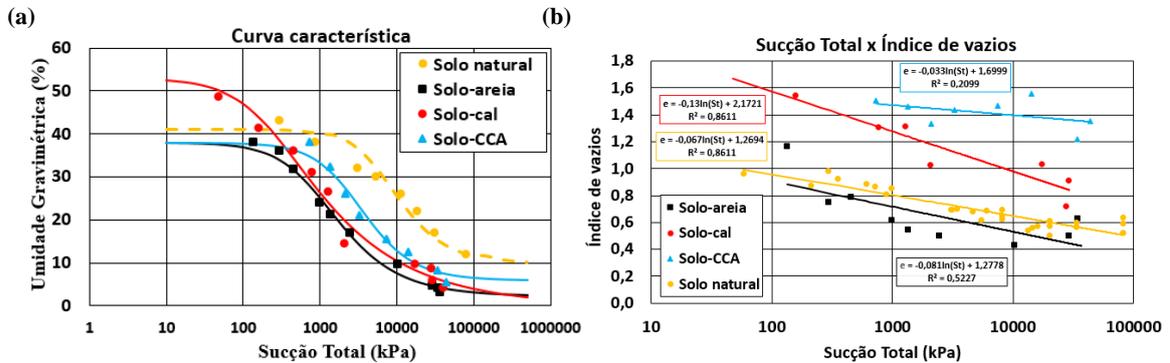
Figura 54 – Comparativo dos ensaios no solo e misturas: (a) curva Tempo *versus* Umidade; (b) Tempo *versus* Umidade (escala Log).



Fonte: a autora, 2020.

O ressecamento do solo causa redução no tamanho dos espaços porosos, resultando em um aumento de sucção (YESILLER et al., 2000). Esse aumento de sucção foi notado em todos os ensaios, tanto para o solo natural como para as misturas, Figura 55.

Figura 55 – Comparativo dos ensaios no solo e misturas: (a) Curva característica; (b) Sucção Total *versus* Índice de Vazios.



Fonte: a autora, 2020.

Os ensaios de ressecamento foram realizados de modo a comparar o processo de fissuração ocorrido em um solo natural e no solo com misturas. A Tabela 17 apresenta um resumo dos principais dados e índices do processo de propagação de fissuras para o solo natural e para as misturas.

Tabela 17 - Resumo dos principais dados e índices do processo de propagação de fissuras.

Parâmetros e Resultados		Ensaio			
		Solo Natural*	Solo-areia	Solo-cal	Solo-CCA
Umidade Inicial (%)		76,1	107,6	115,5	108,9
Índices de Vazios Inicial (e <sub>0</sub> )		2,04	2,98	3,03	2,90
Dados iniciais da amostra	Altura (mm)	15,2	15,5	15,5	15,5
	Diâmetro (mm)	147	147	147	147
	Volume (cm <sup>3</sup> )	258	263	263	263
Quantidade de lâmpadas**		04	04	04	04
Tempo total da dessecação (h)		48,8	100,3	100,2	117,5
Tempo para ocorrer processo de fissura (h)		24,7	8,3	37,03	26,8
Temperatura	Média ± D.P.	36,1 ± 0,83 °C	39,8 ± 0,97 °C	36,5 ± 1,70 °C	39,8 ± 1,27 °C
	Coef. de Variação	0,02	0,02	0,05	0,03
Umidade Relativa do Ar (URA)	Média ± D.P.	36 ± 2,38%	39,6 ± 3,76%	43,8 ± 2,73%	39,5 ± 2,60%
	Coef. de Variação	0,07	0,10	0,06	0,07
Aparecimento das primeiras fissuras	Tempo (h)	4,80	22,17	6,17	8,17
	Umidade (%)	69,90	43,3	100,3	85,3
Taxa de Evaporação (% / h)		1,44 – de 00h até 11h	2,80 – de 00h até 36,8h	2,40 – de 00h até 43,2h	2,70 – de 00h até 21,5h
		2,18 – de 11h até 29,5h	0,70 – de 36,8h até 40,5h	0,50 – de 43,2h até 53,3h	2,20 – de 21,5h até 41,5h
		0,59 – de 29,5h até 48,8h	0,02 – de 40,5h até 100,3h	0,01 – de 43,2h até 100,2h	0,02 – de 41,5h até 117,5h
Formato das fissuras		X ou T	T ou Y	T ou Y	Y
Comportamento do processo de fissuração		Fissuração no interior da amostra + contração (descolamento do molde)	Fissuração da borda para o centro + contração (descolamento do molde)	Fissuração no interior da amostra + contração (descolamento do molde)	Fissuração no interior da amostra + contração (descolamento do molde)
CIF Final (%)		28,1	21,6	26,9	15,8
Umidade Final (%)		8,30	1,45	4,60	3,50

\*Barbosa (2019), \*\*Lâmpadas incandescentes – 40 w cada.

Fonte: a autora, 2020.

O ensaio do solo natural iniciou com umidade próxima ao Limite de Liquidez, enquanto as misturas solo-cal e solo-CCA com umidades próximas a 1,5 vezes o LL e a mistura solo-areia com 2 vezes o LL. As misturas retardaram o início do processo de fissuração. Comportamentos similares foram obtidos por Harianto et al. (2008), Chaduvula et al (2016), Elhalim (2016) e Rafizul e Data (2018).

Dependendo das condições de tensão existentes, as fissuras podem apresentar o formato “T” ou “Y”, fissuras ortogonais e não ortogonais respectivamente. Nas misturas solo-areia e solo-cal são identificados os dois formatos, já na mistura solo-CCA é verificado apenas o formato “Y”. Segundo Lakshmikantha (2009), as fissuras não ortogonais revelam a quebra em função de tensões cisalhantes. Tal configuração tem menor frequência do que as fissuras no formato “T”, ocasionadas por tensão de tração.

A melhoria obtida pelo tratamento com cal é atribuída principalmente as reações de troca catiônica e pozolânicas. As reações de troca catiônica ocorrem imediatamente após a adição da cal e melhoram a trabalhabilidade do solo natural. Já as reações pozolânicas são um processo dependente do tempo e da temperatura, resultando na produção de compostos cimentícios ligando as partículas do solo. Elkady e Abdullah (2018) afirmam que esses compostos cimentícios contribuem para a redução do potencial de expansão e aumento da resistência ao cisalhamento. Por isso, a amostra solo-cal apresentou poucas fissuras com formato “Y” e maior tempo para ocorrência do processo de fissuração.

O tamanho dos grãos da areia misturada ao solo influencia o comportamento durante o ressecamento. Proporções mais altas de areia na mistura solo-areia em comparação ao solo natural leva a uma maior taxa de evaporação e maior duração do primeiro estágio de ressecamento, comportamento semelhante foi encontrado por An et al., 2018.

Elhalim (2016) estudou o efeito da adição do bagaço da cana-de-açúcar na mitigação das fissuras por ressecamento. Uma quantidade maior do bagaço levou a reduzir a resistência entre o solo e as partículas do bagaço durante a secagem, levando a um aumento da largura média das fissuras em comparação ao solo natural. Esse comportamento foi visto na mistura solo-CCA que apresentou os maiores valores para a largura média das fissuras. As fissuras formadas no solo natural e solo-cal são grossas e largas, já as formadas na mistura solo-areia são mais finas e semelhantes a linhas.

A curva característica do solo e das misturas obtida durante o processo de dessecação pelo método do papel filtro é apresentado na Figura 55a. Os índices de ajuste das curvas da Equação 1 de Van Genuchten (1980) são apresentados na Tabela 18. Esses índices são ajustados a partir de iterações, sendo a solução alcançada quando a diferença entre iterações for muito

próxima de zero. A inclinação da curva característica representa a propriedade de armazenamento não saturada de um solo, chamada de Capacidade Diferencial de Umidade. O maior valor de Capacidade Diferencial de Umidade (%) é do solo + 50% de areia e o menor do solo natural.

Tabela 18 - Índices de ajuste da equação de Van Genuchten (1980).

Índices de ajuste da Curva	Solo e misturas			
	Solo natural	Solo + 50% de areia	Solo + 5% de cal	Solo + 10% de CCA
Umidade residual $\theta_r$ (%)	9,83	2,32	0,0	5,84
Umidade saturada $\theta_s$ (%)	41	38	53	38
$\alpha$	$1,38 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-3}$	$4,63 \times 10^{-3}$	$3,64 \times 10^{-4}$
N	1,44	1,33	1,19	1,45
M	0,75	0,58	0,35	0,76
Erro no ajuste	0,004	0,002	0,026	0,002
Capacidade Diferencial de Umidade (%) ( $C = \Delta w / \Delta \log S$ )	14	20	16	17

Fonte: a autora, 2020.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \psi^n)^m]} \quad (1)$$

Onde:

$\theta$ : é a quantidade de água expressa em umidade volumétrica (%);

$\theta_r$ : é a umidade volumétrica residual em % obtida experimentalmente;

$\theta_s$ : é a umidade volumétrica de saturação em % obtida experimentalmente;

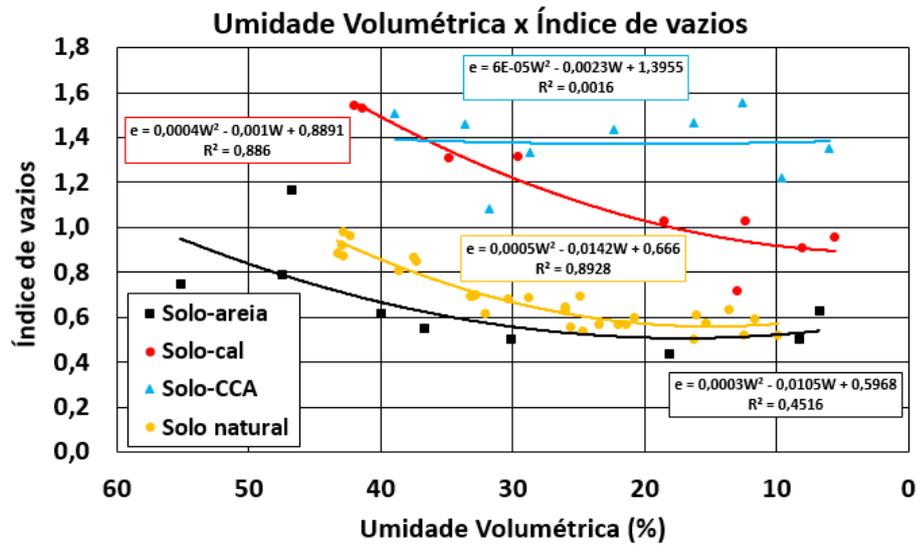
$\psi$ : sucção em kPa;

$\alpha$  e  $n$ : são parâmetros de ajuste da curva;

$m$ :  $1 - \frac{1}{n}$

O gráfico umidade volumétrica *versus* índice de vazios, Figura 56, permite observar a diminuição do índice de vazios com a redução da umidade para o solo natural e misturas. Quando a variação no índice de vazios é pequena, a variação na deformação volumétrica também é pequena e, por sua vez, o desenvolvimento da fissura diminui e se aproxima do estado estacionário.

Figura 56 – Comparativo dos ensaios no solo e misturas: Umidade Volumétrica *versus* Índice de Vazios.



Fonte: a autora, 2020.

A Figura 57 mostra o modelo tridimensional da mistura solo-areia, solo-cal e solo-CCA. As fissuras na mistura solo-cal são longas e espessas, já na mistura solo-areia as fissuras apresentaram menor largura em oposição ao maior valor de largura das fissuras encontrado na mistura solo-CCA. É possível observar que as fissuras na mistura solo-cal e as fissuras da borda na mistura solo-CCA possuem a profundidade igual da placa Petri.

Figura 57 – Modelo tridimensional da mistura solo-areia (a), solo-cal (b) e solo-CCA (c).





Fonte: a autora, 2020.

#### 4.4 COMPARAÇÃO DO PROCESSO DE INTERAÇÃO ENTRE PARTÍCULAS NO PROCESSO DE EXPANSÃO, NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO (SQUEEZE-FLOW) E DURANTE O PROCESSO DE DESSECAÇÃO

No processo de expansão com o tempo devido ao umedecimento são identificadas três regiões distintas. A Figura 58a apresenta a curva de deformação *versus* tempo devido ao umedecimento do solo expansivo de Paulista-PE obtida por Barbosa (2019). Na primeira região, denominada de Expansão Inicial, o solo apresenta pequena variação de volume devido à inundação. O solo continua trifásico e a umidade é alterada apenas na periferia das partículas ou dos grumos. Em seguida ocorre a Expansão Primária, a umidade cresce da periferia para o núcleo central, o solo expande, a fase líquida aumenta e a sucção diminui. Na terceira etapa, denominada de Expansão Secundária, o avanço da frente de umidade para o interior, o núcleo central progressivamente vai saturando e no final, todo o solo já sofreu mudança de umidade, com natural estabilização da expansão. O solo está saturado ou muito próximo da saturação, contendo agora praticamente duas fases (líquida e sólida). Comportamento similar foi observado por Delgado (1986), Ferreira (1995), Justino da Silva (2001), Silva (2019).

A curva carga *versus* deslocamento obtida do ensaio squeeze-flow com umidade próxima ao limite de liquidez apresenta três estágios do perfil reológico, Figura 33. No Estágio I, o material comporta-se como um material sólido apresentando deformação elástica linear e está relacionado à tensão de escoamento do solo e das misturas. É caracterizado por pequenos deslocamentos. O Estágio II inicia no término do Estágio I, ocorre a deslocamentos intermediários e a compressão resulta da deformação radial de cisalhamento superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico, trata-se de deslocamento plástico e ou viscoso. No Estágio III há enrijecimento por deformação, com um aumento significativo da carga necessária para dar continuidade a deformação do material, conseqüentemente, as forças de atrito são predominantes nesse estágio. Observa-se que quanto menor o teor de água maior a viscosidade elongacional e mais difícil o espalhamento do material. A aproximação e o rearranjo das partículas geram forças restritivas ao fluxo. O material torna-se não saturado.

No processo de propagação de fissuras por secagem, distingue-se também três estágios ou etapas (Figura 58 b, c, d, e). No estágio de Contração Inicial, o Fator de Intensidade de Fissuras (CIF) é nulo ou muito próximo a zero, amostra perde umidade superficial, sem, contudo, ocorrer contração ou aparecimento de fissuras significativas. A amostra está saturada com duas fases (líquida e sólida). O segundo estágio, Contração Primária, corresponde a fase de maior taxa de aumento do CIF com o tempo devido à redução de umidade. A amostra torna-se não saturada com três fases (líquida, sólida e gasosa) há redução de umidade, nessa fase, a perda de umidade ocorre inicialmente na periferia avançando para o núcleo da amostra. Ao final, o terceiro estágio correspondente a Contração Secundária há redução da taxa de CIF com o tempo sobretudo ao se aproximar da umidade correspondente ao limite de contração da amostra. Comportamento similar foi observado por Barbosa (2019) e Silva (2019).

A interação das partículas do solo com a areia, cal e cinza de casca de arroz aumentou a resistência a fissuração. Com a inclusão desses materiais ao solo, ocorre atrito entre partículas de solo e areia, cal e CCA, contribuindo para a geração de resistência durante o processo de ressecamento.

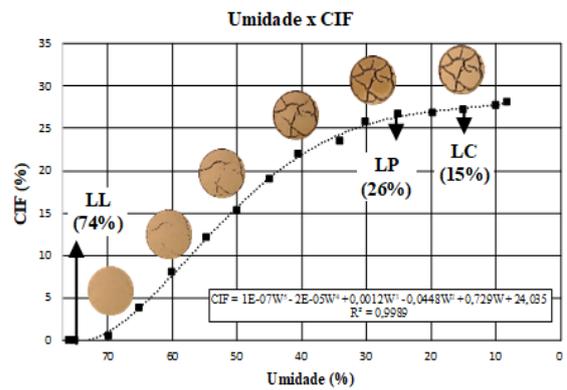
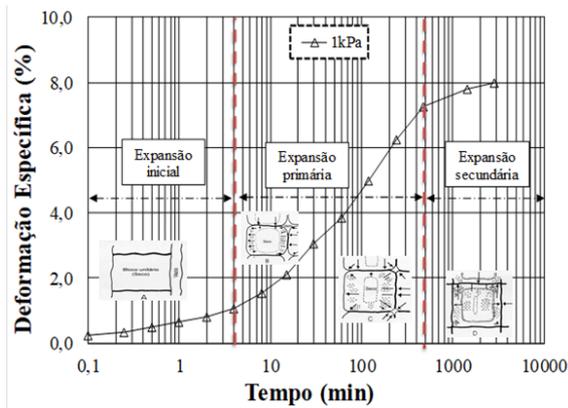
A carga para o deslocamento máximo (8 mm) é maior no solo natural (1245 N) do que nas misturas solo-areia (651 N), solo-cal (535 N) e solo-CCA (392 N), conseqüentemente o solo natural apresentou o maior valor para CIF.

As maiores tensões de escoamento ocorrem na mistura solo-areia, essa mistura teve o menor tempo de duração para o processo de fissuração, 8,3 h. A amostra solo-CCA apresentou os menores valores para tensão de escoamento e tensão inicial de enrijecimento, como também

foi a amostra com melhores resultados quanto ao processo de fissuração por ressecamento, com exceção da largura média das fissuras.

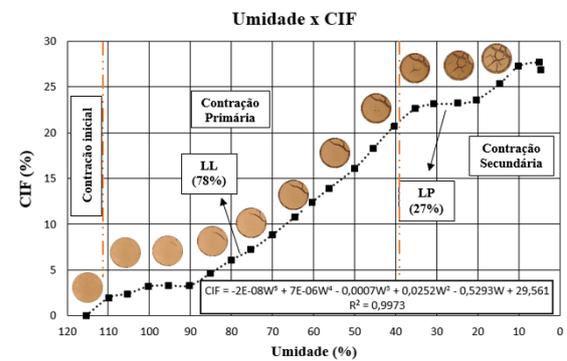
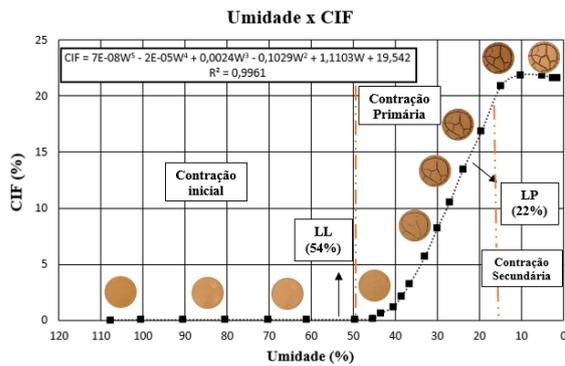
Figura 58 - Curva de deformação *versus* tempo devido ao umedecimento e Curva Umidade *versus* CIF.

- a) Curva de deformação *versus* tempo devido ao umedecimento para o solo de Paulista-PE (Barbosa, 2019)
- b) Curva Umidade *versus* CIF para o solo natural de Paulista-PE (Barbosa, 2019)

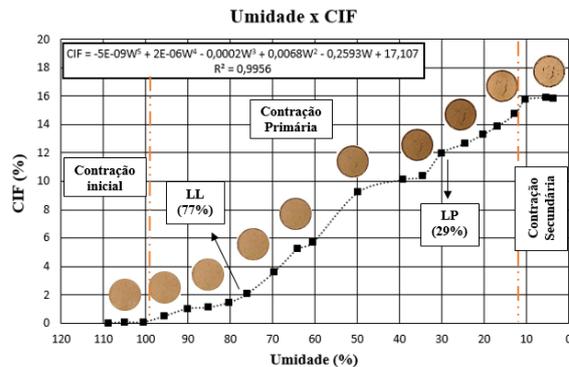


- c) Curva Umidade *versus* CIF (Solo + 50% de Areia) - LL = 54% e LP = 22%

- d) Curva Umidade *versus* CIF (Solo + 5 % de Cal) - LL = 78 % e LP = 27 %



- e) Curva Umidade *versus* CIF (Solo + 10 % de CCA) - LL 77% e LP = 29%



Fonte: a autora, 2020.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões deste trabalho que teve como objetivo analisar o comportamento reológico e a dinâmica de fissuração de um solo expansivo de Paulista-PE tratado com areia, cal e cinza de casca de arroz e as sugestões para próximos trabalhos sobre o tema.

### 5.1 CONCLUSÕES

A presente pesquisa estudou o comportamento da interação interpartículas e o processo de propagação de fissuras de um solo expansivo misturado com areia, cal e cinza de casca de arroz.

Quanto à Caracterização Física, todas as misturas são classificadas como argilas altamente plásticas (CH). Para a classificação TRB, todas as misturas se enquadram no grupo A-7-6, ruins para utilização em estradas.

O procedimento do ensaio squeeze-flow é simples, mas deve-se ter cuidado durante a fase de preparação e moldagem das amostras para garantir a homogeneização na umidade estabelecida. O ensaio foi realizado com controle por deslocamento em que o material é submetido a um deslocamento efetuado com velocidade constante enquanto a força é medida.

A análise da curva carga *versus* deslocamento possibilita a compreensão do comportamento reológico do solo em diferentes situações, partindo do repouso, até um elevado nível de deformação. O ensaio squeeze-flow é capaz de aferir a variação e a forma da curva carga *versus* deslocamento do solo em umidades relacionadas às obtidas através dos limites de consistência.

Quando as amostras se encontram saturadas, a interação entre as partículas sólidas é somente com a água. Nas umidades inferiores a saturação, a amostra é não saturada e a interação é trifásica, apresentando maiores cargas para um mesmo deslocamento. A tensão de escoamento diminui com o aumento da umidade. A mistura solo-CCA apresentou os menores valores de tensão de escoamento.

Foi utilizada uma metodologia de processamento de análise de imagens digitais para aquisição de dados que permitisse o cálculo das informações geométricas das amostras após secagem. Através da utilização do software livre ImageJ foi possível obter a largura média das fissuras, o comprimento total das fissuras, número de segmento das fissuras, área fissurada e

CIF. Com essas informações foi possível verificar a evolução desses índices geométricos com o tempo e acompanhar o desenvolvimento das fissuras.

A utilização de areia, cal e cinza de casca de arroz alterou significativamente a morfologia da fissura. Os ensaios de propagação de fissuras nas misturas mostraram a tendência a uma formação de fissuras no formato “T” e no formato “Y”. Os padrões de fissuras no solo natural e na mistura solo-cal são longos e espessos, já na mistura solo-areia os padrões de fissuras apresentaram menor largura em oposição ao maior valor de largura média das fissuras encontrado na mistura solo-CCA.

O fator CIF cresceu de maneira não linear e gradual com a perda de umidade para o solo natural e todas as misturas, porém esse valor apresentou uma redução ao final dos ensaios. O CIF diminuiu com as misturas solo-areia, solo-cal e solo-CCA, isto se deve principalmente à interação de partículas do solo com a areia, cal e CCA, que aumentou a resistência ao fissuramento. A mistura solo-CCA apresentou os melhores resultados para a estabilização do solo expansivo quanto à fissuração, o CIF reduziu 44% com a adição da cinza de casca de arroz ao solo. Porém, as misturas de areia, cal e CCA não suprimiram totalmente as fissuras por ressecamento do solo argiloso de Paulista-PE, embora a cal e cinza de casca de arroz tenham estabilizado o solo quanto à expansão e a areia tenha reduzido a expansão do solo natural.

## 5.2 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

A partir dos resultados deste trabalho, sugere-se as seguintes análises para trabalhos futuros:

- Realizar ensaio de squeeze-flow em diferentes velocidades para avaliar a influência da velocidade na curva carga *versus* deslocamento.
- Realizar o acompanhamento da umidade durante a realização do ensaio squeeze-flow.
- Realizar mais ensaios, com aumento do percentual da areia, cal e cinza de casca de arroz para verificar se algum percentual desses aditivos estabiliza o solo quanto a fissuração.
- Realizar ensaios comparativos dessas misturas com ciclos de secagem e inundação.
- Realizar ensaio em campo para análise do processo de fissuração de um solo com e sem melhoramento.
- Avaliar e comparar a viabilidade econômica das técnicas de melhoramento utilizadas nesta dissertação e o impacto destas técnicas ao meio ambiente.
- Analisar o processo de propagação de fissuras com adição de matéria orgânica em camadas

de coberturas.

- Analisar o processo de propagação de fissuras em solos que apresentem um único tipo de argilomineral.

## REFERÊNCIAS

- ABASS, K. I. Lime Stabilization of Expansive Soil. **Journal of Engineering and Development**. Environmental Eng. Dep., Collage of Engineering, Al-Mustansiriya University, Baghdad, Iraq, v. 71, n. 7, Mar. p. 31-72, 2014.
- ADHIKARY, S. & KOYEL, J. Potentials of rice-husk ash as a soil stabilizer. **International Journal of Latest Research in Engineering and Technology (IJLRET)**. v. 2, n. 2, p. 40-48, 2016.
- AKINYELE, J. O.; SALIM, R. W.; OIKELOME, K. O.; OLATEJU, O. T. The use of rice husk ash as a stabilizing agent in lateritic clay soil. **International Science Index, Civil and Environmental Engineering**, v. 9, n. 11, p. 1373-1377, 2015.
- ALBRECHT, B. A., BENSON, C. H. Effect of desiccation on compacted natural clays. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 1, p. 67-75, 2001.
- AMORIM, S. F. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informação geográfica dos solos expansivos e colapsíveis do estado de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.
- AMMOUR, A., BOUHANNA, B. **Contribution a l'étude de la fissuration des argiles**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Tlemcen, Argélia, 2016.
- AMRI, S.; AKCHICHE, M.; BENNABI, A.; HAMZAOU, R. Geotechnical and mineralogical properties of treated clayey soil with dune sand. **Journal of African Earth Sciences**. v. 152, p. 140-150, 2019.
- AN, N.; TANG, C. S.; XU, S. K.; GONG, X. P.; SHI, B.; INYANG, H. I. Effects of soil characteristics on moisture evaporation. **Engineering Geology**, v. 239, p. 126-135, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ATAÍDE, S. O. F. **Análise do comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- ATIQUE, A. & SANCHEZ, M. **Analysis of Cracking Behavior of Drying Soil**.

International Conference on Environmental Science and Technology. IPCBEE, Singapore, v. 6, p. 66-70, 2011.

BAPTISTA, C. F. N. **Ensaio fundamentais para a pavimentação e dimensionamento dos pavimentos flexíveis**. v. 1, 2. ed., Porto Alegre: Editora Globo, 1976.

BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

BARBOSA, F. A. S. **Análise do comportamento hidromecânico e da dinâmica de fissuração de um solo expansivo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An introduction to rheology**. Amsterdam: Elsevier, 1989. (Rheology series; v.3). ISBN 0444874690 (enc.)

BASTOS, E. G. **Variação volumétrica de uma argila expansiva do litoral norte de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1994.

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

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CAVALCANTE, E. H.; CAVALCANTI JUNIOR, D. de A.; SANTOS, W. J.; SOUZA NETO, J. B. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo de Sergipe. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS – GEOJOVEM*. 2. 2006, Nova Friburgo. **Anais [...]**. Nova Friburgo: ABMS, 2006.

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

CHADUVULA, U., VISWANADHAM, B. V. S., KODIKARA, J. (2016). Desiccation cracking behavior of geofiber-reinforced expansive clay. *In: GEO-CHICAGO 2016 SUSTAINABLE GEOENVIRONMENTAL SYSTEMS*, 2016. **Proceedings [...]**. Virginia, American Society of Civil Engineers, 2016, p. 368-77.

CHEN, F. H. **Foundations on expansive soils**. Elsevier Science Publishers B, 1988.

CONSTANTINO, C. S. **Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

COSTA, C. D. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de**

**aterros sanitários utilizando materiais alternativos.** Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

CORTE, A. & HIGASHI, A. **Experimental research on desiccation crack in soil.** U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment. Research report No.66. Corps of Engineers. USA, 1960.

DELGADO, A. **Influencia de la trayectoria de las tensiones em el comportamiento de las arcilas expansivas y de los suelos colapsables em el laboratorio y em el terreno.** Tese (Doutorado) - Universidad de Sevilla, Sevilla, 1986.

ELHALIM, A. R. Assessment of the potential of sugarcane bagasse to mitigate clayey soil cracks using image processing technique: laboratory experiment. **Egyptian Journal of Soil Science**, v. 56, n. 4, p. 561-572, 2016.

ELKADY, T. & ABDULLAH, S. Role of Cementation and Suction in the Swelling Behavior of Lime-Treated Expansive Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, 2018.

FATTAH, M. Y.; RAHIL, F. H.; AL-SOUDANY, K. Y. H. Improvement of Clayey Soil Characteristics Using Rice Husk Ash. **Journal of Civil Engineering and Urbanism**, v. 3, n. 1, p. 12-18, 2013.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, S. R. M. **Mapa de risco a colapsibilidade e expansividade de solos do estado de Pernambuco – Geotecnia Ambiental.** Relatório Técnico do CNPq, 100p, 1999.

FERREIRA, S. R. M. et al. Estabilização de solos expansivos de Cabrobó, Paulista e Suape/PE com cal. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 16., 2012. **Anais [...]**. Porto de Galinhas: ABMS, 2012, p. 264.

FERREIRA, S. R. M.; VILAR, O. M. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Capítulo 15: Solos colapsíveis e expansivos. São Paulo: ABMS, 2015.

FERREIRA, S. R. M.; PAIVA, S. C.; MORAIS, J. J. O.; VIANA, R. B. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, supl. 1, e 11930, 2017.

FERREIRA, S. R. M.; ARAÚJO, A. G. D.; BARBOSA, F. A. S.; SILVA, T. C. R.; BEZERRA, I. M. L. Analysis of changes in volume and propagation of cracks in expansive soil due to changes in water content. *In: Revista Brasileira de Ciência do Solo* (no prelo). 2019.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe / Estado do Ceará.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

- HARIANTO, T.; HAYASHI, S.; DU, Y. Effects of Fiber Additives on the Desiccation Crack Behavior of the Compacted Akaboku Soil as A Material for Landfill Cover Barrier. **Water Air and Soil Pollution**, pp. 141-149, 2008.
- HUDYMA, N. & AVAR, B. Changes in Swell Behavior of Expansive Clay Soils from Dilution with Sand. **Environmental & Engineering Geoscience**. ENVIRON ENG GEOSCI. 12. 137-145, 2006.
- JIMENEZ, S. J. A. **Cimentaciones em terrenos expansivos o cola sables**. *In: Geotecnia Y Cimentos 111*, v. 1. Madrid: Ed. Rueda, 1980. p. 533-650.
- JONES, D. E.; HOLTZ, W. G. **Expansive soils – the hidden disaster**. Civil Eng., ASCE, New York, p. 87-89, 1973.
- JUCÁ, J. F. T., GUSMÃO FILHO, J. A. AND JUSTINO DA SILVA, J. M. Laboratory and field tests on an expansive soil in Brazil. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS*. 7., 1992. **Proceedings [...]**. Dallas: ICES, 1992, pp. 337-342.
- JUSTINO DA SILVA, J. M. **Variação volumétrica de uma argila contráctil-expansiva não saturada submetida a diferentes condições climáticas**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- LACERDA, L. S. S. N. **Análise do comportamento geotécnico de solos de Cabrobó, potencialmente expansivos, estabilizados com cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
- LAKSHMIKANTHA, M. R. **Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils**. Ph.D. Thesis, Dept. of Geotechnical Engineering and Geosciences, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain, 2009.
- LI, J. H. AND ZHANG, L. M. Study of desiccation crack initiation and development at ground surface. **Engineering Geology**, v. 123, p. 347-358, 2011.
- MAHLER, C. F. **Análise de obras assentes em solos colapsíveis e expansivos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.
- MELO, D. F. M. **Comportamento reológico de solos sujeitos a corridas de lama por liquefação estática**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- MESCHYAN, S. R. **Experimental Rheology of Clayey Soils**. Balkema Publishers. USA, 448p, 1995.
- MILLER, C. J.; MI, H., YESILLER, N. Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. **Journal of the American Water Resources Association**, 34 (3), pp. 677-686, 1998.
- MORAIS, J. J. O. **Caracterização geotécnica da expansividade de um solo argiloso do município de Paulista-PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

NAHLAWI, H., KODIKARA, J.K. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers. **Geotechnical and Geological Engineering**, p. 1641-1664, 2006.

NELSON, J. D. E MILLER, D. J. **Expansive soils – Problems and practice in foundation and pavement engineering**. Department of Civil Engineering, New York, 259p, 1992.

NOTARO, C. C. **Comportamento reológico dos solos em umidades próximas aos limites de Atterberg, utilizando o squeeze-flow**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2012.

OLIVEIRA, L. C. **A estabilização de solos aplicada a habitação, um estudo de misturas solo-cimento**. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.

OLIVEIRA, I. R., STUDART, A. R., PILEGGI, R. G., PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.

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

PAIVA, S. C.; LIMA, M. A. A.; FERREIRA, M. G. V. X.; FERREIRA, S. R. M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Revista Matéria**. UFRJ, Rio de Janeiro, p. 437-449, 2016.

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

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

RAFIZUL, I. M. & DATTA, D. Quantification of Geometrical and Morphological Characteristics of Desiccation Crack and Shrinkage Behavior of Composite Clay Liner. **Iranian Journal of Energy and Environment**, v. 9, n. 4, p. 284-294, 2018.

SCHREINER, H. D. **State of the art review on expansive soils**. Imperial College, London, 1987.

SILVA, T. J. **Avaliação do impacto de fissuras na condutividade hidráulica em aplicações de camada fina por meio de análises de imagens**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SILVA, J. A. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

SILVA, T. C. R. **Avaliação do comportamento hidromecânico e do processo de propagação de fissuras de solo expansivo do município de Bonito / PE**. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

TANG, C. S.; CUI, Y. J.; TANG, A. M.; SHI, B. Experimental evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. **Engineering Geology**, v. 114, p. 261-266, 2010.

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

TANG, C.; SHI, B.; LIU, C.; SUO, W.; GAO, L. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. **Applied Clay Science**, v. 52, p. 69-77, 2011 b.

TANG, C.; ZHU, C.; LENG, T.; SHI, B.; CHENG, Q.; ZENG, H. Three-dimensional characterization of desiccation cracking behavior of compacted clayey soil using X-ray computed tomography. **Engineering Geology**, v. 255, p. 1-10, 2019.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p. 892-898, 1980.

VIJAYVERGIYA, V. N. & GHAZZALY, O. I. Prediction of Swelling Potential for Natural Clays. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 3., 1973. **Proceedings [...]**. Hayfa: ICES, p. 227-236, 1973.

YESSILER, N.; MILLER, C. J.; INCI, G.; YALDO, K. **Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soil**. Wayne State University, Department of Civil & Environmental Engineering, Detroit, MI 328202, USA, 2000.