



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

NAYARA TORRES BELFORT ACIOLI MAGALHÃES

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO PROCESSO DE
RESSECAMENTO E FISSURAMENTO DE SOLOS EXPANSIVOS COM
INCLUSÃO DE ELEMENTOS RÍGIDOS**

Recife
2019

NAYARA TORRES BELFORT ACIOLI MAGALHÃES

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO PROCESSO DE
RESSECAMENTO E FISSURAMENTO DE SOLOS EXPANSIVOS COM
INCLUSÃO DE ELEMENTOS RÍGIDOS**

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

Área de concentração: Geotecnia.

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

Recife

2019

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

M188a Magalhães, Nayara Torres Belfort Acioli.
 Análise experimental e numérica do processo de ressecamento e fissuramento
 de solos expansivos com inclusão de elementos rígidos / Nayara Torres Belfort
 Acioli Magalhães. - 2019.
 128 folhas, il., gráfs., tabs.

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

 Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.
 Inclui Referências.

 1. Engenharia Civil. 2. Solos expansivos. 3. Inclusões rígidas. 4.
 Modelagem numérica. 5. BBM. 6. Dano. I. Guimarães, Leonardo José do
 Nascimento. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-447



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

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO PROCESSO DE
RESSECAMENTO E FISSURAMENTO DE SOLOS EXPANSIVOS COM
INCLUSÃO DE ELEMENTOS RÍGIDOS**

defendida por

Nayara Torres Belfort Acioli Magalhães

Considera a candidata APROVADA

Recife, 13 de novembro de 2019

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães - UFPE
(Orientador)

Prof.^a Dr.^a Débora Cristina Almeida de Assis – UFAL
(Examinadora externa)

Prof.^a Dr.^a Cecília Maria Mota Silva Lins – UFRPE
(Examinadora externa)

Prof.^a Dr.^a Analice França Lima Amorim – UFPE
(Examinadora interna)

Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira – UFPE
(Examinador interno)

Dedico esta tese aos meus pais, que se sacrificaram durante toda a minha vida para que eu tivesse educação, conhecimento e caráter.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu agradeço a Deus, pois Ele me deu presentes como saúde e coragem para seguir meu caminho. Também agradeço por Ele ter me colocado em uma família tão abençoada e no convívio com pessoas especiais durante toda minha vida, me protegendo e me guiando nas horas mais difíceis, além de todos os presentes que seguem:

Agradeço a minha família, especialmente meus pais, José Acioli e Vânia Belfort, que com muito esforço me educaram e me ensinaram a ser uma pessoa de bom coração e de caráter íntegro, as vezes até chata. Também agradeço por todo esforço que sempre fizeram e continuam fazendo para cuidar da nossa família, que agora tem netinhos, Davi, meu afilhado, que tem sido uma luz no meu caminho, e Daniel, que acabou de nascer e já está no meu coração. Também agradeço à oportunidade que meus pais me deram de ser a profissional que sou hoje. Quem sou hoje é por causa da ação pensada, sentida e calculada dos meus pais.

Agradeço a minha irmã, que, desde que eu nasci, sempre tem se preocupado e cuidado de mim. Irmã, você me ajudou a me conhecer, a pensar fora da caixa, a escutar e a ser uma pessoa responsável. Agradeço por todo convívio que temos e pela alegria que eu sinto sempre que te encontro, além de ter me dado meu afilhado, Davi, que é uma chama que aquece meu coração.

Agradeço ao meu esposo, Ferdinando Magalhães, que é uma pessoa que Deus colocou em minha vida e que tem sido meu porto seguro, meu amigo, me apoiando e me ajudando em todos os momentos, nas alegrias e nas tristezas, na saúde e na doença. Agradeço por você ser a pessoa que tem me ensinado o verdadeiro significado da palavra companheirismo.

Agradeço ao meu orientador, Leonardo Guimarães, que é uma pessoa que tenho grande admiração. Agradeço por todos os momentos em que ele colocou os meus pés no chão e também pelos momentos em que me fez voar mais alto. Agradeço pelo apoio que ele me deu no momento mais difícil do meu doutorado e também por embarcar comigo nos meus planos, me orientando como um ser humano completo e sendo um modelo de pessoa e profissional admiráveis. Agradeço pelo exemplo que me destes e por todas as oportunidades, desde o primeiro dia que cheguei na sua sala. Agradeço por ter acreditado e apostado em meu trabalho. Mas

mais importante, eu agradeço pelas reclamações, pois cada reclamação me fez melhorar como profissional e me provocou buscar novas maneiras de pensar.

Agradeço ao professor Ézio Araújo, que foi a pessoa que sempre que nos encontramos me deu energias para seguir meu caminho na UFPE, com apoio profissional e pessoal, torcendo por mim e me ajudando a lutar pelos meus sonhos.

Agradeço ao professor Sílvio Romero pela parceria nesse último ano. É um grande prazer trabalhar com você, sempre estou aprendendo com sua paciência com os alunos, além da sua sabedoria, inteligência, e minúcia na Mecânica dos Solos.

Agradeço ao professor Igor Gomes, que é um ser humano único, uma alma evoluída e um profissional admirável. Agradeço pelo apoio, pelo direcionamento profissional e pelas conversas surpreendentes e bem-humoradas que foram essenciais na minha trajetória.

Agradeço ao professor Washington Amorim, que foi a primeira pessoa através da qual eu tive contato com a profissão e que me inspira até os dias de hoje. Agradeço pelas inúmeras conversas que tivemos sobre o passado, o presente e o futuro, pelas dicas que me destes e pelas broncas que levei. Professor, o senhor é um profissional que eu sonho em ser no futuro, com uma experiência gigante e um coração maior ainda. Tenho o senhor como um grande amigo que eu fiz na UFPE, além de todo respeito que sempre terei para contigo, me sinto muito honrada por isso. Obrigada pelos ensinamentos que me destes, pelas visões práticas dos problemas e principalmente das soluções. E mais importante, obrigada por ter sido a minha inspiração na engenharia, pois foi você quem me fez querer ser engenheira geotécnica, desde o momento em que me ensinastes que não bastava cálculos precisos, mas mais importante era ter o sentimento e o raciocínio das melhores soluções de engenharia. Aprendi isso e muito mais em suas aulas de Mecânica dos Solos, no meu primeiro estágio, que foi no seu laboratório, em nossas reuniões e nas aulas de Fundações e de Barragens.

Agradeço ao professor Fernando Jucá, que sempre apostou em minhas idéias e que me ensinou muito, desde que eu era sua IC no curso de Engenharia Civil da UFPE. Durante todos esses anos eu agradeço o contato que sempre tivemos e o apoio que sempre me destes. Nos momentos mais desesperançosos você era uma das pessoas que mais me energizava para continuar e levantar a cabeça, me chamando até de criança certas vezes, nunca esquecerei de como eu evolui trabalhando, conversando e me aconselhando com você. Agradeço também pelas oportunidades

que me destes na engenharia, e de me permitir continuar investigando temas que me fazem vibrar.

Agradeço também às professoras Leila Brunet e Analice Lima, que me deram apoio nessa minha trajetória. Tenhos vocês como minhas amigas, além de lhes admirar muito como profissionais e me espelhar em vocês, pois vocês têm uma trajetória digna de aplausos.

Agradeço às minhas amigas de trabalho e da vida, presentes de Deus, Tays Rosado, Katia Galindo e Rayane Mattos. Agradeço por todas as conversas que tivemos e por termos nos encontrado nesse mundo. Agradeço pelo grande apoio emocional e profissional que me deram durante a minha trajetória do doutorado. Vocês têm uma vida de luta, são guerreiras que merecem muitas vitórias, eu desejo a vocês muitas bênçãos, que sei que Deus tem a lhes dar.

Agradeço também aos meus amigos e companheiros de trabalho que contribuíram com a minha evolução como pessoa e como profissional durante nossas conversa e reuniões, em especial, Raquel Oliveira e Leidy Laura. Também, Ana Itamara, Débora Assis, Oscar Melgar, Ximena, Matheus Brunet, Bruno Maciel, Jean Joseph, Ricardo Guedes, Daniel Melo, Tarcísio Augusto e Franklin, que foram pessoas excelentes de se conviver.

Agradeço também aos IC, Lara e Lucas, que me ajudaram muito nessa reta final do doutorado, colocando a mão na massa e me ajudando com toda energia que puderam.

E não pordeira esquecer da equipe administrativa, que com toda simpatia e eficiência me mostraram os caminhos e as soluções de tantos problemas que levei. Em especial Priscila Gameiro, Rose Mary, Andrea Negromonte, Cleide e Claudiana.

Por fim, agradeço também à FACEPE pelo apoio financeiro durante todo o doutorado.

RESUMO

O comportamento dos solos argilosos expansivos é um grande desafio para a Engenharia Civil, pois, ao longo do ano, com as estações de seca e chuva, quando submetidos a chuvas esses solos aumentam de volume, e quando submetidos a estiagens, esses solos retraem, e diante desse comportamento, as obras de engenharia sofrem danos. Esse trabalho investigou a formação e a propagação de fissuras em solos expansivos para viabilizar a previsão do comportamento geomecânico desses solos através de análises de correlação de imagens digitais (DIC) e da simulação numérica em elementos finitos. Foi realizado o ensaio de ressecamento com a argila expansiva Romainville em laboratório, no qual buscou-se investigar a influência de inclusões rígidas randomicamente distribuídas no corpo da amostra com a presença de bases com diferente aderência da amostra. Durante o ensaio, foram capturadas imagens das amostras a cada 10 minutos por uma câmera. De posse dessas imagens, foi realizada a correlação digital de imagens (DIC) através do programa Ncorr do MATLAB para apresentar a possibilidade de previsão da iniciação e da propagação das fissuras na superfície do solo, inclusive antes da iniciação de fissuras. Com o intuito de apresentar uma metodologia numérica para a investigação desse comportamento de ressecamento, foi realizada uma modelagem numérica em elementos finitos para representar o fissuramento de uma argila expansiva. Foi utilizado o modelo constitutivo elastoplástico Barcelona Basic Model (BBM), juntamente com o modelo de Dano à tração, para representar o mecanismo de formação e propagação das fissuras na superfície dos materiais, inseridos através da Técnica de Elementos Finitos de Alta Razão de Aspecto. Com isso foi possível investigar, numericamente, o comportamento de fissuração um solo expansivo frente a inclusão de elementos rígidos com a mesma configuração geométrica do ensaio experimental realizado. Esse trabalho permitiu observar que a presença de elementos rígidos nos solos argilosos expansivos influenciou fortemente a formação e a propagação de fissuras. A presença dessas estruturas fez com que fissuras fossem iniciadas próximo a esses elementos rígidos, apresentando uma tendência de conectar esses elementos, quando da presença de 3 ou mais dessas estruturas. Foi observado que aumento no número de elementos rígidos aumentou o número de fissuras nas amostras, enquanto que o aumento no seu diâmetro reduziu o número de fissuras, mas aumentaram a abertura das fissuras. Observou-se, também, que o

atrito do solo com a base também influenciou a formação de fissuras, de maneira que quanto maior o atrito, maior o número de fissuras. A simulação numérica se mostrou eficiente para representar esse comportamento de fissuramento em argilas expansivas. Foi observada, através da comparação entre a simulação numérica e o experimento, uma tendência comum de formação de fissuras próximo às inclusões, com tendências similares de propagação entre inclusões.

Palavras-chave: Solos expansivos. Inclusões rígidas. Modelagem numérica. BBM. Dano.

ABSTRACT

The behavior of expansive clayey soils is a major challenge for Civil Engineering. Due to rainy and dry seasons these soil increase and decrease in volume, respectively, and this process can leads to shrinking development on the surface of this soil, causing damage to Civil Engineering constructions. This work investigated the formation and propagation of the crack in expansive soils aiming to support the prediction of its geomechanical behavior through Digital Image Correlation (DIC) analysis and finite element numerical simulation. A drying test with the Romainville expansive clay was performed in the laboratory to investigate the influence of randomly distributed rigid inclusions within the sample with the presence of two different bases. During the test, pictures were captured every 10 minutes by a camera. With these images, DIC analysis was performed through the Ncorr program to present the possibility of predicting the initiation and propagation of cracks on the soil surface, even before the initiation of cracks. To present a numerical methodology for the expansive clay shrinking investigation, numerical modeling was performed using the finite element method. The Barcelona Basic Model (BBM) elastoplastic constitutive model and the Tensile Damage constitutive model were used to represent the mechanism of formation and propagation of cracks in the surface of the soil, coupled with the High Aspect Ratio Finite Element Technique. This work showed that this methodology can investigate numerically the cracking behavior of expansive soil, and it allowed to analyze the influence of rigid elements against cracks network. It was observed that the presence of rigid elements in the expansive clayey soil strongly influenced the formation and propagation of cracks. The presence of rigid elements leaded cracks to initiate beside them, and it was observed a tendency of cracks linking inclusions when there were 3 or more of them. It was observed that the higher the number of rigid elements the greater the number of cracks formed, while the higher the diameter of the inclusion the lower the number of cracks, however, the crack opening increased. It was also observed that the friction of the soil on the base also influenced the pattern of the crack, increasing its number. Finally, the numerical simulation showed to be efficient to represent the cracking behavior in expansive clays, and through the comparison between both the numerical simulation and the experiment, a common tendency of cracks formation was observed, with similar propagation tendencies.

Keywords: Expansive soils. Rigid inclusions. Numerical modeling. BBM. Dano.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Um exemplo de fissuras devido ao ressecamento do solo	30
Figura 2 - Experimento de ressecamento da argila Romainville	32
Figura 3 - Desenho esquemático de (a) solo inicial totalmente saturado; b) menisco de interface água-ar; (c) sucção capilar; (d) tensão de tração; e (e) iniciação de fissuras	32
Figura 4 - Curva granulométrica do solo Romainville	35
Figura 5-Configuração experimental das amostras	37
Figura 6- Cápsula com teflon preenchida com água testada em uma máquina a vácuo.	37
Figura 7- Vista superior de todas as amostras e do termo-higrômetro.	38
Figura 8 - Desenho esquemático da configuração do ensaio experimental.....	39
Figura 9 - Comportamento de temperatura durante o ensaio de ressecamento	41
Figura 10 - Comportamento de sucção e umidade relativa durante o ensaio de ressecamento.....	41
Figura 11 - Ensaio de ressecamento para as amostras 1, 3, 4, 5, 6 e 7 em 4 momentos diferentes	43
Figura 12 - Ensaio de ressecamento para amostras 1T, 3T, 4T, 5T, 6T e 7T em 4 instantes diferentes	45
Figura 13 - Visão geral de todas as amostras no (a) início e no (b) final do ensaio de secagem, 335h.....	47
Figura 14 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada por seguimento preto para amostra No.1.....	48
Figura 15 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No. 1 provenientes do seguimento pré-estabelecido com indicações da seta representando deformações no centro	48
Figura 16 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada por seguimento preto para amostra No.2.....	49
Figura 17 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No. 2 provenientes do seguimento pré-estabelecido	49
Figura 18 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.3	50
Figura 19 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No. 3 provenientes da seção pré-estabelecida...	50
Figura 20 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.4	51

Figura 21 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No.4 provenientes do seguimento pré- estabelecido	51
Figura 22 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.5	52
Figura 23 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No.5 provenientes do seguimento pré- estabelecido	52
Figura 24 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.6	53
Figura 25 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No.6 provenientes do seguimento pré- estabelecido	53
Figura 26 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.7	54
Figura 27 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No.7 provenientes do seguimento pré- estabelecido	55
Figura 28 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.1T	55
Figura 29 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No.1T provenientes do seguimento pré- estabelecido	55
Figura 30 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.2T	56
Figura 31 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No.2T provenientes do seguimento pré- estabelecido	56
Figura 32 - (a) e_{xx} e (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.3T	57
Figura 33 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No.3T provenientes do seguimento pré- estabelecido	57
Figura 34 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.4T	58
Figura 35 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No.4T provenientes do seguimento pré- estabelecido	58
Figura 36 - (a) e_{xx} e (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.5T	59
Figura 37 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No.5T provenientes do seguimento pré- estabelecido	59
Figura 38 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.6T	60
Figura 39 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No.6T provenientes do seguimento pré- estabelecido	60
Figura 40 - (a) e_{xx} (b) e_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.7T	61
Figura 41 - e_{xx} e e_{yy} para amostra No.7T provenientes do seguimento pré- estabelecido	61
Figura 42 - Deslocamentos horizontais para a amostra No.1, em pixels, para (a) 272h, (b) 277h, (c) 285h, (d) 288h, e (e) 293h.....	62

Figura 43 - Deslocamentos verticais para a amostra No.1, em pixels, para (a) 272h, (b) 277h, (c) 285h, (d) 288h, e (e) 293h.....	63
Figura 44 - Deformação principal (a) mínima (compressão) e (b) máxima (tração) ..	63
Figura 45 – (a) Deslocamento horizontal (m) da amostra No.1 entre 288h e 293h de ensaio com 3 extensômetros virtuais locados e (b) zoom	64
Figura 46 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 1a e 1b	64
Figura 47 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 2a e 2b	65
Figura 48 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 3a e 3b	65
Figura 49 - Deslocamentos horizontais para a amostra 6, em pixels, para (a) 228h, (b) 288h, (c) 293h, (d) 301h, (e) 308h, e (f) 335h	66
Figura 50 - Deslocamentos verticais para a amostra 6, em pixels, para (a) 228h, (b) 288h, (c) 293h, (d) 301h, (e) 308h, e (f) 335h	66
Figura 51 - Deformação principal (a) mínima (compressão) e (b) máxima (tração) ..	67
Figura 52 – (a) Deslocamento horizontal (m) da amostra 6 entre 308h e 335h de ensaio com 3 extensômetros locados	67
Figura 53 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 1a e 1b	68
Figura 54 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 2a e 2b	68
Figura 55 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 3a e 3b	69
Figura 56 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 4a e 4b	69
Figura 57 – Gráfico do número de fissuras para as amostras avaliadas no ensaio de ressecamento	70
Figura 58 - Gráfico da comparação entre as amostras de mesma disposição geométrica, mas com diferentes bases através da razão do número de fissuras, do número de inclusões inseridas na amostra e do diâmetro das inclusões (cm)	72
Figura 59 - Comportamento umidade das amostras ao final do ensaio de ressecamento	75
Figura 60 – Relação entre (a) variação de volume x tensão média e (b) sucção x tensão média	82
Figura 61 – Superfície de fluência, (a) relação tensão desviadora x tensão média (b) relação sucção com a tensão média	85
Figura 62 – Superfície de fluência em três dimensões	86
Figura 63 - Seção transversal representando o (a) material intacto e o (b) material degradado	88

Figura 64 - Elemento unidimensional submetido a um carregamento uniaxial F	89
Figura 65 – Diagrama de tensão x deformação.....	91
Figura 66 – Evolução (a) linear e (b) exponencial do dano	93
Figura 67 – Vetor de tensões T projetado na direção da normal à base do elemento	94
Figura 68 – Fluxograma do algoritmo IMPL-EX.....	97
Figura 69 – Evolução da variável q em função de r	98
Figura 70 – Elemento finito com alta razão de aspecto	101
Figura 71 - (a) Malha em elementos finitos de caso 2D, (b) zoom de elementos e um (c) segundo zoom para visualizar os elementos de interface em azul e verde	102
Figura 72 – Representação da Descontinuidade S e da banda de localização h ...	103
Figura 73 – Campo de deslocamentos da descontinuidade forte	103
Figura 74 - Geometria e Condições de contorno do Cenário 1T	107
Figura 75 – Resultados em gráficos para o Cenário 1T	108
Figura 76 – Abertura de fissura (mm) x Distância (mm) para o Cenário 1T	109
Figura 77 – Abertura de fissura (mm) x Tempo (dias) para o Cenário 1T	110
Figura 78 - Geometria e Condições de contorno do Cenário 5T	111
Figura 79 – Resultados em gráficos para o Cenário 5T	111
Figura 80 – Abertura de fissura (mm) x Distância (mm) para o Cenário 5T	113
Figura 81 – Abertura de fissura (mm) x Tempo (dias) para o Cenário 5T	114
Figura 82 - Geometria e Condições de contorno do Cenário 6T	115
Figura 83 – Resultados em gráficos para o Cenário 6T	115
Figura 84 – Abertura de fissura (mm) x Distância (mm) para o Cenário 6T	117
Figura 85 – Abertura de fissura (mm) x Tempo (dias) para o Cenário 6T	117
Figura 86 - Geometria e Condições de contorno do Cenário 7T	118
Figura 87 – Resultados em gráficos para o Cenário 7T	119
Figura 88 – Abertura de fissura (mm) x Distância (mm) para o Cenário 7T	120
Figura 89 – Abertura de fissura (mm) x Tempo (dias) para o Cenário 7T	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas da argila de Romainville _____	35
Tabela 2 – Equações constitutivas do modelo de dano à tração _____	95
Tabela 3 - Parâmetros elásticos do modelo BBM _____	105
Tabela 4 - Parâmetros do modelo de Dano à tração _____	106
Tabela 5 - Parâmetros para Curva de Retenção _____	106
Tabela 6 - Parâmetros para Cálculo da Permeabilidade _____	106

LISTA DE SÍMBOLOS

e	Índice de vazios
V_v	Volume de vazios (m ³)
V_t	Volume total (m ³)
ϕ	Ângulo de atrito (°)
u	Deslocamento (m)
ε	Deformação (%)
σ	Tensão (MPa)
b	Forças de corpo (MPa)
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação (%s ⁻¹)
Q	Energia de ativação adotada
R	Constante universal dos gases (kcal/mol/K)
T	Temperatura (°C)
ρ	Tensão média (MPa)
J	Tensão desviadora (MPa)
$\mathbf{D}$	Matriz constitutiva
h	Sucção total
M	Peso molecular da água
g	Aceleração da gravidade
H	Umidade relativa do ar
ρ_α	Densidade da fase
n	Porosidade
S_α	Grau de saturação na fase
∇	Operador divergente
$\mathbf{j}_\alpha$	Vetor de fluxo da fase
$\mathbf{f}_\alpha$	Vetor de termo fonte/sumidouro
$\mathbf{q}_l$	Termo de fluxo de Darcy
$\mathbf{u}$	Velocidade fase sólida
K_{rel}	Permeabilidade relativa
μ_l	Viscosidade da fase líquida
ρ_l	Densidade do líquido
p_l	Pressão da fase líquida

κ_{ref}	Permeabilidade intrínseca
n_{ref}	Porosidade de referência
S_e	Grau de saturação efetivo
λ	Parâmetros de ajuste
$p_a - p_l$	Pressão capilar
S_{rl}	Grau de saturação residual
S_{ls}	Grau de saturação máximo
p	Tensão média líquida
q	Tensão desviatória
v	Volume específico
$\lambda(s)$	Rigidez do material
p_c	Tensão de referência
p	Incremento de tensão
$\lambda(0)$	Parâmetro de compressão virgem
r	Constante relacionada à rigidez máxima
$N(s)$	Volume específico referente à tensão p^c
p_o	Tensão de pré-adensamento na condição não-saturada
p_0^*	Tensão de pré-adensamento na condição saturada
p_{atm}	Pressão atmosférica
M	Inclinação da linha de estados críticos
G	Módulo cisalhante do material
A_D	Área de defeitos de uma seção transversal
A	Área total
$\bar{A}$	Área efetiva
$\bar{\sigma}$	Tensão efetiva de dano
E	Módulo de Young do material não danificado
E_D	Módulo de Young do material degradado
$\varphi(\sigma)$	Função de dano
$\tau(\sigma)$	Evolução das tensões no domínio elástico
q	Tensão que tem um limite na máxima tensão do domínio elástico
R	Variável interna que define o limite do domínio elástico no espaço das tensões efetivas

A_e	Parâmetro de abrandamento exponencial
$\mathbf{C}$	Tensor constitutivo elástico
$\bar{\sigma}_n$	Componente normal do vetor de tensões $\bar{T}$
f_t	Resistência à tração
G_f	Energia de fratura do material
h	Espessura da banda de localização das deformações
$\mathbf{C}_{tg}$	Matriz constitutiva tangente
Δt	Tempo atual
$u_n^{(i)}$	São deslocamentos do nó “i” no eixo “n”
$u_s^{(i)}$	Deslocamentos do nó “i” no eixo “s”
$\mathbf{x}$	Deslocamento em um ponto material
$\bar{\mathbf{u}}$	Deslocamento regular
H_s	Função <i>Heaviside</i>
κ_{io}	Parâmetro elástico inicial para volume específico x tensão média
κ_{so}	Parâmetro elástico inicial para volume específico x sucção
α_{is}	Parâmetro para cálculo de κ_i
α_{ss}	Parâmetro para cálculo de κ_s
p_{ref}	Tensão média de referência
ν'	Coeficiente de Poisson
P_o	Pressão de entrada de ar
λ	Índice de distribuição do tamanho dos poros
A_m	Parâmetro de ajuste
λ_m	Parâmetro de ajuste

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVA	25
1.2	OBJETIVOS	27
1.2.1	Objetivos Gerais.....	27
1.2.2	Objetivos Específicos	27
1.3	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	28
2	SOLOS EXPANSIVOS ARGILOSOS E O SEU COMPORTAMENTO FRENTE AO RESSECAMENTO	29
2.1	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO RESSECAMENTO DE UMA ARGILA EXPANSIVA COM A INCLUSÃO DE ELEMENTOS RÍGIDOS	34
2.1	MATERIAL.....	34
2.2	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	36
2.3	CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL (DIC).....	39
2.5	ANÁLISE QUALITATIVA	40
2.6	ANÁLISE QUANTITATIVA ATRAVÉS CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS (DIC).....	47
2.6.1	Avaliação da formação das fissuras	47
2.6.2	Número de Fissuras.....	70
3	MODELOS CONSTITUTIVOS E TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS DE ALTA RAZÃO DE ASPECTO	76
3.1	FLUXO DE ÁGUA EM SOLOS NÃO SATURADOS	76
3.2	BARCELONA BASIC MODEL (BBM)	79
3.1.1	Formulação para o Estado Isotrópico de Tensões	80
3.1.2	Leis de endurecimento.....	83
3.1.3	Modelo para o Estado Tridimensional	84
3.3	MODELO CONSTITUTIVO DE DANO	87
3.3.1	Introdução ao modelo constitutivo de dano	87

3.3.2	Deformações na ocorrência de dano.....	89
3.3.3	Critério de degradação	90
3.3.4	Lei de evolução do dano.....	92
3.3.5	Modelo constitutivo de dano à tração	93
3.3.6	Algoritmo de integração Implícito-Explícito (IMPL-EX)	95
3.3.7	Algoritmo de controle do passo de tempo	97
3.4	TÉCNICAS EM ELEMENTOS FINITOS PARA REPRESENTAÇÃO DA FORMAÇÃO DE FISSURAS.....	99
3.5	TÉCNICA DE FRAGMENTAÇÃO DE MALHA	100
4.2.1	Elemento Finito de Interface	101
4.2.2	Cinemática da Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes	103
4	MODELAGEM NUMÉRICA DO RESSECAMENTO DE UMA ARGILA EXPANSIVA.....	104
4.1	PARÂMETROS DOS MATERIAIS UTILIZADOS	105
4.2	CENÁRIO 1T	107
4.3	CENÁRIO 5T	110
4.4	CENÁRIO 6T	114
4.5	CENÁRIO 7T	118
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	122
5.1	ENSAIO EXPERIMENTAL DE RESSECAMENTO DE UMA ARGILA EXPANSIVA.....	122
5.2	MODELAGEM NUMÉRICA DO RESSECAMENTO DE UMA ARGILA EXPANSIVA.....	123
5.3	SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS	124
	REFERÊNCIAS	125

1 INTRODUÇÃO

A maior parte das obras de Engenharia Civil são construídas sobre solos, e essas obras funcionam como estruturas rígidas que oferecem restrições ao deslocamento do solo. Essas estruturas são rígidas devido a suas propriedades físicas de alta resistência, enquanto o solo argiloso, na condição saturada, por exemplo, é facilmente deformável, quando comparado a essas estruturas.

Diante dessa diferença na resistência das estruturas e dos solos, a sua interação é de fundamental importância para a Geotecnia, pois elas representam restrições ao deslocamento dos solos nos quais elas estão inseridas. Por exemplo, na ocorrência de subsidências, ou deslocamentos horizontais do solo, essas estruturas impõe uma descontinuidade no movimento do solo, já que elas possuem uma rigidez maior do que o solo. Seguindo esse raciocínio, essas estruturas rígidas podem gerar a concentração de tensões de tração, causando a formação de fissuras no solo.

Além disso, mediante a formação de fissuras no solo, sua propagação pode variar com o atrito na camada de solo. Por exemplo, a rede de fissuras em um solo residual, profundo e de alta coesão, é diferente da de uma camada fina (aproximadamente 0.5 m) de solo argiloso sobre uma camada de areia, ou outro material que ofereça uma baixa restrição ao deslocamento do solo superficial, já que a areia é um material que não possui coesão. Esse cenário pode ser observado em regiões de encontro do rio com mar ou nas margens de rios e lagos, por exemplo.

A investigação da presença desse tipo de estruturas rígidas no solo tem uma vasta aplicação na Engenharia Civil, podendo representar a presença de drenos de gás verticais em aterros sanitários, instrumentações em barragens ou taludes, fundações rasas como radier e sapatas, ou mesmo blocos de fundação profunda, estacas prancha, túneis, tubulações enterradas, poços de petróleo, entre outras obras de engenharia.

Outro cenário muito influente que pode ser avaliado é uma compactação de uma camada de solo argiloso que não foi escarificado corretamente e que o solo fica sem a aderência adequada com a camada seguinte, não oferecendo restrição ao movimento. Ainda outro cenário muito comum na Engenharia Civil é um aterro

sanitário, sua camada de solo compactado se encontra sob uma camada de resíduos, que dependendo do tipo de resíduo depositado, este pode não oferecer uma aderência ideal ao solo, permitindo a formação de largas fissuras, provocando a entrada de água e a saída de gases tóxicos para a atmosfera.

Visando os cenários mais desfavoráveis, muitos dos projetos da Engenharia Geotécnica tradicional são baseados no princípio da mecânica dos solos saturados. No entanto, as obras geralmente se encontram sobre um solo em uma condição não saturada, tornando a mecânica dos solos não saturados necessária para investigar o comportamento desses materiais (KIM; HWANG; KIM, 2018).

TANG et al. (2018) mostrou a importância de se investigar os solos não saturados através da análise da estabilidade de taludes, considerando diferentes condições de precipitação e avaliou a sua influencia no fator de segurança fazendo uso de probabilidade de falha condicional e probabilidade de falha anual.

GARAKANI et al. (2018) apontam que o comportamento hidromecânico de solos não saturados é afetado pelas mudanças de tensão efetiva, umidade, densidade do solo e pela estrutura dos poros dentro da matriz do solo. Esse comportamento hidromecânico está relacionado com a condutividade hidráulica, que é uma propriedade do solo que descreve o seu comportamento hidráulico e está relacionada ao conteúdo de água e ao tamanho dos poros do solo.

Na visão microestrutural, a condutividade hidráulica depende da estrutura do solo, da conexão no espaço poroso e da permeabilidade intrínseca de cada fase do solo. É um desafio determinar a condutividade hidráulica devido à grande variação na composição mineral e à textura complexa do solo. A heterogeneidade da condutividade hidráulica e a sua variação trazem obstáculos na análise de problemas hidráulicos na Engenharia Geotécnica (DONG; GUO; XIONG, 2018). Portanto, a condutividade hidráulica e retenção de água no solo são propriedades críticas do solo para descrever o fluxo de fluido em solos não saturados.

Seguindo esse raciocínio, a curva característica água-solo vem auxiliar o estudo do comportamento dos solos não saturados, uma vez que ela descreve a relação entre o grau de saturação e a sucção em meios porosos parcialmente saturados.

Em relação aos materiais granulares, alguns autores (AHMADI; MOOSAVI; JAFARI, 2018) investigaram a propagação da ruptura de falha através do solo granular úmido e concluíram que, devido à coesão aparente, a areia úmida se comportava mais firme que a areia seca, embora fossem observadas escarpas pontiagudas no solo úmido, onde as fissuras foram formadas.

Fissuras por ressecamento têm sido estudadas em uma variedade de materiais, não só com solos, mas também cerâmica, plástico e concreto. Além disso, as correlações de imagem foram estudadas para verificar a evolução das fissuras, por exemplo, (ZHAO; ZSAKI; NOKKEN, 2018) analisaram as primeiras 24 h de um concreto fresco por análise de DIC e áreas de trinca computadas no MatLab.

Além de análises experimentais, métodos numéricos também têm sido investigados e aperfeiçoados para prever a formação e propagação de fissuras em argilas expansivas (NAVARRO et al., 2017; SANCHEZ et al., 2013; SONG; CUI; YE, 2018; TENG et al., 2016; VO et al., 2017).

1.1 JUSTIFICATIVA

Nesse trabalho foi investigado o comportamento de solos expansivos frente ao ressecamento, bem como a formação e a propagação de fissuras, para viabilizar a previsão do comportamento geomecânico desses solos a partir de análises de correlação de imagens digitais (DIC) e da simulação numérica em elementos finitos.

Foi realizado o ensaio de ressecamento de uma argila expansiva em laboratório. A configuração experimental foi idealizada de maneira que permitisse a investigação da formação e propagação de fissuras devido ao ressecamento do solo através da análise de imagens. Nesse ensaio buscou-se investigar a influencia de inclusões rígidas randomicamente distribuídas no corpo da amostra, o que não foi investigado até o presente momento na bibliografia científica. Para isso, foi utilizada uma amostra de uma argila expansiva Romainville oriunda da região leste de Paris, França, citada anteriormente.

A partir das imagens durante o ensaio, capturadas a cada 10 minutos por uma câmera, foi realizada a correlação de digital de imagens (DIC) através do programa Ncorr do MATLAB para apresentar a possibilidade de previsão da iniciação e da

propagação das fissuras na superfície de solos expansivos mesmo quando não há a iniciação de fissuras, ou seja, no momento em que as deformações superfícies da amostra não são perceptíveis a olho nu.

E com o intuito de apresentar uma possível metodologia para a investigação dos solos expansivos, foi realizada uma modelagem numérica em elementos finitos. Para isso foi utilizado o modelo constitutivo elastoplástico Barcelona Basic Model (BBM), para representar a redução de volume do solo devido à perda de água da amostra, juntamente com o modelo de Dano à tração, para representar a formação e propagação das fissuras por tração, inserida através da Técnica de Elementos Finitos de Alta Razão de Aspecto.

Com isso foi possível investigar, numericamente, o comportamento de fissuração de um solo expansivo frente à presença das inclusões rígidas com a mesma configuração geométrica do ensaio experimental realizado.

O principal produto desse trabalho é a investigação do comportamento dos solos expansivos frente a presença de inclusões rígidas e a utilização do acoplamento dos modelos constitutivos BBM e Dano à tração, já implementados no programa em elementos finitos, CODE-BRIGHT (COupled DEformation, BRIne, Gas and Heat Transport), com a técnica de Elementos Finitos de Alta Razão de Aspecto no estudo do ressecamento de solos expansivos.

1.2 OBJETIVOS

Nesse item está descrito os objetivos gerais e específicos dessa tese.

1.2.1 Objetivos Gerais

Realizar a investigação do comportamento de solos expansivos frente à inclusão de elementos rígidos e viabilizar a previsão do comportamento hidromecânico desses solos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar o ensaio de ressecamento da argila Romainville em laboratório com as condições que permitam a investigação do estudo de formação e propagação de fissuras devido ao ressecamento do solo;
- Investigar a influência da inclusão de elementos rígidos randomicamente distribuídos no corpo da amostra;
- Analisar as imagens digitais salvas durante o ensaio de ressecamento do solo para mostrar a possibilidade de previsão da iniciação e da propagação das fissuras na superfície de solos expansivos;
- Modelar numericamente o ressecamento de uma argila expansiva, diferente da avaliada em laboratório, para tornar viável o acoplamento dos modelos constitutivos Barcelona Basic Model (BBM) e Dano à Tração, bem como a utilização da técnica de Elementos Finitos de Alta Razão de Aspecto;
- Investigar, através da modelagem numérica, o comportamento de fissuração uma argila expansiva, diferente do avaliado em laboratório, com a inclusão de elementos rígidos com a mesma configuração geométrica da utilizada no ensaio.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O presente trabalho está organizado na seguinte sequência:

- No Capítulo 1 estão apresentados a introdução, a justificativa, os objetivos e a organização da Tese;
- No Capítulo 2 foi detalhado o experimento de ressecamento realizado em laboratório com a argila expansiva Romainville;
- No Capítulo 3 estão descritos os modelos numéricos utilizados para a simulação numérica do comportamento dos solos expansivos e a técnica utilizada para a representação de fissuras;
- No Capítulo 4 se encontram alguns cenários simulados com as mesmas configurações do experimento realizado, mas com parâmetros de solo diferentes;
- No Capítulo 6 constam as conclusões alcançadas ao final de todas as análises experimentais e numéricas e a sugestão para pesquisas futuras.

2 SOLOS EXPANSIVOS ARGILOSOS E O SEU COMPORTAMENTO FRENTE AO RESSECAMENTO

Solos argilosos têm o comportamento mecânico altamente complexo, regido por um grande número de fatores como composição, salinidade (NAVARRO et al., 2017), umidade, espessura, temperatura, etc. (TANG et al., 2010). Esse comportamento se mostra ainda mais complexo quando observado em argilas expansivas, pois, frente ao seu ressecamento, é necessário também considerar o teor de água perdido devido à sucção e seu consequente fissuramento (FLEUREAU et al., 2015) e variação de volume.

Esse fissuramento ocorre na superfície dos solos argilosos expansivos (LI; ZHANG, 2011), e quando isso ocorre devido ao ressecamento do solo, a formação de padrões de fissuras parece aleatória e única (LEVATTI; PRAT; LEDESMA, 2019). Esse comportamento ocorre, normalmente, em ambientes secos, onde solos argilosos formam fissuras que criam uma rede poligonal que pode variar de milímetros a várias centenas de metros (WANG et al., 2018a).

Quando esse comportamento é investigado em laboratório, geralmente, as primeiras fissuras que surgem no solo são fissuras de fronteira, começando na borda da amostra e separando o solo do recipiente. Nessas circunstâncias, as condições de contorno são governadas por muitos fatores, incluindo o atrito entre o recipiente e a amostra (LEVATTI; PRAT; LEDESMA, 2019).

Já em campo, KONRAD & AYAD (1997) observaram que o valor de espaçamento, profundidade e abertura das fissuras são diferentes das observadas em laboratório. De maneira semelhante, LI & ZHANG (2011) estudaram um encolhimento do solo em larga escala de metros e concluíram que a rede de trincas formadas era diferente daquela observada em laboratório, com testes em pequena escala, e afirmaram que isso foi causado pelos efeitos de condições de contorno.

Esse comportamento fez as argilas expansivas serem conhecidas pelo dano que causam às construções de engenharia, pois elas apresentam o comportamento de expansão, quando ela se torna úmida, e de contração, quando ela resseca. Assim, a compreensão desse comportamento é significativa para a Engenharia Geotécnica, devido ao seu potencial de dano (FLEUREAU et al., 2015; TENG et al., 2016), o que

inclui a perda de resistência do solo e o possível colapso das construções, o que está relacionado à mudança de permeabilidade, compressibilidade e resistência mecânica do solo (VO et al., 2018). Na Figura 1 está ilustrado um exemplo da dimensão de fissuras formadas pelo ressecamento em um solo argiloso.

Figura 1 - Um exemplo de fissuras devido ao ressecamento do solo



Fonte: WANG et al. (2018).

A presença de fissuras no solo não apenas influencia o surgimento de zonas fracas, mas também intensifica a variabilidade espacial do estado de tensões da estrutura (TANG et al., 2016).

Este efeito pode causar grandes perdas econômicas devido à necessidade de recuperação da estrutura e sua função preliminar, por exemplo, na França, a seca dos anos 1989 e 1990 afetou edifícios em 216 comunidades (VANDANGEON, 1992), com danos causados pelo comportamento expansivo da argila da região conhecida como Romainville. Também, entre os anos de 1992 a 2002, os danos causados por esse mesmo solo em toda a França custaram em média 3,3 bilhões de euros, o que representou 40% do custo total de desastres naturais (CUI et al., 2006).

Visando reduzir os efeitos de expansão dessas argilas, diversos autores vêm estudando este fenômeno para compreendê-lo e solucioná-lo (CUI et al., 2006; SANCHEZ et al., 2013; FLEUREAU et al., 2015; SILVA, 2018; VO et al., 2018; WANG et al., 2018a). Para isso, se faz necessário estudar os fatores influenciadores do efeito de expansão e fissuramento dessas argilas, que não funcionam como variáveis independentes, mas acopladas (TENG et al., 2016), e quando condições hidráulicas são incorporadas em sua análise, a complexidade se torna ainda maior,

principalmente se os parâmetros são pouco conhecidos, como por exemplo o efeito do congelamento de solos na formação de fissuras (HUANG et al., 2018).

CUI et al. (2006) estudaram esse solo argiloso Romainville citado anteriormente, eles afirmaram que esse solo tinha uma homogeneidade satisfatória e classificaram como argila de alto índice de plasticidade. CUI et al. (2010) também avaliaram este solo após o procedimento de compactação e investigaram seu comportamento através do ensaio oedométrico com sucção controlada, onde concluíram que a compressibilidade foi fortemente influenciada pela sucção e que se correlacionam de maneira inversa.

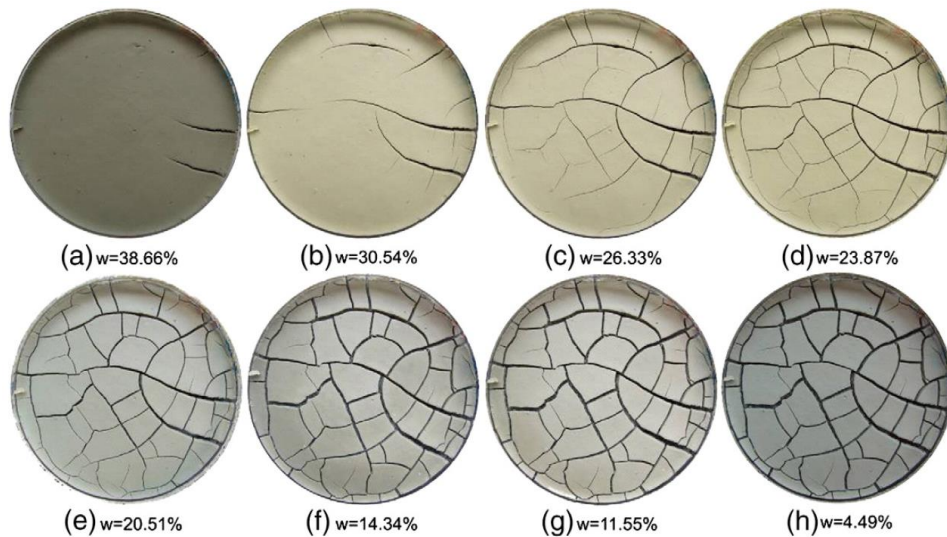
O mesmo solo foi avaliado por (CUI et al., 2013), que realizaram uma investigação experimental através de uma câmara ambiental em laboratório durante 30 dias de ensaio de ressecamento. Eles concluíram que a câmara permitiu o monitoramento completo dos parâmetros do ar e do solo, e do conteúdo volumétrico de água e sucção e mostraram que a evaporação ocorreu principalmente na superfície do solo. Os autores também afirmaram que a variação da superfície das fissuras estava diretamente relacionada à variação das aberturas, o que permitiu que eles concluíssem que apenas um desses parâmetros precisa ser analisado para estudar o comportamento de secagem do solo.

TANG et al. (2011.a) também investigou a argila Romainville e suas propriedades de retração dentro de um recipiente circular, Figura 2. Esses autores realizaram o ensaio de ressecamento de solo com cápsulas de vidro com temperatura e umidade monitorados, com valores de $19,5^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$) e 37% ($\pm 4\%$), respectivamente. Pode ser observado na Figura 2 o comportamento do ressecamento do solo ao longo da redução da umidade.

Além disso, neste trabalho eles afirmaram que as fissuras se encontram com ângulos retos, com pontos de interseção em forma de T e cruz, esse comportamento pode ser observado na Figura 32. Comportamento semelhante também foi descrito por outros autores (TANG et al., 2011.b; WANG et al., 2018).

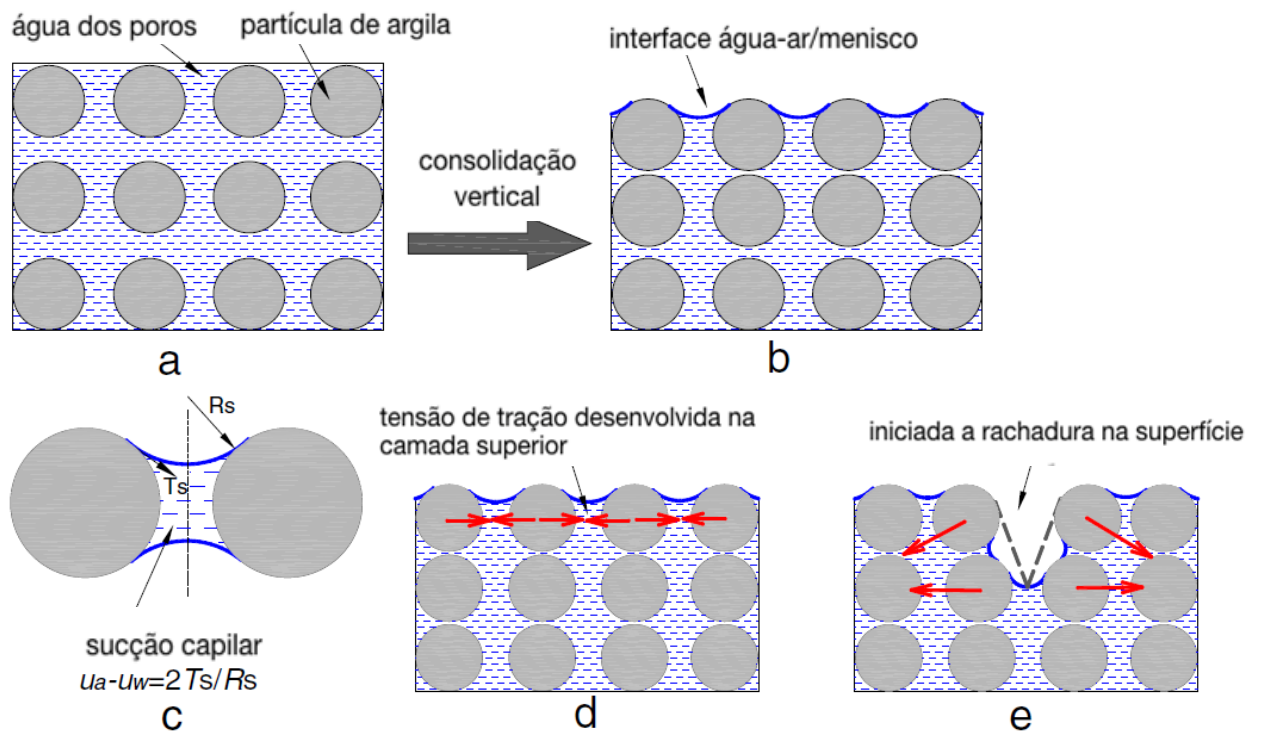
Observando a formação das fissuras em corte, pode ser observado que, uma vez que as tensões de tração se formam na superfície, as fissuras se formam na superfície, como ilustrado na Figura 3.

Figura 2 - Experimento de ressecamento da argila Romainville



Fonte: TANG et al. (2011a)

Figura 3 - Desenho esquemático de (a) solo inicial totalmente saturado; b) menisco de interface água-ar; (c) sucção capilar; (d) tensão de tração; e (e) iniciação de fissuras



Fonte: Adaptado de TANG et al. (2011a).

Observando a formação de fissuras, alguns autores (SANCHEZ et al., 2013; TANG et al., 2011.a; VO et al., 2017) mostraram que elas iniciam a partir do topo das amostras.

Na China, estudando um solo argiloso de Nanjing, TANG et al. (2011.b) realizaram experimentos de ressecamento e analisaram imagens utilizando técnicas de correlação de imagens digitais (DIC). Nesse trabalho, eles analisaram imagens gravadas a cada 30 minutos a partir de uma câmera digital e observaram que fissuras secundárias também cruzam uma fissura pré-existente em um ângulo reto, e observaram que o fissuramento surge tanto da contenção externa, quanto de fissuras internas.

TANG et al. (2011.b) também afirmou que a aparência das fissuras devido ao ressecamento pode ser confiavelmente prevista pela análise de DIC por uma análise de deformação na superfície do solo. Em relação à propagação da trinca, eles admitiram que as fissuras não se propagam sempre em linhas retas, mas podem se espalhar seguindo a forma da cápsula.

FLEUREAU et al. (2015) realizaram ensaios com amostras retangulares de um solo argiloso com 4mm de espessura e avaliaram a formação e propagação de fissuras, observando padrões de modos de abertura, deslizamento, bifurcação e coalescência de fissuras. Neste estudo foi realizada a correlação de imagens digitais (DIC) para avaliação de tensões e deslocamentos através das ferramentas VIC-2D e ImageJ, o que permitiu aos autores inferir que o mecanismo de formação de trinca foi capturado.

Em TANG et al. (2011.b), eles concluíram que as fissuras poderiam nuclear no subsolo e emergir em direção à superfície. Da mesma forma, VO et al. (2017) simularam um experimento de ressecamento e observaram que, mesmo com a evaporação da água ocorrendo a partir do topo, as fissuras podem emergir do fundo da amostra e se propagar para o topo, mas também podem ser iniciadas de cima para a base, que é mais comumente observado.

AN et al. (2018) realizaram cinco ensaios utilizando uma argila expansiva da China, o solo foi avaliado a partir de uma lama em amostras com 150 mm de diâmetro e 50 mm de altura para avaliar o comportamento do solo e a influência da espessura da amostra, do teor de água, da proporção de mistura do solo com areia, do tamanho de partícula e da densidade seca em solo compactado. Neste estudo eles controlaram a temperatura (20-22 ° C) e a umidade relativa (50 +/- 2%) com um ar-condicionado.

Afirmaram que o tamanho dos grãos da areia que foi misturada ao solo influenciou o seu comportamento durante o ressecamento, mas não de forma significativa.

2.1 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO RESSECAMENTO DE UMA ARGILA EXPANSIVA COM A INCLUSÃO DE ELEMENTOS RÍGIDOS

Durante uma estadia de dois meses em Paris, na Universidade Leste de Paris, na École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), foi investigada a influência de restrições verticais, representadas por inclusões rígidas nas amostras, e restrições horizontais, representadas por bases com aderências distintas às amostras. Foi realizado um ensaio de ressecamento de uma argila expansiva da região que apresenta problemas geotécnicos para as estruturas de Engenharia Civil. A configuração experimental do ensaio foi montada no laboratório Navier da Universidade ENPC em cooperação com os professores Jean-Michel Pereira e Anh Minh Tang.

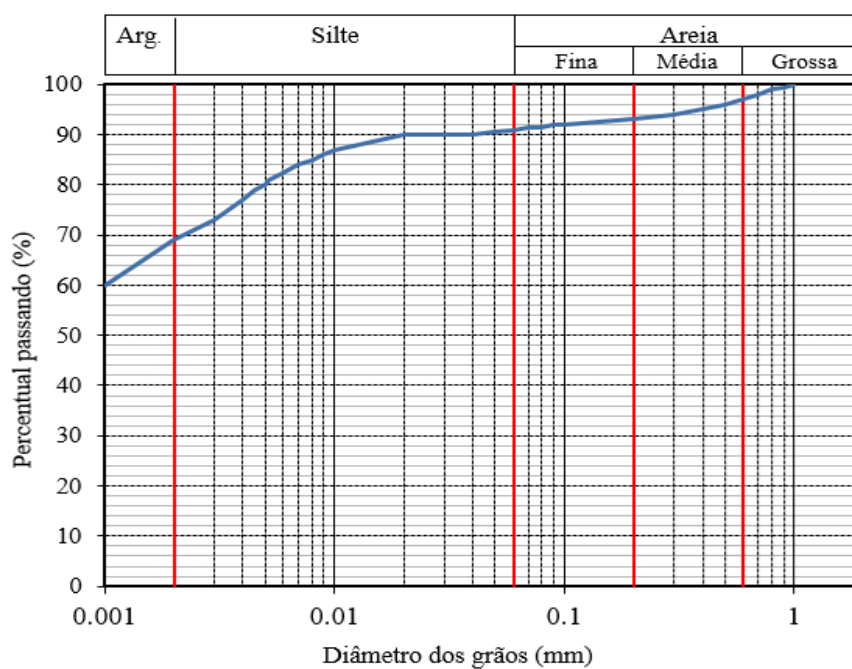
O solo da região é o já mencionado nesse trabalho, cujo nome é argila Romainville. Esse solo já foi estudado por outros autores e continua sendo intensivamente investigado devido ao seu comportamento expansivo (CUI et al., 2006; DUC; MALOULA; MAKKI, 2013; MANTHO, 2005; TANG et al., 2011a).

2.1 MATERIAL

Para esse experimento, foi obtida uma amostra de 2 kg de uma argila expansiva originada na região leste de Paris conhecida como Romainville. As propriedades do solo são descritas na Tabela 1, bem como a sua granulometria na Figura 4. Segundo SOWERS (1979) esse solo é classificado como altamente plástico ($IP > 17\%$).

Para avaliação do comportamento de uma argila expansiva, foi realizado o ensaio experimental de ressecamento do solo dentro de uma câmara com temperatura e umidade relativa monitoradas através de um Termo-Higrômetro. Nesse ensaio foram necessários 2 Kg de solo, 14 cápsulas de vidro, 7 moldes de teflon de mesmo diâmetro das capsulas, uma câmara, um computador e uma câmera. A câmera foi montada acima das amostras de maneira que fosse possível realizar imagens de todas as amostras em conjunto.

Figura 4 - Curva granulométrica do solo Romainville



Fonte: Adaptado de MANTHO (2005).

Tabela 1 - Propriedades físicas da argila de Romainville

Parâmetros	Resultados
Densidade ρ úmida (g/cm^3)	2,02 (solo intacto)
ρ_d densidade a seco (g/cm^3)	1.58 (solo intacto)
Índice de vazios e_o	0,77 (solo intacto)
Teor ideal de água Proctor w_{OPN} normal (%)	27,2
Densidade seca a $\rho_{d\text{ OPN ideal}}$ (g/cm^3)	1,23
Limite de liquidez w_L (-)	76
Limite de plasticidade w_P (-)	37
Índice de plasticidade I_P	39
Atividade da fração argila 12.1 $A_{CB} = VBS/C2 \times 100$ (g/100g de argila)	12.1
Mineralogia global:	Quartzo: ++++ Calcita: traços argilas e feldspatos
Teor da matéria orgânica da C_{MO} (%)	0,88
Mineralogia da fração $< 2\mu\text{m}$	Montmorilonita 35% moscovita / illita 60% caulinita 5%

Fonte: Adaptado de DUC; MALOULA; MAKKI (2013).

Esse ensaio teve a duração de 14 dias e a metodologia está descrita a seguir, incluindo as propriedades do material, a configuração experimental e a análise e Correlação de Imagens Digitais (DIC).

2.2 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Para a realização da configuração experimental, foi proposto avaliar dois tipos de restrição ao deslocamento do solo. A primeira foi pensada de maneira que funcionasse como impedimento ao deslocamento horizontal do solo diante da imposição de atritos diferentes na base das amostras. Esse comportamento foi representado por cápsulas de vidro e cápsulas idênticas, mas com a base de teflon, pois devido à sua propriedade antiaderente, o solo tem livre a condição de contorno horizontal na base, diferentemente do vidro.

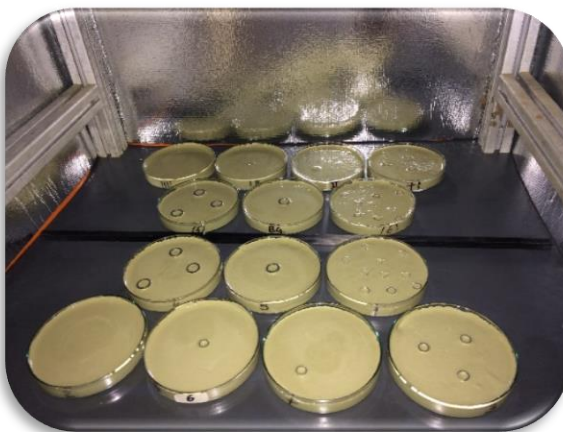
Outra restrição foi uma condição de contorno vertical com a inserção de inclusões rígidas distribuídas na amostra. Essas inclusões foram de silicone e, diante das configurações propostas, randomicamente distribuídas nas amostras, e das amostras utilizadas, essas estruturas não se deformaram, dessa maneira, funcionaram como inclusões rígidas na amostra, restringindo seu deslocamento horizontal.

Esse ensaio foi realizado com base nos procedimentos de TANG et al. (2011a), com algumas modificações:

- Obtenção de 2 kg de amostra da argila Romainville e verificação da sua umidade;
- Em seguida, foi adicionada água e misturadas à mão até se tornarem lama com a saturação de 170% (g g⁻¹);
- Esta lama, então, foi misturada com um misturador elétrico até homogeneidade;
- Esse material foi coberto para sedimentação e incorporação da água no solo por 24 horas;
- Foram separadas 7 cápsulas de vidro com 11 cm de diâmetro e 1.8 cm de altura e outras 7 cápsulas de vidro com mesmas dimensões, preparadas com teflon colado sobre sua base com o mesmo diâmetro da cápsula;
- Essas 14 cápsulas de vidro, foram preenchidas com a lama;

- Em algumas destas amostras foram inseridas inclusões circulares com diâmetros de 1,0 cm e 1,5 cm de silicone em posições variadas, Figura 5.

Figura 5-Configuração experimental das amostras



Fonte: A Autora (2017).

Todas as amostras foram colocadas em uma máquina a vácuo por 20 minutos para que as bolhas de ar incorporadas fossem removidas e para garantir que o teflon funcionaria adequadamente, de maneira que o material de teflon, que foi fixado na cápsula com uma fita dupla face, não descolasse e nem permitisse a entrada de fluidos entre o teflon e a cápsula de vidro.

Assim, uma cápsula com teflon preenchida com água foi testada por 40 minutos na máquina de vácuo, Figura 6. Com esse teste se verificou que o teflon permaneceu completamente fixado na base, exibindo um desempenho eficiente.

Figura 6- Cápsula com teflon preenchida com água testada em uma máquina a vácuo.



Fonte: A Autora (2017).

Finalmente, todas as amostras foram colocadas dentro de uma câmara, selada lateralmente com um material laminado, instrumentada com um termo-higrômetro para monitorar a temperatura e a umidade relativa, tendo um ambiente controlado, Figura 7.

Na Figura 7 ilustra-se o início dos ensaios no arranjo inicial. As amostras de lama colocadas na cápsula de vidro sem teflon estão numeradas na metade superior da imagem, e as que possuíam base de teflon estão em sua metade inferior, indicadas com um número seguido por "_T".

Figura 7- Vista superior de todas as amostras e do termo-higrômetro.



Fonte: A Autora (2017).

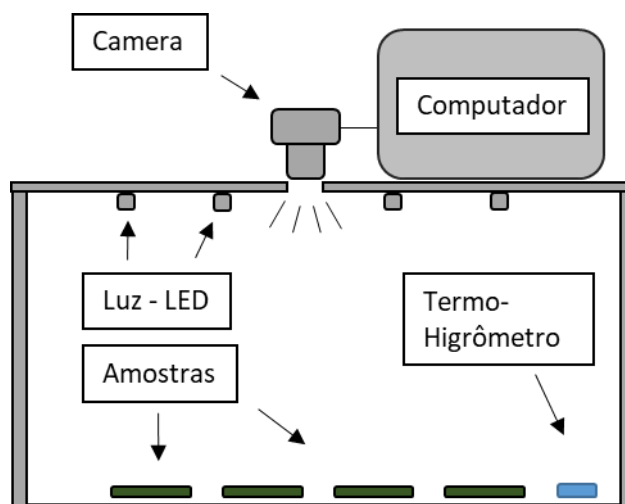
Pode-se observar que, existem inclusões randomicamente inseridas nas amostras com posicionamento semelhante para as diferentes bases. Dessa maneira, seria viável uma investigação não só da presença das inclusões, mas também das diferentes bases de material.

As amostras foram posicionadas sobre um material emborrachado para que fosse mantida a temperatura das amostras individualmente com a mínima influencia da base, mas influenciadas pela temperatura e sucção do ar.

Acima dessa configuração, foi posicionada, no topo da câmara, uma câmera fotográfica fixada por parafusos que enviava as imagens a um computador posicionado ao lado da mesma, Figura 8. A câmera fotográfica foi instalada a uma

distância de 80 centímetros das amostras, o que permitiu observar todas as amostras em conjunto, podendo, assim, verificar a influência das inclusões e das diferentes bases na formação e propagação das fissuras no mesmo tempo e sob as mesmas condições de temperatura e umidade relativa do meio.

Figura 8 - Desenho esquemático da configuração do ensaio experimental



Fonte: A Autora (2017).

2.3 CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL (DIC)

A Correlação de Imagem Digital (DIC) é uma técnica não destrutiva (DZAYE et al., 2018) que tem uma aplicação extensa na Engenharia Civil. Essa técnica tem sido estudada por muitos autores para avaliar o comportamento do dano em diversos materiais, como trincas plásticas no solo (FLEUREAU et al., 2015; LI et al., 2017), fissuras em materiais à base de cimento (AGGELIS et al., 2013; ZHAO; ZSAKI; NOKKEN, 2018), fissuras em paredes (Sandak et al., 2015), em deslizamento de terra (CAPOROSSO; MAZZANTI; BOZZANO, 2018), entre outros.

Nas análises DIC uma função de correlação é utilizada para comparar duas imagens e calcular deformações (MCCORMICK; LORD, 2010). É uma técnica muito utilizada para avaliar o comportamento do craqueamento por retração plástica auxiliando na análise de deslocamentos por um mapa de contorno de deformações (AGGELIS et al., 2013) e no entendimento dos efeitos de parâmetros como temperatura, teor de água e rugosidade do substrato (ZHAO; ZSAKI; NOKKEN, 2018).

Como uma forma de avaliar as observações quantitativas, a Correlação de Imagem Digital (DIC) permite medir os deslocamentos e as deformações na superfície do material (ĐUREJE; PROŠEK, 2017; HARILAL; VYASARAYANI; RAMJI, 2015; HARILAL R; RAMJI M, 2014).

No presente trabalho, foi utilizado um programa 2D DIC Ncorr de código aberto programado em MATLAB e desenvolvido no Georgia Institute Technology, EUA. O Ncorr utiliza “*Inverse Compositional Gauss-Newton (IC-GN)*”, que é um método iterativo eficiente (BLABER; ADAIR; ANTONIOU, 2015), rápido, robusto e preciso na medição de deslocamentos em comparação com o método Newton-Raphson (HARILAL R; RAMJI M, 2014).

Este programa possui um algoritmo baseado em subconjuntos, capaz de estimar deslocamentos e campos de deformação de diferentes imagens. Os algoritmos DIC baseados em subconjuntos particionam a imagem de referência em fragmentos menores, como subconjuntos ou sub-janelas, nas quais as deformações são assumidas homogêneas (BLABER; ADAIR; ANTONIOU, 2015). Para isso, esse algoritmo necessita de uma calibração inicial para mapear uma imagem em termos de pixels (HARILAL; VYASARAYANI; RAMJI, 2015).

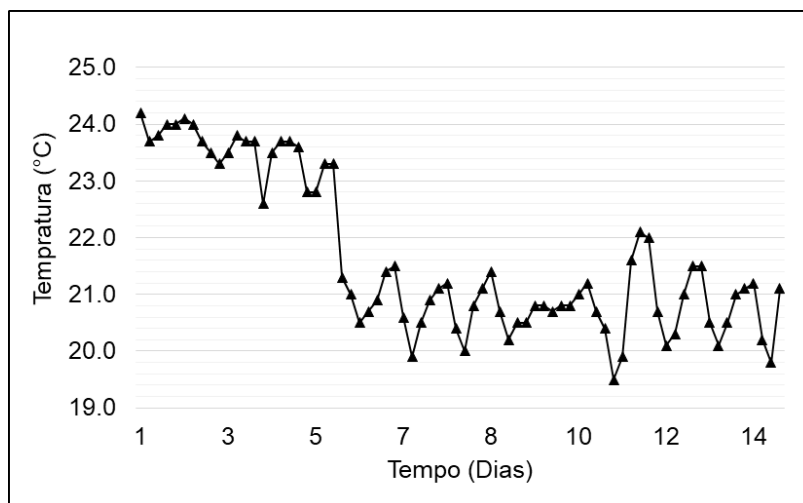
Para correlacionar imagens usando o programa Ncorr, um grupo de imagens para cada amostra, usando um raio de 10 subconjuntos, foi usado para mostrar o principal fenômeno não observado a olho nu, como a iniciação de microfissuras e deformações que indicam onde vai se formar uma fissura, antes mesmo de ela ser detectada pelo olho humano.

2.5 ANÁLISE QUALITATIVA

Após a instalação das amostras dentro da câmara fechada, a evaporação do solo foi iniciada pela superfície e, após alguns dias, variando para as amostras avaliadas, as fissuras iniciaram. A formação de fissuras ocorre devido à redução de volume do solo associada à temperatura e à humidade relativa do ar, que geram uma sucção total.

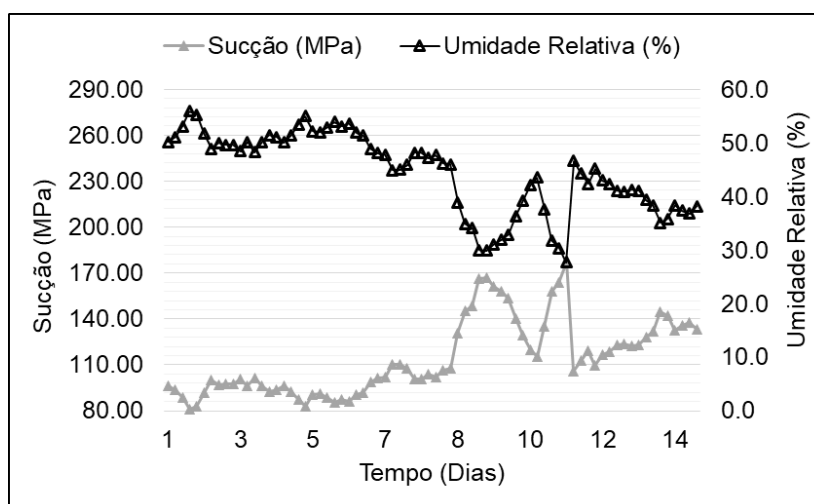
A temperatura no interior da câmara foi de 23.5 ± 1 °C para os primeiros 5 dias, e de 20.8 ± 1.4 °C para os últimos 9 dias. A humidade relativa inicial e final foi de cerca de $46 \pm 5\%$ e $40 \pm 5\%$, respectivamente, como ilustrado na Figura 9 e na Figura 10, respectivamente.

Figura 9 - Comportamento de temperatura durante o ensaio de ressecamento



Fonte: A Autora (2017).

Figura 10 - Comportamento de sucção e umidade relativa durante o ensaio de ressecamento



Fonte: A Autora (2017).

Na Figura 10 pode ser observado que a sucção acompanha o comportamento da umidade de maneira inversa, quando a umidade reduz, a sucção do ar aumenta, conforme a equação a seguir:

$$h = \left(\frac{RT}{Mg} \right) \frac{\ln H}{100} \quad (1)$$

Sendo h a sucção total, R a constante universal dos gases, T a temperatura, M o peso molecular da água, g a aceleração da gravidade e H a umidade relativa do ar.

Algumas imagens foram selecionadas para detalhar a formação e propagação das fissuras, nelas as setas brancas mostram o momento da iniciação de algumas fissuras e o encontro com outras, Figura 11.

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos nas amostras de No. 1-7 (sem a camada de teflon na parte inferior da amostra) em vários momentos. O número da amostra e o tempo decorrido (desde o início do ensaio) são indicados abaixo de cada imagem. Para a amostra No. 1, observou-se que as fissuras apareceram primeiro perto da borda da amostra, Figura 11(1.a), depois apareceram no centro em direção à borda e entre o centro e a borda, Figura 11(1.b). Pode-se observar também que as fissuras secundárias foram formadas poucas horas após a aparição das primeiras fissuras, Figura 11(1.c). Embora as primeiras fissuras tenham aparecido próximo às bordas, as maiores foram concentradas no centro da amostra, Figura 11(1.d).

Para a amostra No. 2, que foi incluída no meio da amostra, surgiram inicialmente fissuras próximas à borda, Figura 11 (2.a). Fissuras secundárias surgiram após algumas horas e também pequenas fissuras mais próximas do centro, Figura 11(2.b) e 3 (2.c); em seguida, algumas fissuras se propagaram aleatoriamente em direção à inclusão, Figura 11(2.d)

No caso da amostra No. 3, surgiram fissuras próximas à borda e também aleatoriamente no meio da amostra, como visto nas Figura 11(3.a) e 3 (3.b). Poucas horas após as aparições dessas primeiras fissuras, as fissuras secundárias iniciaram a partir da inclusão da Figura 11(3.c) e aderiram à primeira rede de fissuras (Figura 11(3.d)).

Um comportamento semelhante foi observado com a amostra No. 4, embora tenha se formado uma fissura próximo a uma inclusão (Figura 11(4.a)). Ao mesmo tempo em que outras fissuras surgiram aleatoriamente, ainda, percebe-se que as fendas se concentraram perto de uma inclusão na parte superior da imagem, Figura

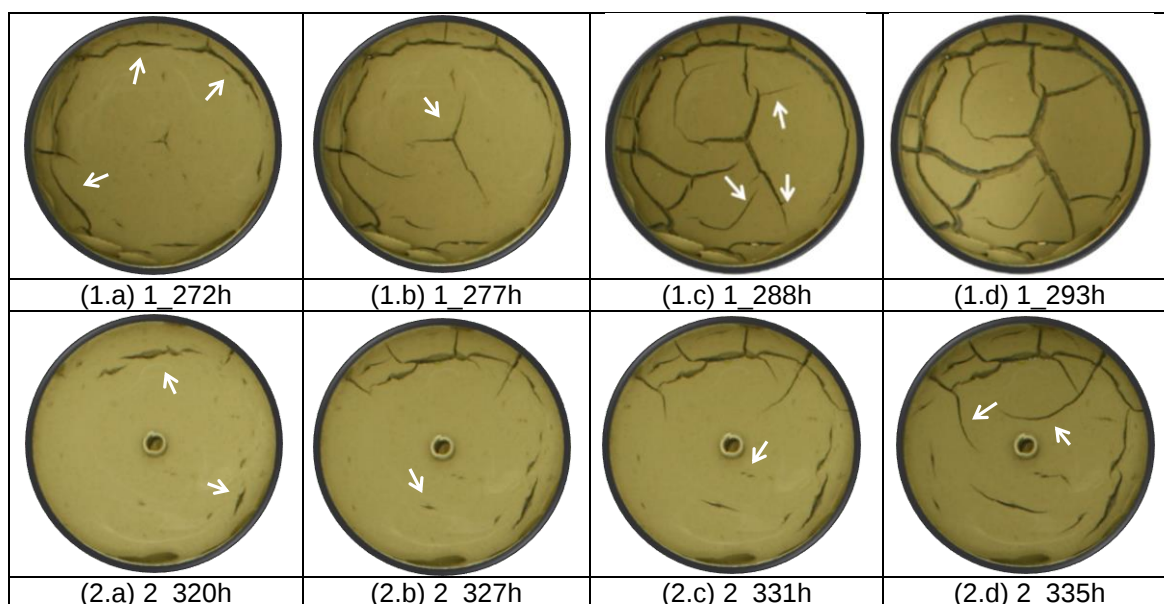
11(4. b) e 3 (4.c), e duas fissuras surgiram próximas à inclusão na parte inferior da imagem posteriormente, Figura 11(4.d).

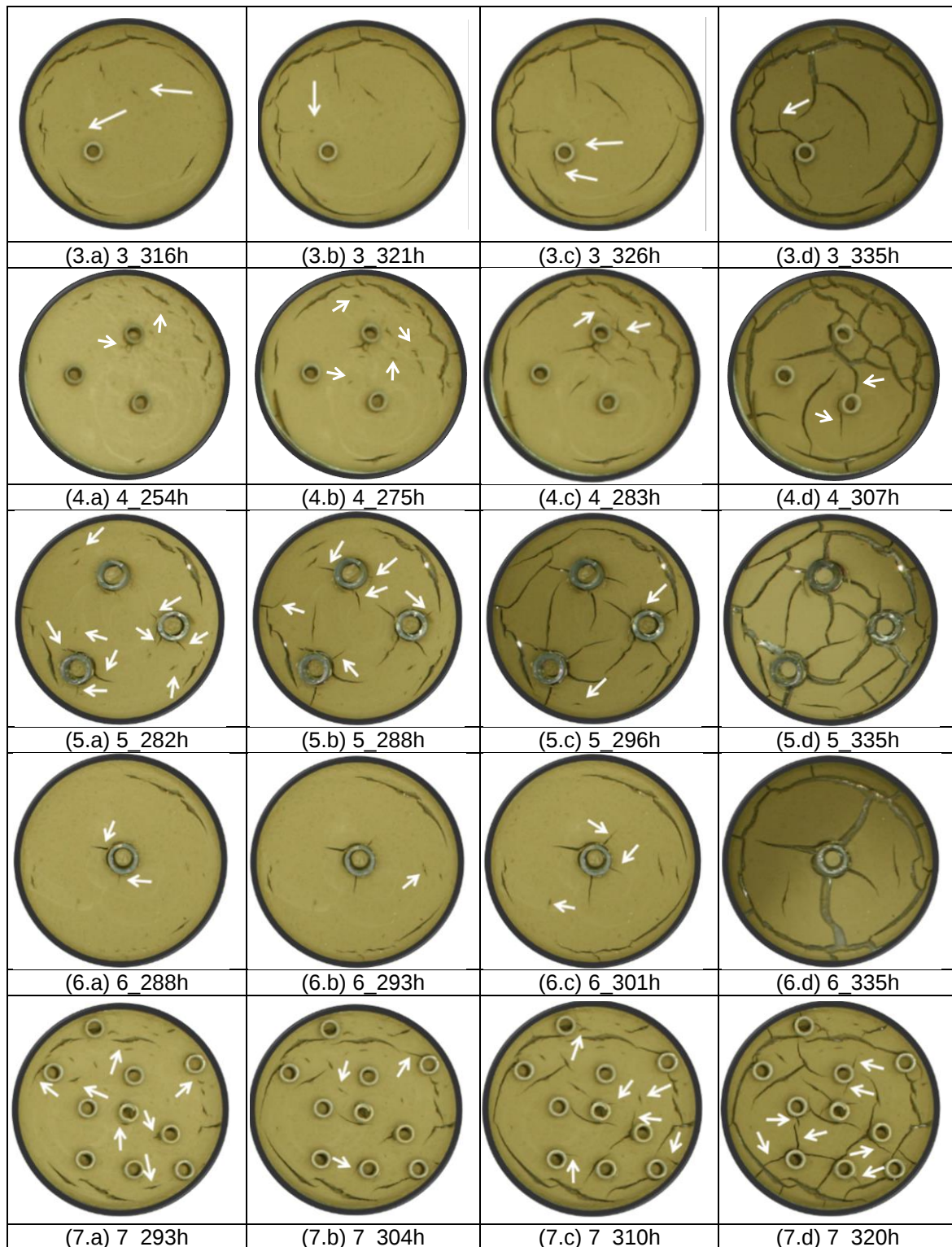
Para a amostra No. 5, que contém três grandes inclusões, quase todas as fissuras foram iniciadas próximas às inclusões e próximas da borda, Figura 11(5.a-c). A amostra No. 6 contém apenas uma grande inclusão em seu centro e fissuras foram iniciadas igualmente a partir da inclusão e da borda da amostra.

Os resultados obtidos na amostra No. 7, contendo dez pequenas inclusões, são semelhantes aos obtidos com pequenas inclusões, com fissuras iniciadas perto da borda e depois aleatoriamente dentro da amostra perto das inclusões.

Em resumo, os resultados obtidos nas amostras No. 1-7 (sem teflon na parte inferior da amostra) mostram que as trincas foram iniciadas primeiro na borda das amostras e na da amostra sem inclusões elas iniciaram aleatoriamente no seu interior. Observou-se que a presença de pequenas inclusões (10 mm de diâmetro) influenciou na aparição e no desenvolvimento da rede de trincas. No entanto, quando grandes inclusões estão presentes (15 mm de diâmetro), fissuras são iniciadas na borda da amostra e a partir das inclusões, influenciando bastante no desenvolvimento das fissuras. Isso mostra que tanto a borda quanto as inclusões representaram pontos de fragilidade do solo, desenvolvendo fissuras, que são consequências da concentração de tensões de tração na superfície das amostras.

Figura 11 - Ensaio de ressecamento para as amostras 1, 3, 4, 5, 6 e 7 em 4 momentos diferentes





Fonte: A Autora (2017).

Os resultados obtidos para as amostras No. 1T-7T (com uma camada de teflon na parte inferior da amostra) são mostrados na Figura 12. Para o caso da amostra No. 1T (sem inclusão, Figura 12(1), fissuras iniciaram exclusivamente na borda e o

diâmetro da amostra retraiu progressivamente. Além disso, ao contrário da amostra No. 1, não foram observadas fissuras no interior das amostras.

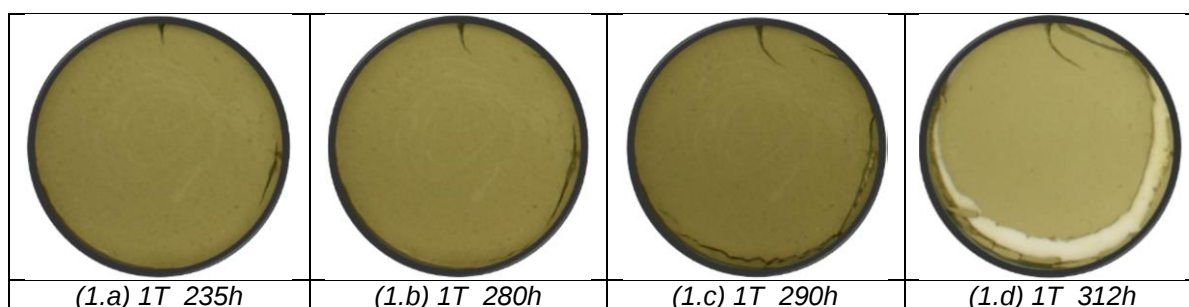
Para o caso de amostras que possuem uma ou três pequenas inclusões (Figura 12 (2-4), um comportamento semelhante foi observado (fissuras se desenvolveram na borda e reduziram o diâmetro da amostra). No entanto, no final do ensaio, uma pequena fissura é formada a partir de cada inclusão como desenvolvimento de fissuras secundárias.

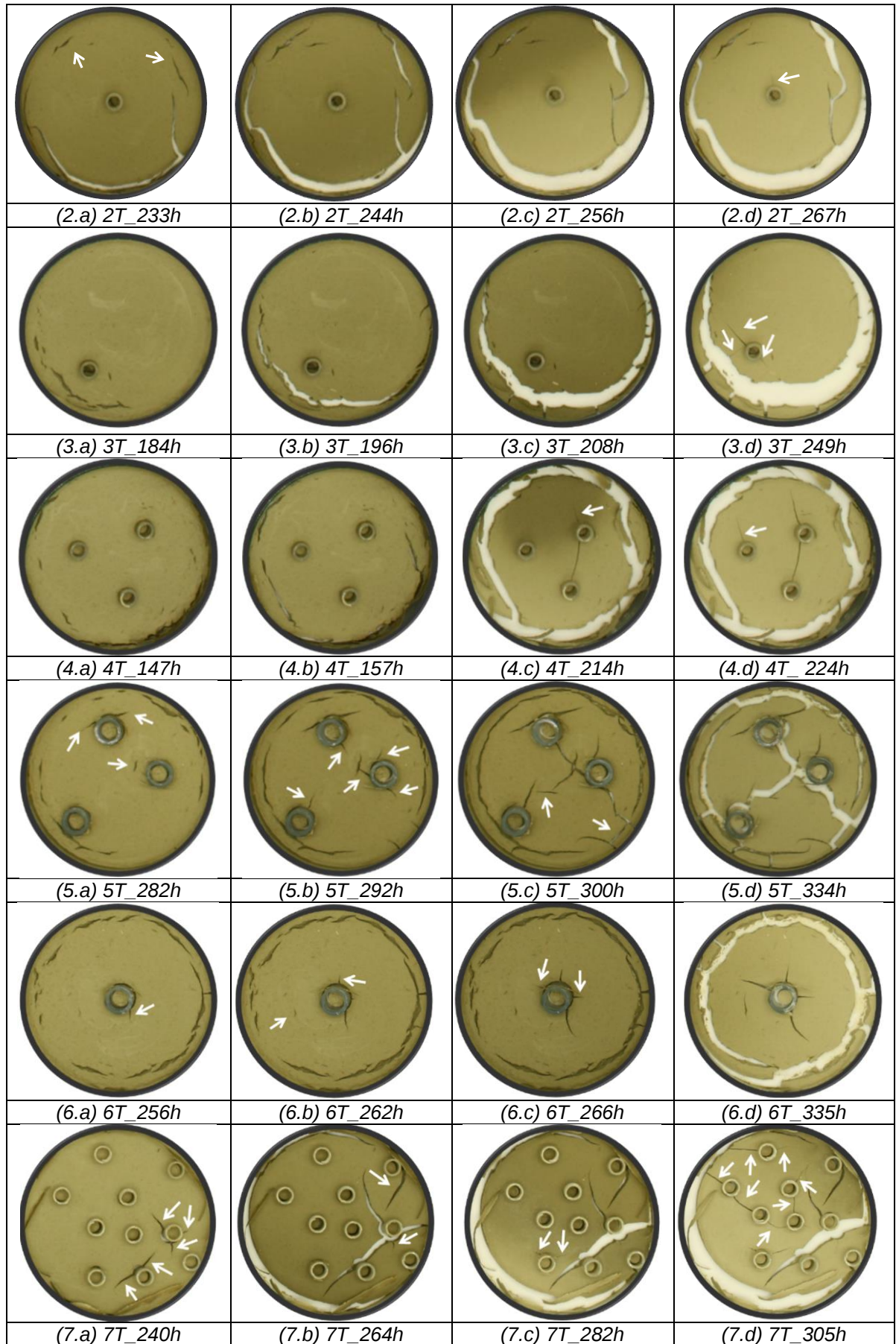
Para o caso de amostras que incluem grandes inclusões (Figura 12 (5-6), além das fissuras desenvolvidas na borda da amostra, várias fissuras iniciaram ao mesmo tempo a partir das inclusões.

Finalmente, para o caso da amostra com dez pequenas inclusões na Figura 12 (7), fissuras iniciaram a partir da borda e também de algumas inclusões onde várias inclusões foram colocadas próximas umas das outras. No entanto, mesmo até o final do ensaio, geralmente havia apenas uma ou duas fissuras desenvolvidas a partir de cada inclusão.

Comparadas às amostras sem a base de teflon, a maioria das amostras com a base de teflon apresentaram um número menor de trincas no final do ensaio e a abertura da trinca na borda da amostra foi mais dominante. Isso ocorreu devido à redução do atrito entre o solo e o teflon, que permitiu uma liberdade maior do solo retrair livremente.

Figura 12 - Ensaio de ressecamento para amostras 1T, 3T, 4T, 5T, 6T e 7T em 4 instantes diferentes





Fonte: A Autora (2017).

Por fim, na Figura 13 está apresentado o comportamento de todas as amostras no momento inicial e final. Nessa Figura 13, observa-se, claramente, que as amostras com base de teflon reduziram de diâmetro, com as maiores fissuras localizadas próximas à borda para a maioria dos casos.

Figura 13 - Visão geral de todas as amostras no (a) início e no (b) final do ensaio de secagem, 335h



Fonte: A Autora (2017).

2.6 ANÁLISE QUANTITATIVA ATRAVÉS CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS (DIC)

As imagens foram, então, correlacionadas a partir do programa Ncorr no MATLAB, que permitiu realizar análises quantitativas das deformações das amostras a partir da Correlação Digital de Imagens (DIC).

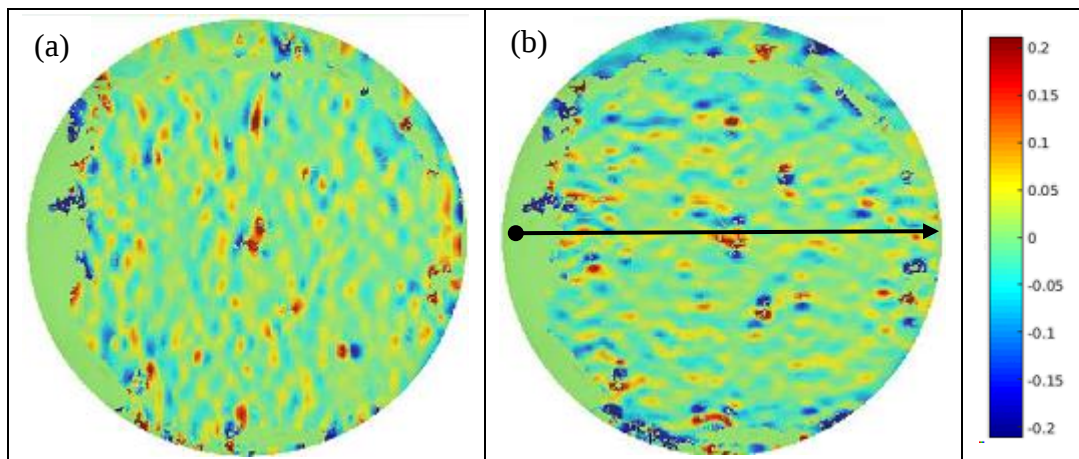
2.6.1 Avaliação da formação das fissuras

A Figura 14 ilustra o resultado em gráfico de cores das deformações horizontais, ε_{xx} , e verticais, ε_{yy} , para amostra No.1, onde é apresentado o comportamento da amostra durante 35h de secagem antes das fissuras começarem a se desenvolver no centro.

Na Figura 14.a observa-se que mesmo sem o desenvolvimento de fissuras no centro da amostra, a análise DIC é capaz de mostrar a concentração de ε_{xx} nessa posição.

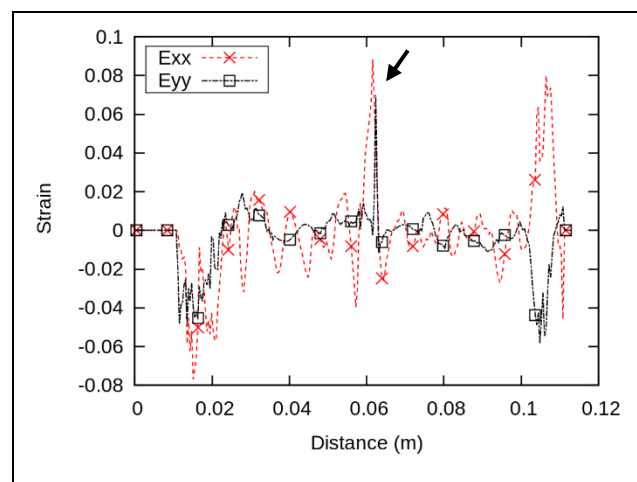
A Figura 14.b apresenta ε_{yy} concentrada no centro da amostra, e o segmento preto representado foi analisado na Figura 15, onde pode-se notar que tanto a maior quanto a menor ε_{xx} e ε_{yy} estão concentradas no centro, identificadas por uma seta, com cerca de $[-0.01;0.07]$ e $[-0.04;0.09]$, e próximo à borda cerca de $[-0.05;0.02]$ e $[-0.08;0.08]$, respectivamente.

Figura 14 - (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada por seguimento preto para amostra No.1



Fonte: A Autora (2019).

Figura 15 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No. 1 provenientes do seguimento pré-estabelecido com indicações da seta representando deformações no centro

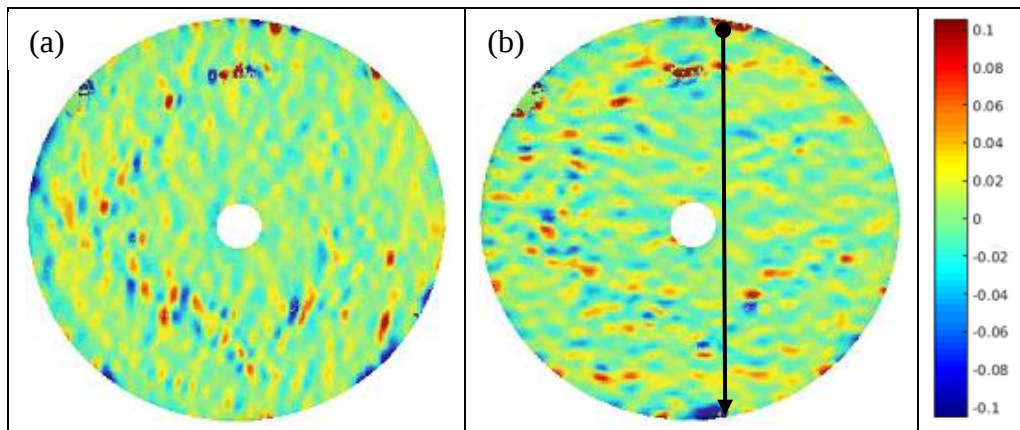


Fonte: A Autora (2019).

A Figura 16 ilustra o comportamento da amostra No.2 durante 20h, com a imagem de referência sem nenhuma fissura e a última imagem com 320h, Figura 11(2.a). Na Figura 16.a observa-se a concentração de ϵ_{xx} entre a inclusão e a borda da amostra, o que também pode ser visto na Figura 16.b para ϵ_{yy} .

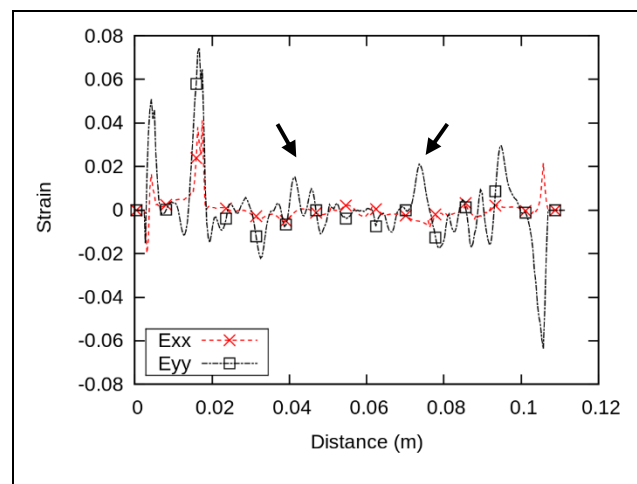
A Figura 17 caracteriza ϵ_{xx} e ϵ_{yy} oriundos do seguimento preto presente na Figura 16.b. Analisa-se que as maiores deformações se concentram próximas da borda, e através da análise das deformações através do segmento, observa-se que ϵ_{xx} tem uma leve variação, enquanto que ϵ_{yy} varia em maior intensidade, apontados com setas, onde as fissuras irão se desenvolver posteriormente, Figura 11(2).

Figura 16 - (a) ϵ_{xx} (b) ϵ_{yy} e indicação da seção analisada por seguimento preto para amostra No.2



Fonte: A Autora (2019).

Figura 17 - ϵ_{xx} e ϵ_{yy} para amostra No. 2 provenientes do seguimento pré-estabelecido



Fonte: A Autora (2019).

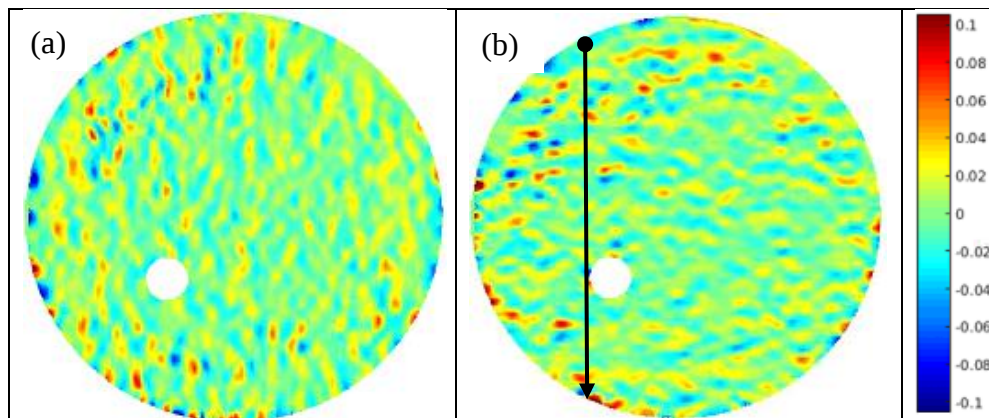
A Figura 18 apresenta ϵ_{yy} e ϵ_{xx} para a amostra No.3 em um intervalo de 20h, de 247h até 267h, quando ainda não havia fissuras. Nesse momento, não era possível

observar a olho nu a posição onde as fissuras iriam surgir. Ainda assim, a Figura 18.a mostra uma concentração de ε_{xx} na parte superior e inferior da amostra, enquanto a Figura 18.b mostra a concentração de ε_{yy} próximo à inclusão.

O segmento preto indica a seção analisada na Figura 19, que mostrou que existem maiores valores de ε_{xx} próximo da borda, enquanto que para ε_{yy} as maiores estão na parte superior da amostra, com variações por todo o segmento.

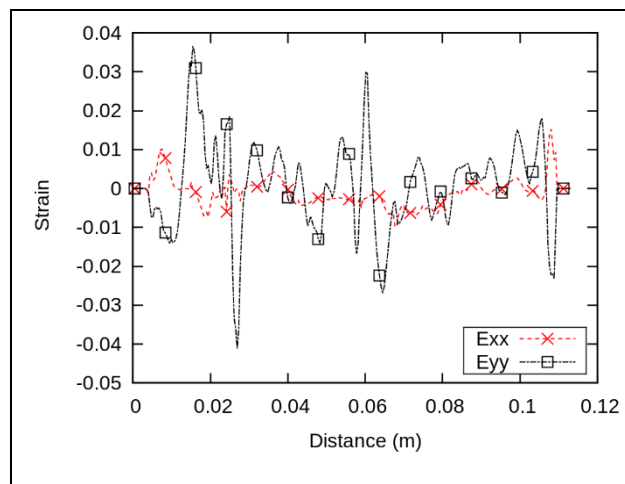
Para a amostra No.4, a Figura 20 apresentou seu comportamento durante 50h de secagem com a imagem inicial de referência para essa análise sem a presença de rachaduras, e a última imagem sem rachaduras próximas da inclusão, mas com algumas já iniciadas próximo à borda na região superior direita da amostra.

Figura 18 - (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.3



Fonte: A Autora (2019).

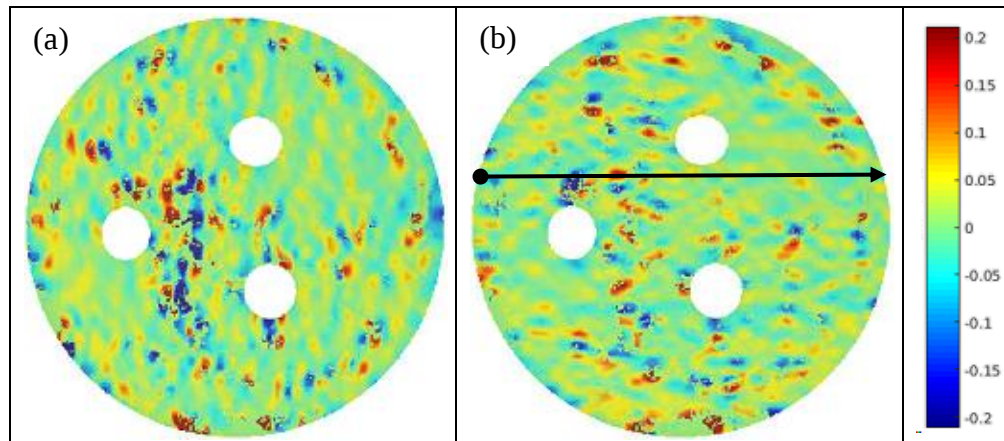
Figura 19 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No. 3 provenientes da seção pré-estabelecida



Fonte: A Autora (2019).

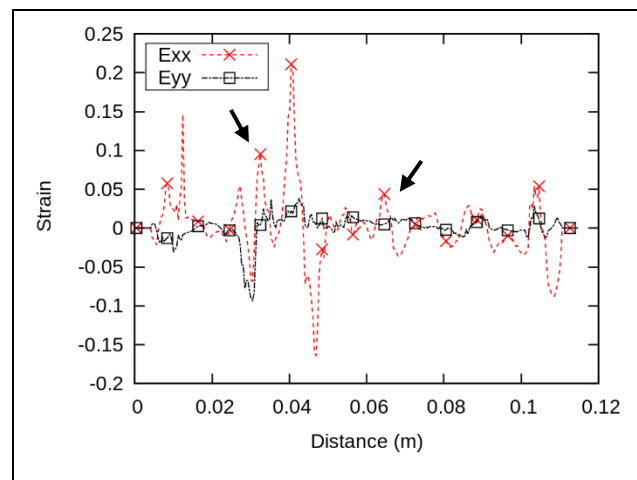
A Figura 20.a mostra ε_{xx} concentrado próximo à borda, no lado direito da inclusão localizada e entre inclusões. A Figura 20.b mostra um comportamento análogo para ε_{yy} , além de indicar, por um seguimento preto, a seção que será analisada na Figura 21.

Figura 20 - (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.4



Fonte: A Autora (2019).

Figura 21 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No.4 provenientes do seguimento pré-estabelecido



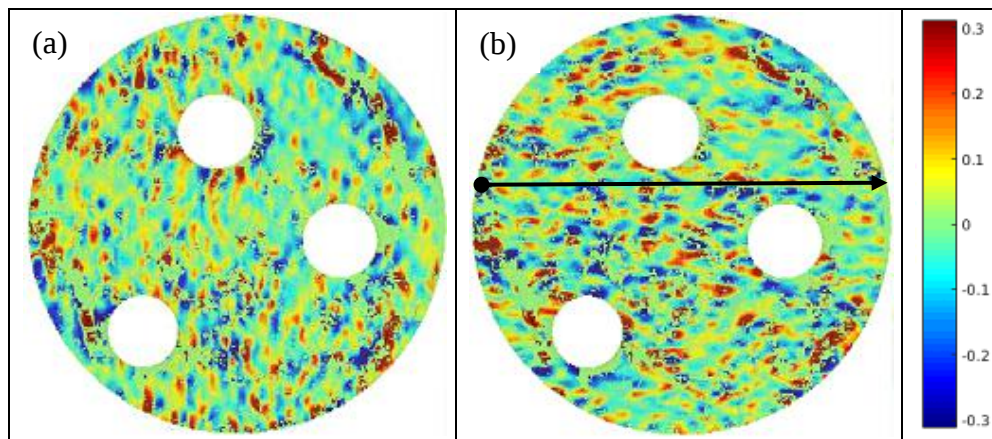
Fonte: A Autora (2019).

Na Figura 21 pode-se confirmar que as maiores deformações estão concentradas perto da inclusão localizada mais à esquerda, indicadas por uma seta, onde mais tarde fissuras se desenvolveram. Além disso, abaixo da inclusão localizada na parte superior da amostra (topo), posição 0,065 m, ε_{xx} foi cerca $[-0,04; 0,04]$, o que induziu, posteriormente, um desenvolvimento de uma trinca, Figura 11(3.a).

Da mesma forma que o No.4, o No.5 possui a concentração de ε_{xx} , Figura 22.a, e ε_{yy} , Figura 22.b, entre as inclusões, no entanto, elas também são distribuídas aleatoriamente por toda a amostra.

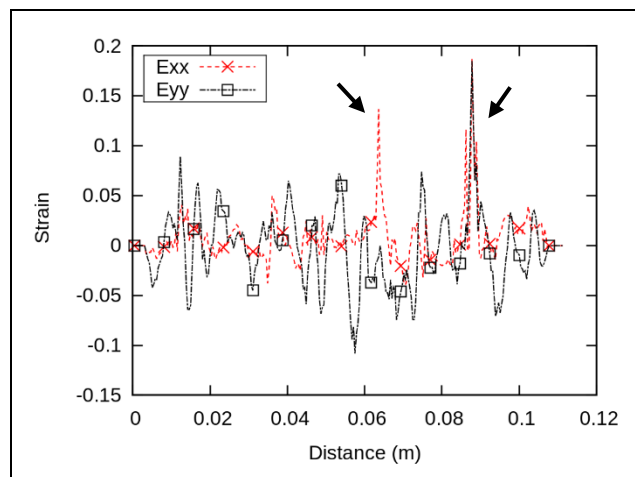
A Figura 23 ilustra as deformações sobre o seguimento preto da Figura 22.b durante 45 horas de dessecação até 282h, Figura 11(5.a).

Figura 22 - (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.5



Fonte: A Autora (2019).

Figura 23 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No.5 provenientes do seguimento pré-estabelecido

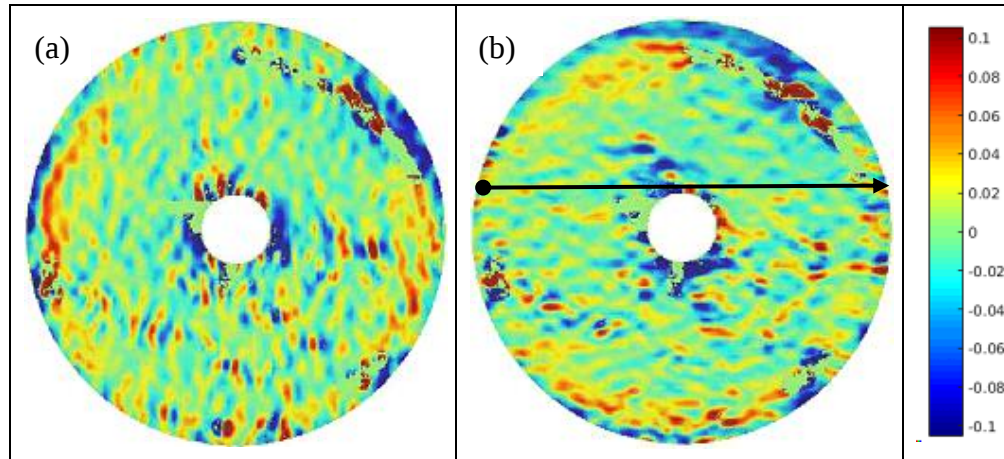


Fonte: A Autora (2019).

Observa-se que mesmo com uma distribuição aleatória de deformação abaixo da inclusão no topo, há um ε_{xx} sobressalente de cerca de 0,14 e 0,19 acima da inclusão à direita, indentificadas com setas, onde, posteriormente, as rachaduras se desenvolveram, Figura 11(5.b).

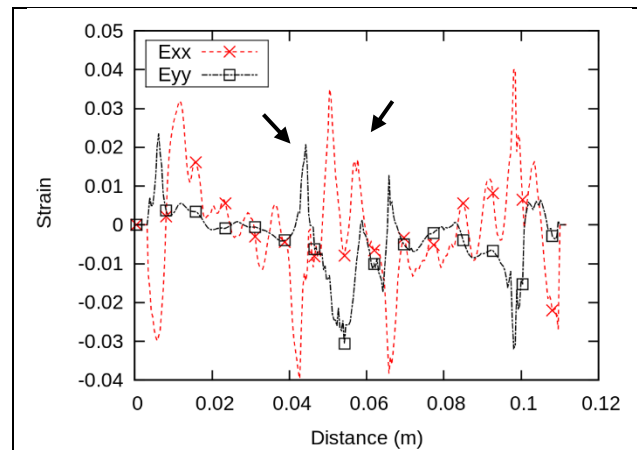
Para a amostra No.6 a avaliação foi feita com 40h de intervalo, com a última imagem tirada às 288h, Figura 11 (6.a). No.6 mostra a concentração de ε_{xx} , Figura 24.a, e ε_{yy} , Figura 24.b, próximo da borda e ao redor da inclusão, apontado na Figura 25 por setas.

Figura 24 - (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.6



Fonte: A Autora (2019).

Figura 25 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No.6 provenientes do seguimento pré-estabelecido



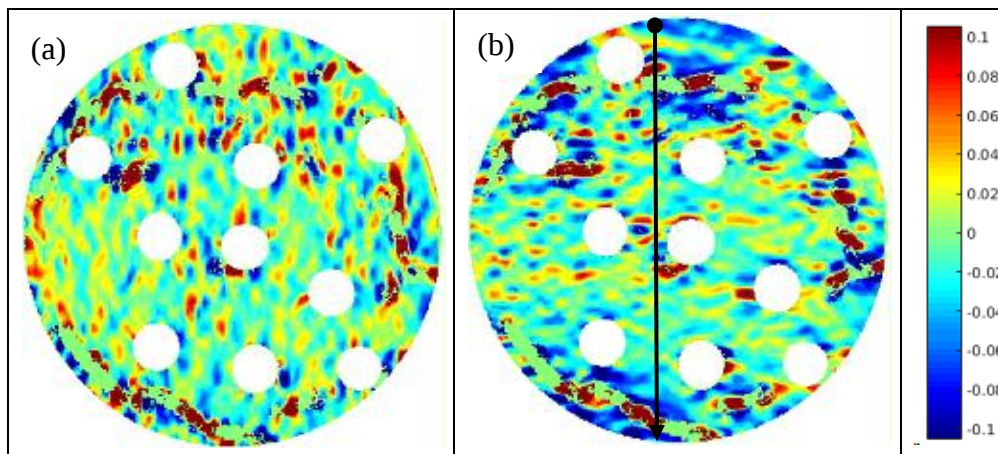
Fonte: A Autora (2019).

Na Figura 25 ε_{yy} e ε_{xx} concentram-se em ambas laterais da amostra com $[-0.03; 0.035]$ e $[-0.03; 0.02]$ em média, respectivamente, enquanto que próximo da inclusão, apontada por setas, as deformações são limitadas por $[-0.04; 0.035]$ para ε_{xx} e por $[-0.03; 0.02]$ para ε_{yy} , onde as fissuras posteriormente se desenvolvem, Figura 11(6.b) e Figura 11(6.c).

A última amostra deste primeiro grupo de amostras é a No.7, a qual ε_{yy} e ε_{xx} estão ilustradas na Figura 26 representando 17h de ressecamento, com a última imagem a 293h, Figura 11(7.a). A Figura 26.a apresenta maior concentração de ε_{xx} próximo de cada inclusão, assim como a Figura 26.b para ε_{yy} .

A última amostra deste primeiro grupo de amostras é a No.7, a qual ε_{yy} e ε_{xx} estão ilustradas na Figura 26 representando 17h de ressecamento, com a última imagem a 293h, Figura 11(7.a). A Figura 26.a apresenta maior concentração de ε_{xx} próximo de cada inclusão, assim como a Figura 26.b para ε_{yy} .

Figura 26 - (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.7



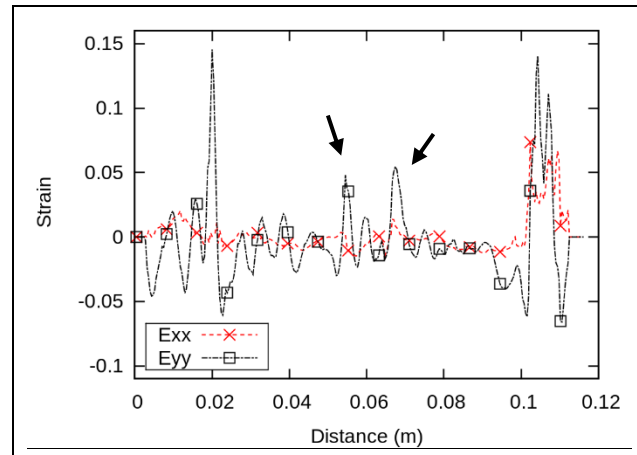
Fonte: A Autora (2019).

A Figura 27 representa ε_{xx} e ε_{yy} através do segmento retratado na Figura 26.b; e setas mostram valores maiores de ε_{yy} , onde posteriormente fissuras se desenvolveram próximo às inclusões no centro, Figura 11(7.b).

A Figura 28 mostra o comportamento da No.1T para 35h de ressecamento, com a última imagem a 235h, Figura 12(1.a). Figura 28.a mostra que ε_{xx} é concentrada aleatoriamente por toda amostra, e ε_{yy} mostra um comportamento similar na Figura 28.b.

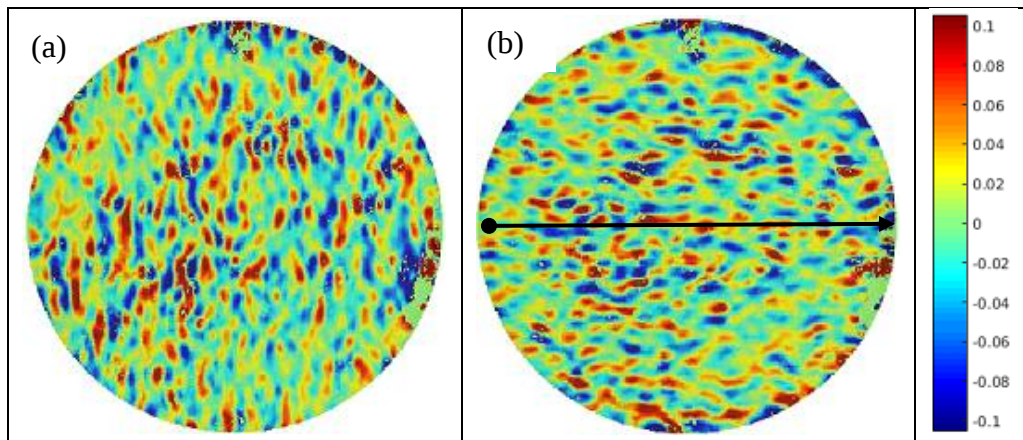
O segmento detalhado na Figura 29 mostra ε_{xx} e ε_{yy} mais concentrado próximo da borda, entorno de $[-0.05; 0.14]$, através do segmento, o que mostra que ε_{xx} quase não sofreu alteração, e ε_{yy} variou ao longo da amostra limitando-se à ± 0.07 .

Figura 27 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No.7 provenientes do seguimento pré-estabelecido



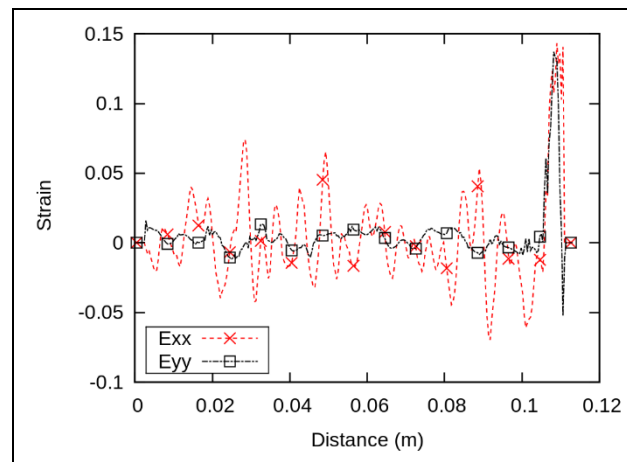
Fonte: A Autora (2019).

Figura 28 - (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.1T



Fonte: A Autora (2019).

Figura 29 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No.1T provenientes do seguimento pré-estabelecido

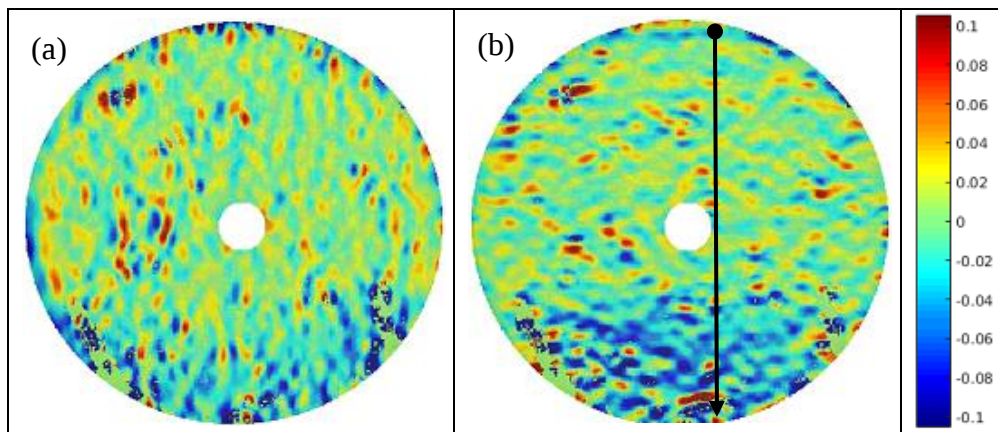


Fonte: A Autora (2019).

Para a amostra No. 2T foi selecionado um período de 20h, de 213h a 233h, Figura 12(2.a). Neste intervalo a Figura 30.a mostra uma concentração de deformações negativas ε_{xx} , similarmente a Figura 30.b mostra o comportamento da No.2T para ε_{yy} .

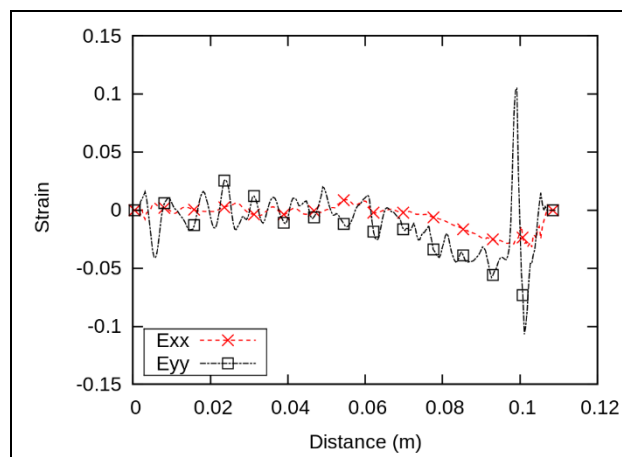
A Figura 31 mostra ε_{xx} e ε_{yy} através do segmento retratado na Figura 30.b, onde há uma leve variação de ε_{xx} e ε_{yy} até o centro da amostra, onde a inclusão está localizada, em seguida ε_{xx} e ε_{yy} voltam a ser predominantemente negativas, exceto por um valor de ε_{yy} , onde uma fissura surge posteriormente na borda.

Figura 30 - (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.2T



Fonte: A Autora (2019).

Figura 31 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No.2T provenientes do seguimento pré-estabelecido

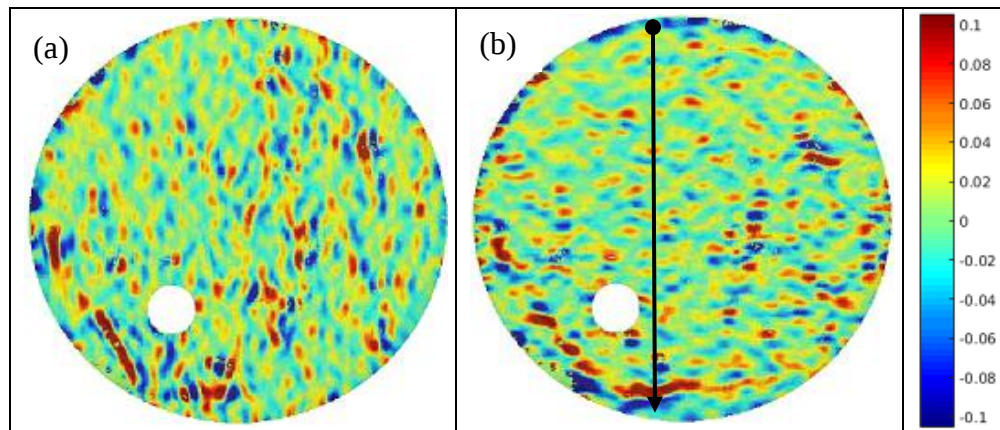


Fonte: A Autora (2019).

Para a amostra No.3T a Figura 32 mostra ε_{xx} e ε_{yy} para um intervalo de 20h com a última imagem de 184h, Figura 12(3.a). Após esse período existem valores

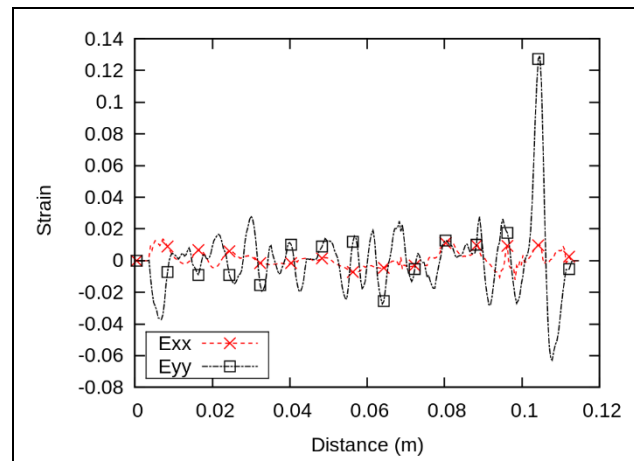
altos de ε_{xx} , na Figura 32.a, e ε_{yy} , na Figura 32.b, na parte do fundo da No.3T vistas a olho nu através das fissuras que surgiram na Figura 12(3.a). No entanto, pelo segmento analisado na Figura 33 ε_{xx} e ε_{yy} variam dentro da amostra limitados por ± 0.017 e ± 0.04 respectivamente.

Figura 32 - (a) ε_{xx} e (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.3T



Fonte: A Autora (2019).

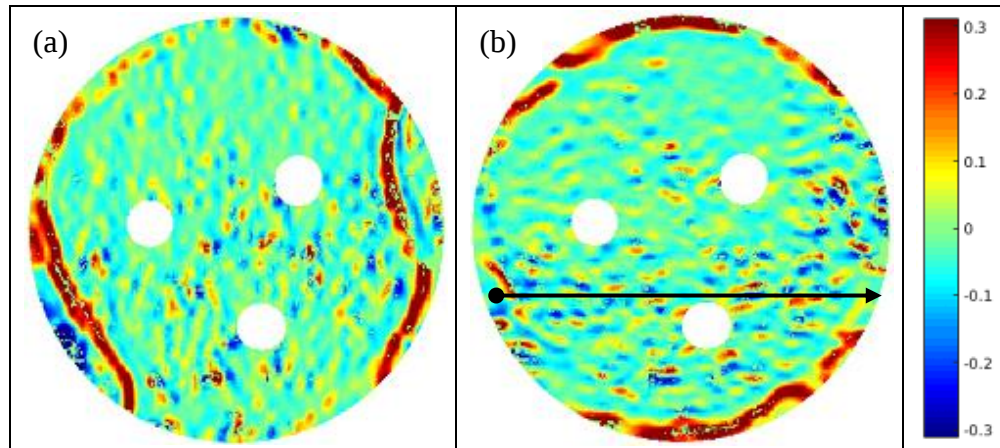
Figura 33 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No.3T provenientes do seguimento pré-estabelecido



Fonte: A Autora (2019).

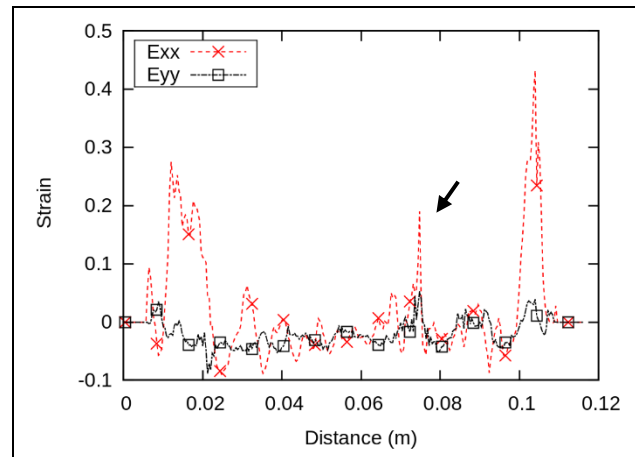
Para a amostra No. 4T foi selecionado 15h de ensaio, com a última imagem em 147h, Figura 12(4.a). No.4T apresentou concentração de ε_{xx} e ε_{yy} próximo da borda na Figura 32.a e na Figura 32.b, respectivamente. Por análise do segmento retratado na Figura 32.b, similarmente ao No.1T, No.2T e No.3T, Figura 33 mostra uma leve variação de ε_{xx} e ε_{yy} ao longo da amostra com maiores concentrações nas bordas. Todavia, próximo à inclusão a 0,7m, apontadas por uma seta, ε_{xx} e ε_{yy} crescem, onde posteriormente uma fissura surge entre as inclusões, Figura 12(4.c).

Figura 34 - (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.4T



Fonte: A Autora (2019).

Figura 35 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No.4T provenientes do seguimento pré-estabelecido



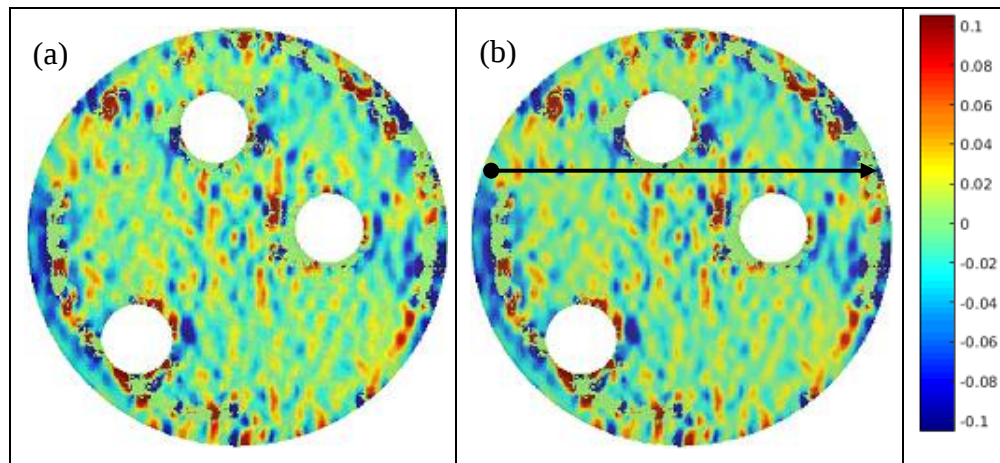
Fonte: A Autora (2019).

Para análise da amostra No.5T foi escolhido um intervalo de 30h com a última imagem em 282h, Figura 12(5.a). Similarmente ao No.4T, a Figura 36 mostra que No.5T apresenta concentração da deformação no meio da amostra, e analisando o segmento detalhado na Figura 37, a presença de deformações no meio das amostras é ilustrado pela oscilação de ε_{xx} e ε_{yy} através do segmento. Na Figura 37, é apontado por uma seta os maiores valores com $[-0.07; 0.045]$ para ε_{xx} e $[-0.03; 0.10]$ para ε_{yy} , onde a fissura posteriormente se desenvolve na parte inferior da inclusão superior, Figura 12(5.b). No lado direito da amostra encontra-se valores similares de ε_{xx} , $[-0.02; 0.06]$, e ε_{yy} $[-0.05; 0.06]$.

Para amostra No.6T a Figura 38 ilustra ε_{xx} e ε_{yy} avaliados para 20h de ressecamento com a imagem de referência sem fissuras e a última imagem às 256h,

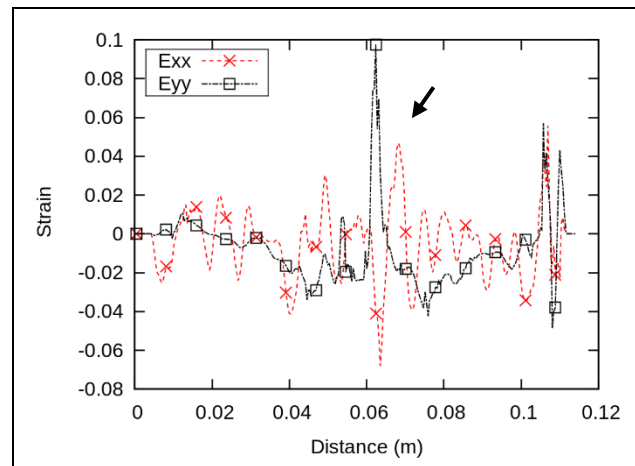
Figura 12(6.a). A Figura 38 mostra que primeiramente temos concentrações de deformação próximas das bordas e ao redor da inclusão.

Figura 36 - (a) ε_{xx} e (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.5T



Fonte: A Autora (2019).

Figura 37 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No.5T provenientes do seguimento pré-estabelecido

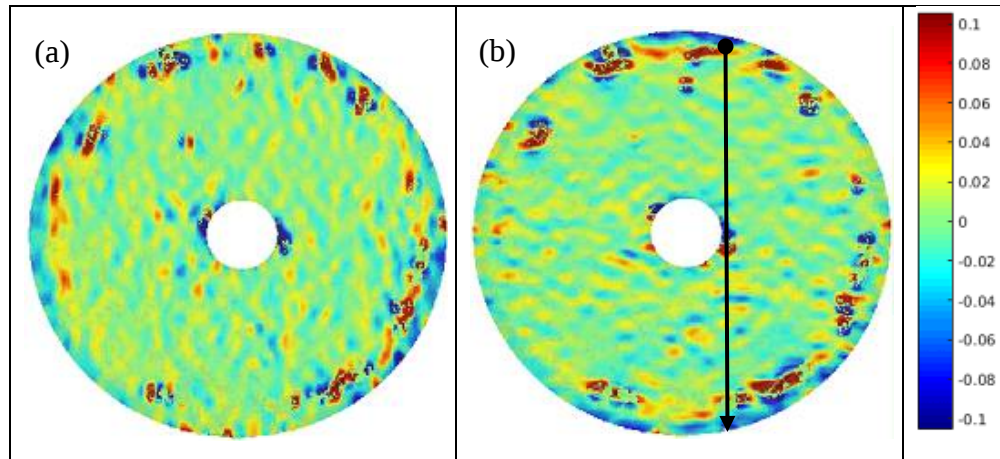


Fonte: A Autora (2019).

Para analisar mais especificamente a influência da inclusão, a Figura 39 mostra as deformações ao longo do segmento ilustrado na Figura 38.b.

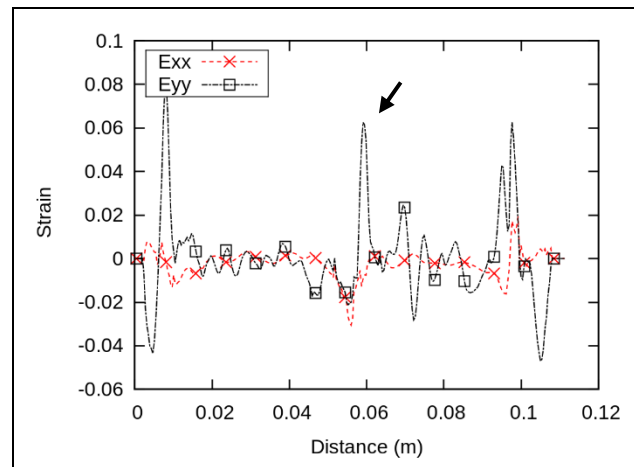
Na Figura 39 No.6T mostra a concentração de ε_{yy} próximo da borda de $[0.041;0.075]$ na parte superior e $[-0.045;0.061]$ na parte inferior, e ao redor da inclusão com $[-0.025;0,061]$, apontados com uma seta, onde uma fissura posteriormente se desenvolve.

Figura 38 - (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.6T



Fonte: A Autora (2019).

Figura 39 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No.6T provenientes do seguimento pré-estabelecido

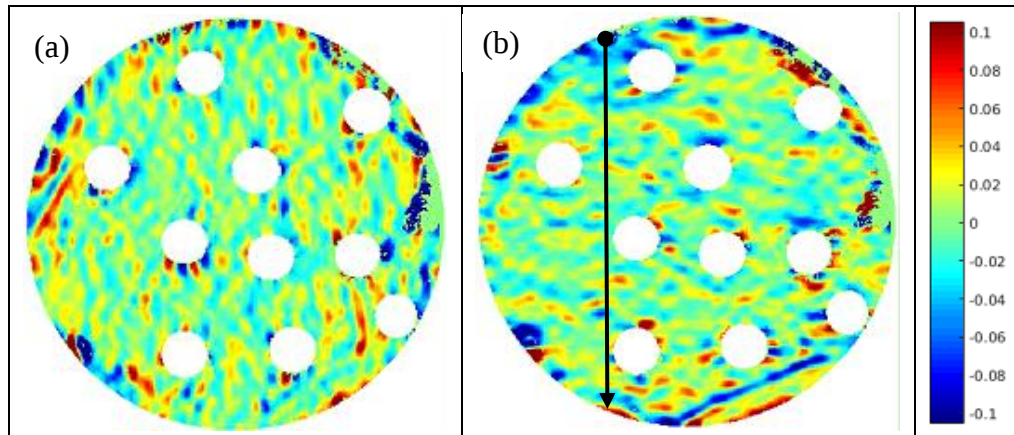


Fonte: A Autora (2019).

A última amostra No.7T tem o comportamento ilustrado na Figura 40, que ilustra ε_{xx} and ε_{yy} após um intervalo de 18h, o qual a última imagem foi selecionada às 240h, Figura 12(7.a). Na Figura 40.a ilustra a concentração de ε_{xx} em torno de cada inclusão, assim como para ε_{yy} na Figura 40.b.

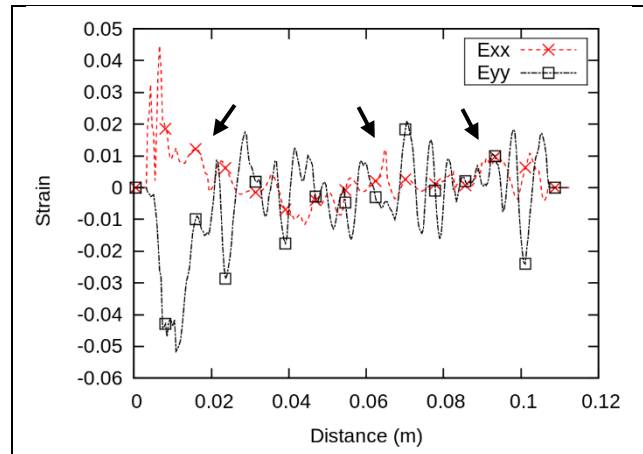
Mais especificamente, a Figura 41 mostra que as deformações variam através do segmento com altos valores próximos da borda, e próximo as inclusões, apontada na Figura 41 por setas. Nesse intervalo avaliado, pode-se observar que há a concentração de deformações no topo da amostra, onde o solo está se deformando tanto lateralmente, quanto verticalmente, o que pode ser verificado mais tarde na Figura 12(7.b).

Figura 40 - (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} e indicação da seção analisada para amostra No.7T



Fonte: A Autora (2019).

Figura 41 - ε_{xx} e ε_{yy} para amostra No.7T provenientes do seguimento pré-estabelecido



Fonte: A Autora (2019).

Em síntese, a análise DIC apresentou algumas características que não são vistas a olho nu como ε_{xx} e ε_{yy} , permitindo a identificação de onde as fissuras se formariam posteriormente.

Enquanto que para amostras com uma pequena inclusão não há alteração no comportamento de retração das amostras, para as amostras com a presença de três ou dez inclusões ε_{xx} e ε_{yy} concentram-se principalmente perto das inclusões, alterando o padrão das fissuras.

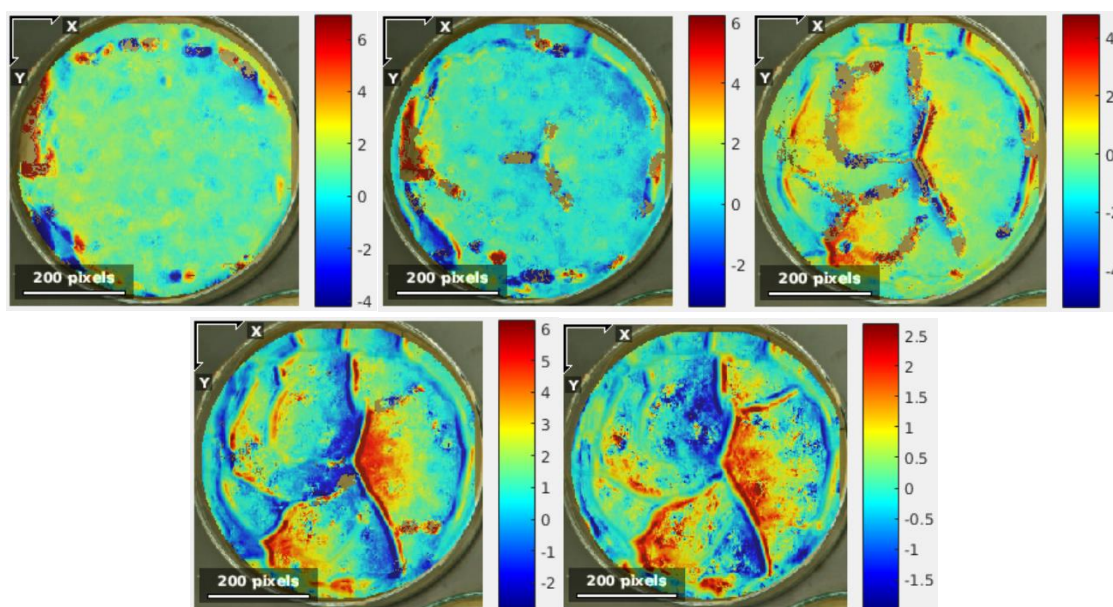
Similarmente, amostras com grandes inclusões apresentaram uma forte influência na distribuição da ε_{xx} and ε_{yy} .

2.6.1 Avaliação da evolução das fissuras

Nessa seção foram escolhidas duas amostras para tornar possível a análise da influência de uma inclusão no centro da amostra. Assim, foram escolhidas ambas amostras com base de vidro, uma sem inclusões, amostra 1, e outra com uma inclusão central, amostra 6.

A análise DIC na Figura 42 foi realizada para a amostra 1 e mostrou que os deslocamentos horizontais foram detectados de maneira eficiente. Além disso, é visível a tendência de propagação das fissuras, o que pode ser útil para prever possíveis interferências das fissuras em estruturas rígidas necessárias à condição de estabilidade estrutural de cenários da Engenharia Civil. De maneira semelhante, os deslocamentos verticais podem ser observados na Figura 43.

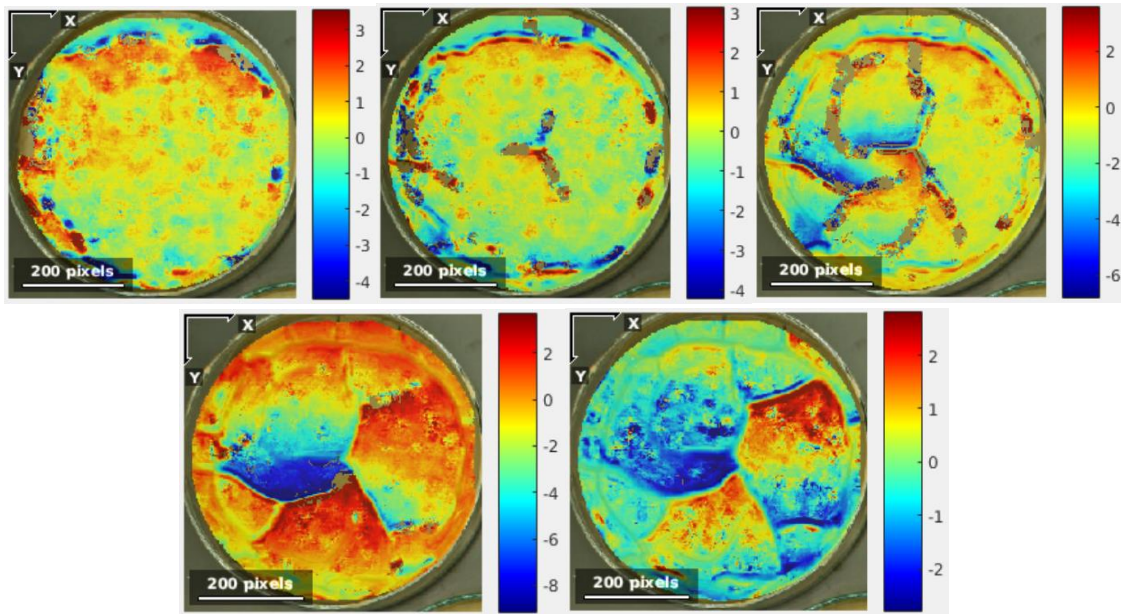
Figura 42 - Deslocamentos horizontais para a amostra No.1, em pixels, para (a) 272h, (b) 277h, (c) 285h, (d) 288h, e (e) 293h



Fonte: A Autora (2019).

Outra análise possível do comportamento da amostra No.1 é a concentração de deformações por tração ou por compressão. Esse resultado pode ser visualizado na Figura 44, que mostra alguns pontos de compressão entre as faturas como, por exemplo, o ponto “p”.

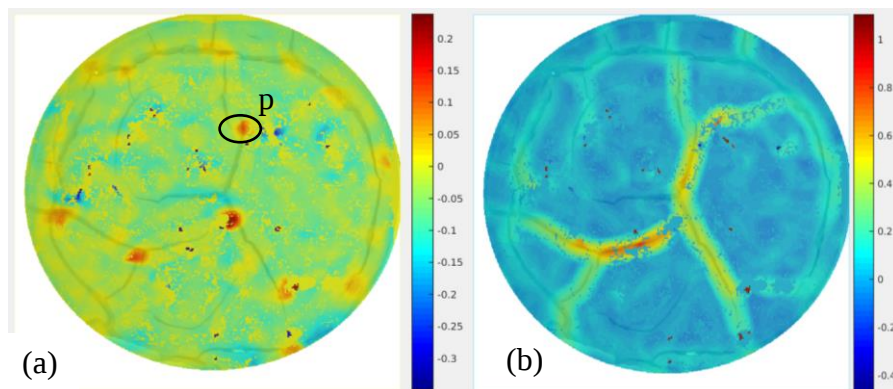
Figura 43 - Deslocamentos verticais para a amostra No.1, em pixels, para (a) 272h, (b) 277h, (c) 285h, (d) 288h, e (e) 293h



Fonte: A Autora (2019).

Ainda com relação às deformações sofridas pela amostra No.1, a Figura 45 mostra deformações horizontais entre 288h, Figura 11(1.c), e 293h, Figura 11 (1.e), de ensaio.

Figura 44 - Deformação principal (a) mínima (compressão) e (b) máxima (tração)

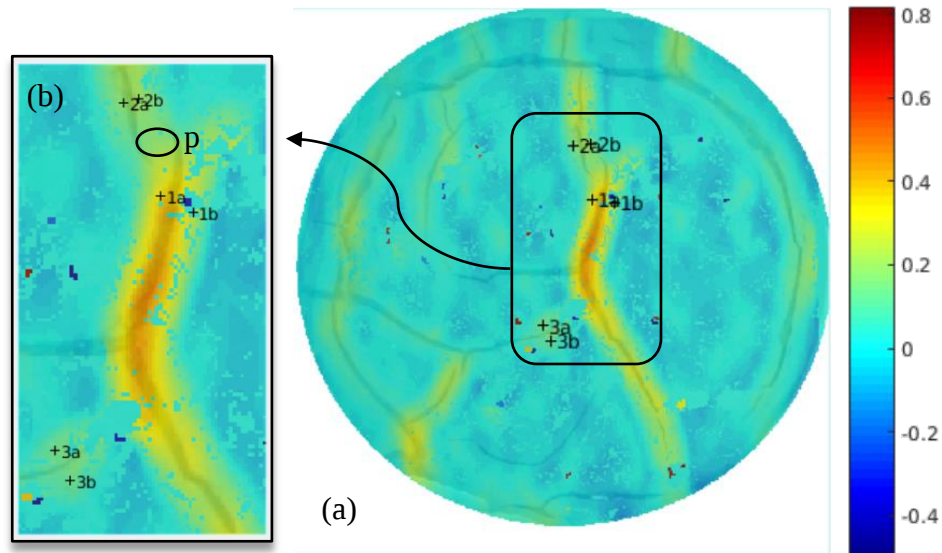


Fonte: A Autora (2019).

Pode ser observado nessa Figura 45 que o ponto “p” da figura anterior se encontra com valores de deslocamento de aproximadamente zero. Os extensômetros foram, então, locados em regiões onde as deformações por tração se concentraram, mostrados na Figura 45.b.

Diante desses resultados, foram plotados gráficos do deslocamento da amostra através dos extensômetros 1, 2, e 3, locados na Figura 45.

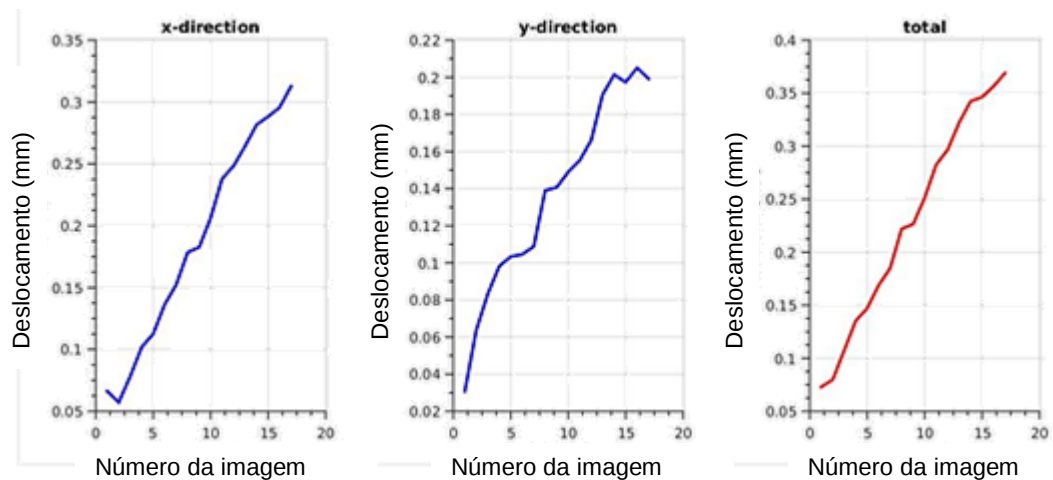
Figura 45 – (a) Deslocamento horizontal (m) da amostra No.1 entre 288h e 293h de ensaio com 3 extensômetros virtuais locados e (b) zoom



Fonte: A Autora (2019).

O extensômetro número 1, Figura 46, mostrou que o crescimento da abertura da fissura foi em torno de 0.37 mm, com taxa de crescimento reduzindo, mas ainda crescente.

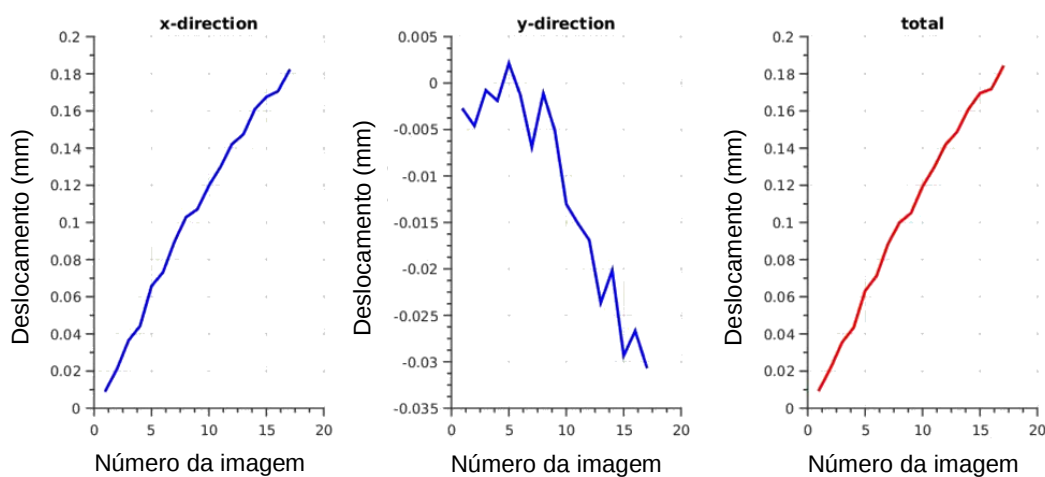
Figura 46 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 1a e 1b



Fonte: A Autora (2019).

De maneira semelhante, o extensômetro número 2, Figura 47, mostrou uma evolução da abertura nesse período de até 0.18 mm. Verifica-se, ainda, uma taxa de crescimento dos deslocamentos totais para o extensômetro 2 de 0.06 mm a cada 5 imagens, como cada imagem tem um intervalo de 50 minutos, nessa análise, a taxa de crescimento é de 1.4×10^{-2} mm/h, já para o extensômetro 1 foi de 3.6×10^{-2} mm/h, aproximadamente.

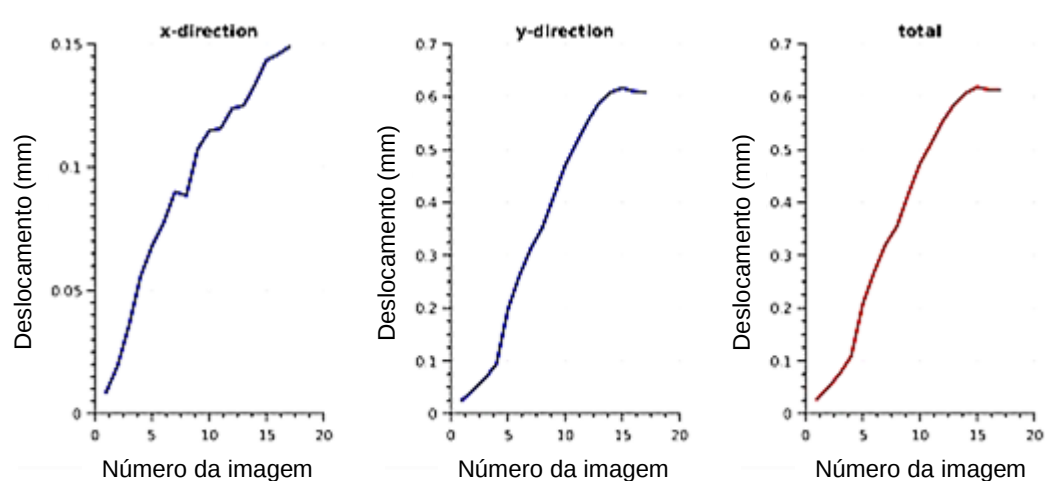
Figura 47 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 2a e 2b



Fonte: A Autora (2019).

O terceiro extensômetro, Figura 48, apresentou uma taxa de crescimento total de abertura de fissura decrescendo com o tempo, chegando a uma evolução de aproximadamente 0.62 mm nesse período, quando estabiliza. Pode ser observado ainda que a taxa de crescimento do extensômetro 2 é inferior aos demais.

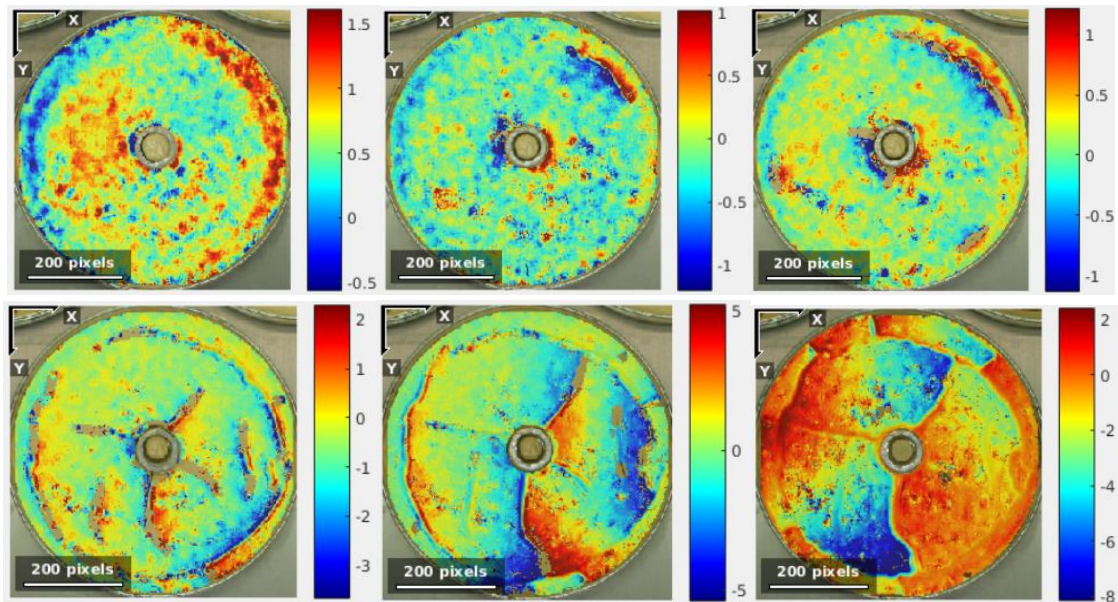
Figura 48 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 3a e 3b



Fonte: A Autora (2019).

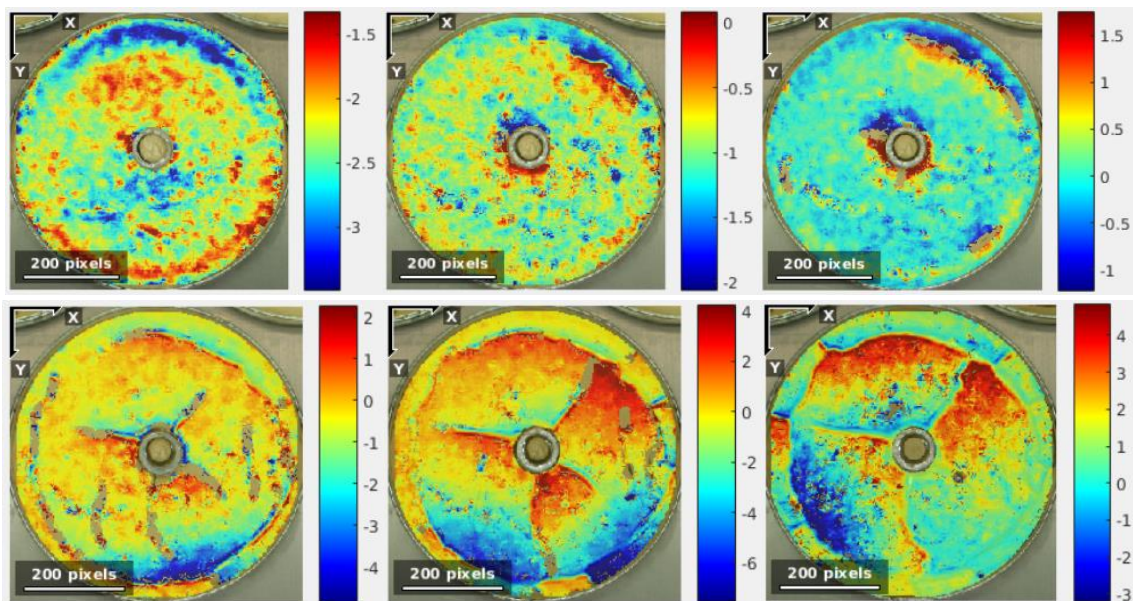
Outro resultado possível de ser analisado através das análises DIC é a evolução das deformações por concentração de deformações causadas por tensões de tração ou compressão durante o ensaio de ressecamento, Figura 50.

Figura 49 - Deslocamentos horizontais para a amostra 6, em pixels, para (a) 228h, (b) 288h, (c) 293h, (d) 301h, (e) 308h, e (f) 335h



Fonte: A Autora (2019).

Figura 50 - Deslocamentos verticais para a amostra 6, em pixels, para (a) 228h, (b) 288h, (c) 293h, (d) 301h, (e) 308h, e (f) 335h

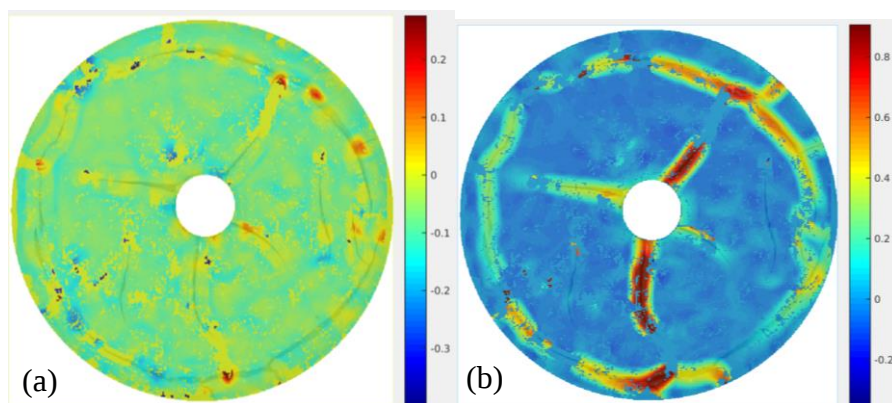


Fonte: A Autora (2019).

Na Figura 51 está ilustrado as deformações principais de tração e de compressão. Observa-se, nessa imagem pequenas concentrações de deformações por compressão, similar à avaliação da amostra No.1.

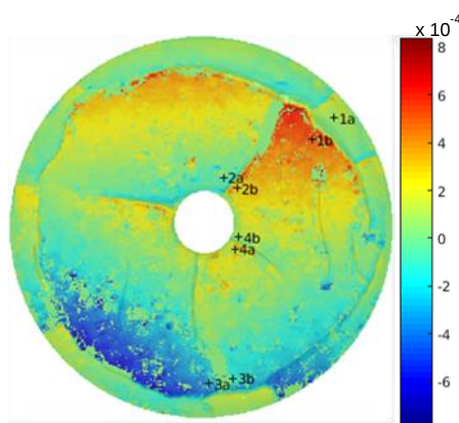
A partir dessa análise das deformações principais, diante do resultado das deformações principais máximas, causadas devido a tensões de tração, foram escolhidos pontos para a locação de 4 extensômetros, Figura 52.

Figura 51 - Deformação principal (a) mínima (compressão) e (b) máxima (tração)



Fonte: A Autora (2019).

Figura 52 – (a) Deslocamento horizontal (m) da amostra 6 entre 308h e 335h de ensaio com 3 extensômetros locados



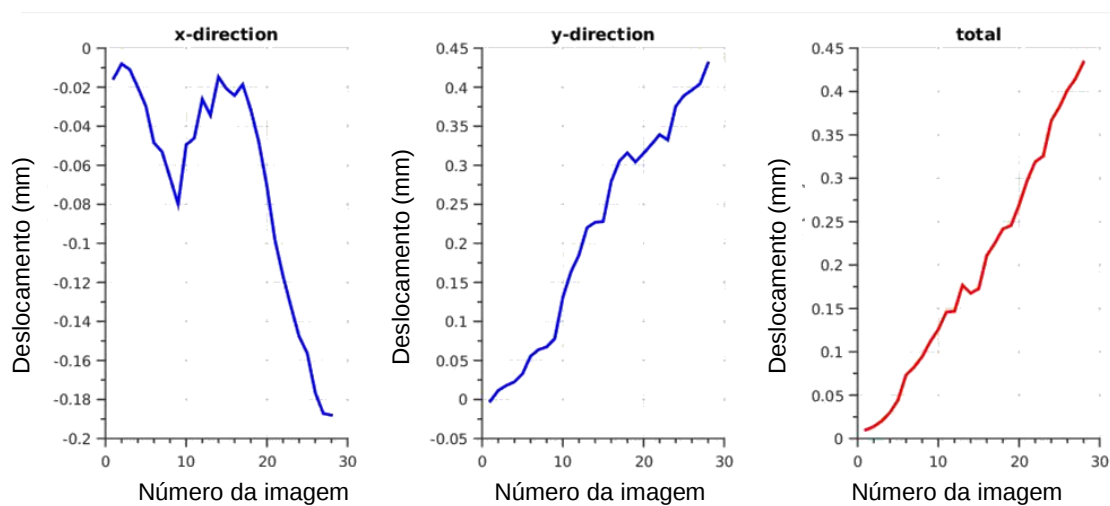
Fonte: A Autora (2019).

Na Figura 52 está ilustrado os deslocamentos horizontais em metros para a amostra 6, bem como a locação dos 4 extensômetros. Na Figura 53 está ilustrado os deslocamentos para o extensômetro 1, que se localiza na periferia da amostra. Foi observada uma taxa de crescimento da abertura da fissura de aproximadamente 1.5×10^{-2} mm/h.

Avaliando a Figura 54, observa-se que o extensômetro 2 detectou uma taxa de crescimento da abertura da fissura de 2.5×10^{-2} mm/h, quase o dobro da verificada pelo extensômetro 1.

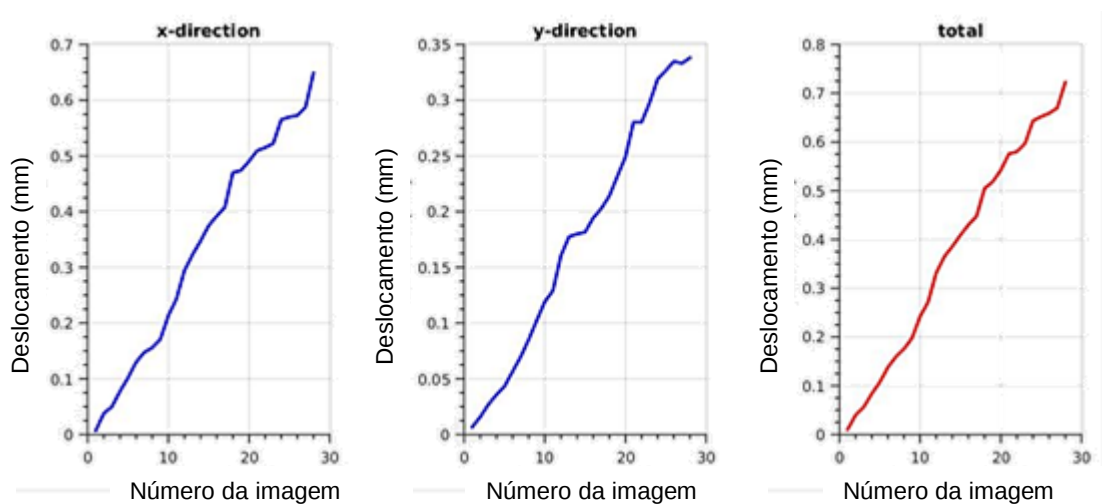
Para o extensômetro 3, Figura 55, pode ser verificado uma taxa de crescimento de, em média, 4.8×10^{-2} mm/h, porém, no final da análise parece aumentar a taxa de crescimento da abertura, o que pode ser causado pelo encontro das fissuras.

Figura 53 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 1a e 1b



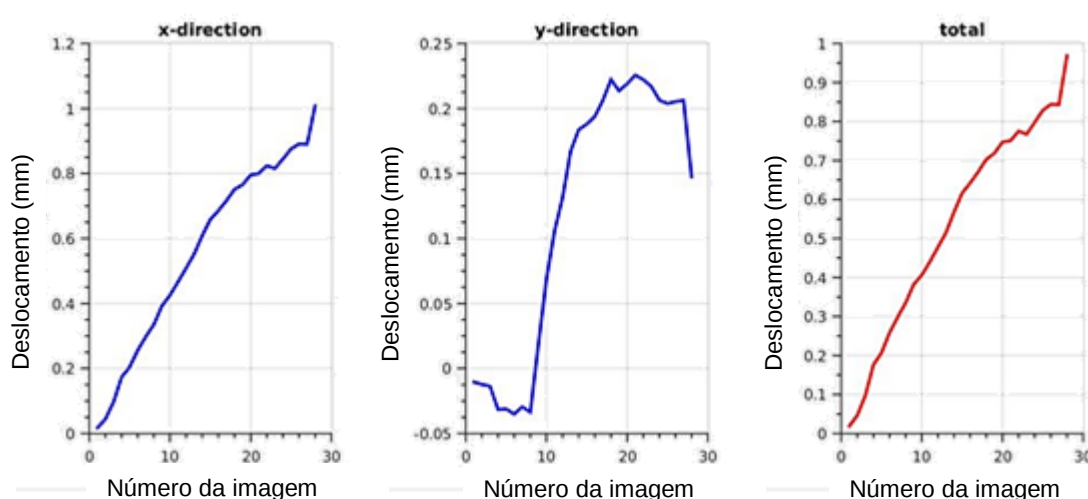
Fonte: A Autora (2019).

Figura 54 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 2a e 2b



Fonte: A Autora (2019).

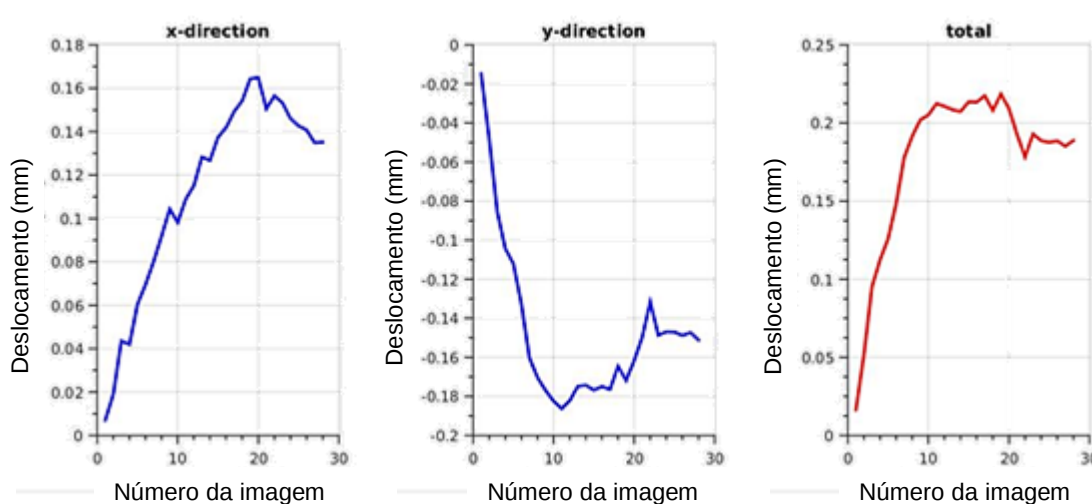
Figura 55 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 3a e 3b



Fonte: A Autora (2019).

Na Figura 56 se observa que o extensômetro 4 detecta uma taxa de crescimento da abertura da fissura de $2,7 \times 10^{-2}$ mm/h no início desse período, estabilizando pelas próximas horas.

Figura 56 – Gráficos de deslocamento relativo entre os extensômetros 4a e 4b



Fonte: A Autora (2019).

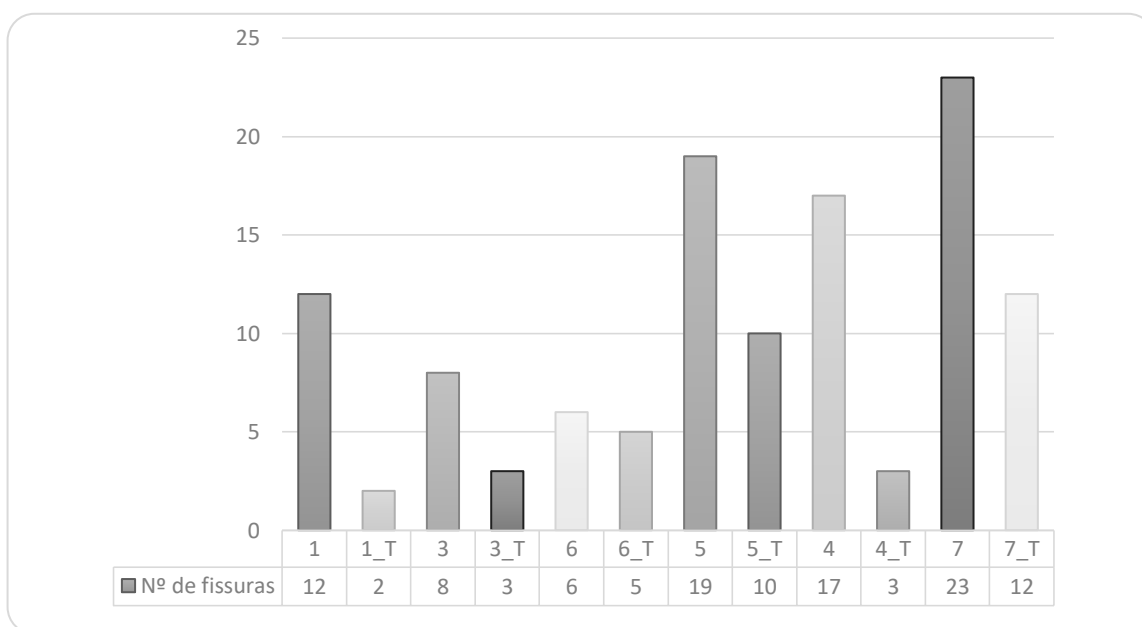
A análise DIC permitiu verificar onde as fissuras terão sua formação, qual a tendência de propagação e a taxa de crescimento das aberturas. Além disso, essa verificação também permitiu avaliar a influência entre a presença das inclusões e a distribuição das deformações.

2.6.2 Número de Fissuras

Diante dos resultados apresentados pode-se verificar que a diferença de restrição horizontal devido à aplicação de diferentes bases e à inserção de inclusões no interior da amostra de solo argiloso foi fortemente relevante.

Avaliando apenas a presença de diferentes bases, de vidro e de teflon, observando as amostras 1 e 1_T, respectivamente, percebe-se que com a presença do teflon o solo lentamente foi se rearranjando, de maneira que apenas duas fissuras emergiram no interior da amostra. Enquanto que a amostra 1_T levou 78 horas para estabilizar o crescimento e a propagação de fissuras a olho nu, desde o momento de início do fissuramento, a amostra 1 em 22 horas de ensaio teve uma concentração alta de deformações no interior da amostra, o que levou a formação de 12 fissuras, Figura 57, no seu interior, desprezando as fissuras mais externas, que pode ser levada em consideração o atrito com a lateral da cápsula que é de vidro.

Figura 57 – Gráfico do número de fissuras para as amostras avaliadas no ensaio de ressecamento



Fonte: A Autora (2019).

Isso é evidenciado quando se observa as amostras 5 e 5_T, por exemplo, que possuem a mesma disposição de inclusões, mas com diferentes bases. A amostra 5, com base de vidro, apresentou cerca de 19 fissuras, Figura 57, internas, em um processo que ocorreu em 54 horas desde o início do aparecimento das fissuras,

enquanto que a amostra 5_T, com base de teflon, levou cerca de 53 horas para evolução de 10 fissuras internas na amostra de solo. Pode-se observar, então que o atrito das bases influenciou fortemente a disposição do solo, de maneira que as amostras com base de vidro apresentaram um número de fissuras superior ao das amostras que possuíam a base de teflon.

Também pode ser observado que a amostra 6, que possuía a base de vidro e uma inclusão central de 1,5 centímetros de diâmetro, apresentou 6 fissuras internas, das quais duas delas se formaram próximo a inclusão e terminaram na direção perpendicular à cápsula, com uma abertura de cerca de 4 milímetros, em um processo que durou 48 horas. Já a amostra 6_T, que teve a mesma disposição da amostra 6, mas com base de teflon, apresentou ao final do ensaio 4 fissuras de pequeno porte, cerca de 1 milímetro de abertura, quando comparadas às formadas na amostra 6, que se formaram próximo à inclusão e uma fissura ainda menor e com menor abertura no solo distante da inclusão. Ainda devido à presença da inclusão, nas amostras 6 e 6_T, a presença de uma inclusão no centro do solo fez com que o solo retraísse de maneira concêntrica.

A presença das restrições verticais inseridas através de inclusões de diferentes diâmetros e distribuições também se mostrou de grande influência. Uma influência observada foi a concentração de fissuras ao redor da inclusão, o que pode ser visualizado na amostra 3, que diferente da amostra 1, as fissuras iniciaram próximo à inclusão e não no centro da amostra. Também na amostra 3_T, que só apresentou a formação de três fissuras no interior do solo e que surgiram próximas à inclusão, diferente da amostra 1_T, que não teve fissuras no interior da amostra onde o solo estava livre, as fissuras que se formaram nessa última amostra podem ser atribuídas à restrição da lateral da amostra que é de vidro.

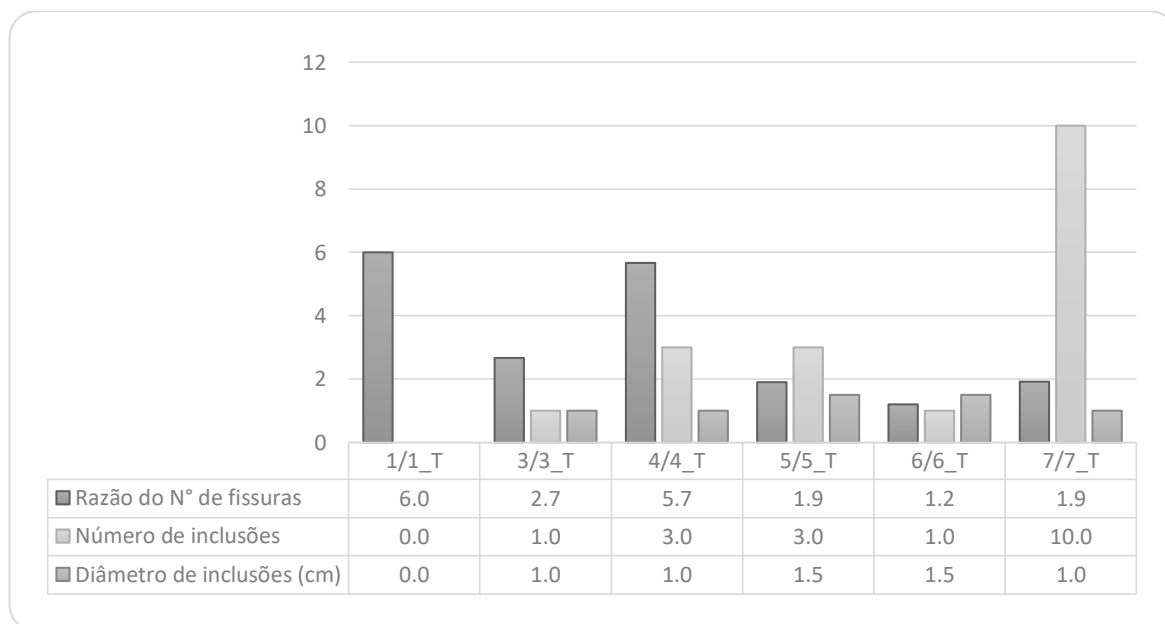
Avaliando a dimensão das inclusões em amostras que possuíam inclusões com as mesmas locações e que podem ser comparadas são as amostras 4, 4_T, que possuíam 3 inclusões de 1,0 centímetro de diâmetro, e as amostras 5 e 5_T, que também possuíam 3 inclusões com 1,5 centímetros de diâmetro. Pode-se observar que a presença de inclusões de diferentes diâmetros entre as amostras 4 e 5 provocaram uma formação de fissuras diferente, para a amostra 4, que possuiu inclusões menores, as fissuras foram formadas com aberturas de até 1 milímetro

concentradas mais na periferia da amostra, enquanto que na amostra 5 as fissuras se formaram entre as inclusões, com aberturas de 1 a 2 milímetros.

Similarmente, comparando as amostras com base de teflon 4_T e 5_T, foi verificado que a amostra 4_T, apresentou a formação de 3 fissuras com abertura inferior a 1 milímetro no interior da amostra iniciando das inclusões, já na amostra 5_T foram formadas uma quantidade de fissuras no interior da amostra 3 vezes maior do que a amostra 4_T, com fissuras variando até 2 milímetros, e as fissuras que atravessaram a amostra tiveram as aberturas em média de 2 milímetros.

Isso mostra como a presença das inclusões restringiu o comportamento de formação e propagação de fissuras no solo argiloso avaliado, o que pode ser melhor avaliado através do gráfico da Figura 58, bem como a influência da mudança de atrito na base.

Figura 58 - Gráfico da comparação entre as amostras de mesma disposição geométrica, mas com diferentes bases através da razão do número de fissuras, do número de inclusões inseridas na amostra e do diâmetro das inclusões (cm)



Fonte: A Autora (2019).

Em geral, essa Figura 58 mostra que quanto maior o atrito na base da amostra, mais forte é a restrição ao deslocamento do solo e maior é o número de fissuras que será formado diante do processo de ressecamento. Isso pode ser observado pela

razão do número de fissuras entre as amostras com base de vidro e as amostras com base de teflon que foi, em todos os casos analisados, maior do que uma unidade, e, em média, mostrou um número de fissuras nas amostras que tinham base de vidro 3.2 vezes maior do que as amostras com base de teflon, ao se fazer a média das razões das fissuras.

De maneira análoga, pode ser afirmado que, na maioria dos casos, quanto maior o número de restrições verticais inseridos no solo argiloso, representadas nesse trabalho pelas inclusões, maior o número de fissuras formadas e menores são as aberturas das fissuras. Isso pode ser mais uma vez evidenciado pela comparação entre as amostras 4 e 4_T com as amostras 7 e 7_T, a razão do número de fissuras para as primeiras amostras foi de 5.7, enquanto que para as amostras 7 e 7_T essa razão foi de 1.9, ainda que a razão tenha sido inferior, o número de fissuras das amostras 7 e 7_T foi bem superior ao número de fissuras das amostras 4 e 4_T. Essa razão do número de fissuras mostra que o aumento do número de inclusões aumentou consideravelmente o número de fissuras formadas no solo, pois mesmo com base de teflon a amostra 7_T sofreu a formação de um número considerável de fissuras devido ao número de inclusões inseridas, Figura 58.

Já com relação à dimensão das inclusões, quanto maiores as inclusões, maior o número de fissuras formadas e maiores são suas aberturas. Isso foi mostrado na comparação entre as amostras 4 e 4_T com 5 e 5_T, onde estas possuíam inclusões 50% maior do que as inclusões das amostras 4 e 4_T. Essa comparação fica mais evidente quando observada a Figura 58, que mostrou que as primeiras amostras tiveram uma razão de fissuras de 5.7 e as amostras 5 e 5_T apresentaram uma razão de 1.9, o que mostra que o aumento do diâmetro das inclusões aumentou a formação de fissuras em grande quantidade não só da amostra 4 para 5, de 17 para 19, mas principalmente da amostra 4_T para 5_T em mais de três vezes, de 3 para 10, Figura 57.

Em relação à análise DIC, esta permitiu observar a formação das fissuras, a direção da sua propagação e a taxa de evolução das aberturas. Além disso, esses resultados mostraram que para ambas as direções, horizontal e vertical, a análise de DIC do campo das deformações está diretamente correlacionada com os deslocamentos. Foi avaliada as deformações sob tensões de compressão e de tração,

sendo esta última a causadora da evolução das tensões. Isso foi verificado através dos extensômetros inseridos nas regiões de concentração de tensões de tração das amostras 1 e 6.

O resultado das análises mostrou que para essa amostra 1 de solo argiloso em uma cápsula de vidro, que apresenta um atrito considerável com esse material, as fissuras mais ao centro tiveram uma taxa de crescimento das deformações maior do que as fissuras da periferia. Isso fica claro diante do comportamento das fissuras dos extensômetros 1 e 3 que tiveram uma inclinação da curva de evolução do deslocamento com o tempo maior do que a curva do extensômetro 2, com uma razão da taxa de crescimento da abertura do extensômetro 1 de 2.6 vezes maior do que a taxa de crescimento para o extensômetro 2, por exemplo.

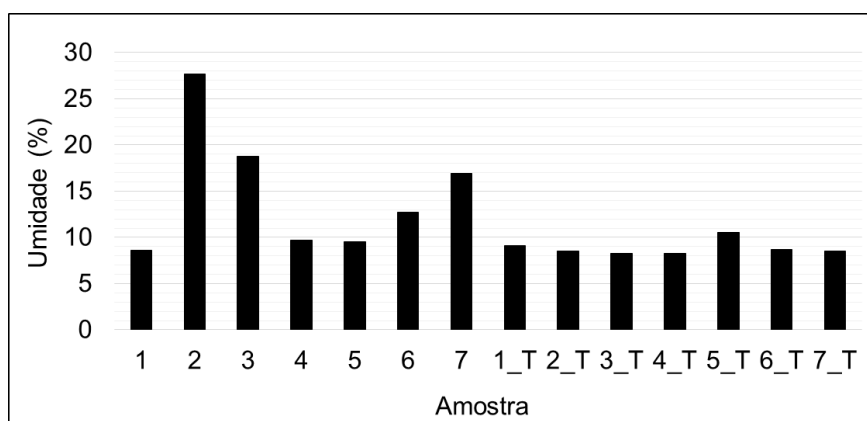
Já para a amostra 6, para os extensômetros 2 e 4, mais centrais e próximos à inclusão, foram verificadas a razão do crescimento da abertura das fissuras de 2.5×10^{-2} mm/h e 2.7×10^{-2} mm/h respectivamente. Enquanto que para as fissuras mais externas mensuradas pelos extensômetros 1 e 3, foram verificadas taxas de crescimento da abertura das fissuras de 1.5×10^{-2} mm/h e 4.8×10^{-2} mm/h.

Na análise dessa amostra se observa que as fissuras mais ao centro, próximas da inclusão, tiveram uma taxa de crescimento das aberturas maior do que a fissura referente ao extensômetro 1. Já a fissura referente ao extensômetro 3, a taxa de crescimento da abertura pode ser consequência da frente de sucção que foi gerada pelas entradas de ar na câmara a qual se realizou o ensaio.

Apesar de a câmara ter sido lacrada lateralmente com fita, ao longo das análises notou-se que houveram passagens de ar no topo da câmara que permitiram a ocorrência de um processo de ressecamento diferencial entre algumas amostras, o que causou uma frente de baixa umidade e, como consequência, algumas amostras atingiram uma umidade mais baixa do que outras, Figura 59.

A Figura 59 mostra que no momento final do ensaio as amostras com base de vidro que se localizaram mais ao centro da configuração experimental não chegaram à umidade de $8.5 \pm 0.2\%$, valor que a maioria das amostras localizadas na periferia atingiram.

Figura 59 - Comportamento umidade das amostras ao final do ensaio de ressecamento



Fonte: A Autora (2019).

Mais especificamente, as amostras No. 2, No. 3 e No. 7 ainda permaneceram com umidade superior a 15%. Dessa maneira, um cuidado a se ter na reprodução desse ensaio é garantir a vedação da câmara na qual serão acondicionadas amostras.

3 MODELOS CONSTITUTIVOS E TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS DE ALTA RAZÃO DE ASPECTO

Modelos constitutivos são formulações numéricas capazes de representar o comportamento de um meio ideal através de hipóteses simplificadoras (BESERRA, 2015). Dessa maneira, para que um modelo represente adequadamente um material, é necessário escolhê-lo cuidadosamente.

Nesse capítulo estão descritas as formulações utilizadas para a modelagem numérica, sendo elas: a formulação hidráulica do fluxo dos solos não saturados, o modelo elasto-plástico Barcelona Basic Model (BBM), que foi utilizado para representar o comportamento de retração do solo frente ao ressecamento em elementos finitos convencionais e o modelo de Dano a tração, que foi utilizado para representar a formação de fissuras nos elementos finitos de alta razão de aspecto.

Esses modelos constitutivos já se encontram implementados na ferramenta em elementos finitos utilizada, CODE-BRIGHT, detalhados mais adiante.

3.1 FLUXO DE ÁGUA EM SOLOS NÃO SATURADOS

O fluxo de água é causado por um gradiente de carga hidráulica (MORENO, 2011), e eles podem ser classificados de acordo com:

- ❖ As características do meio posoro:
 - Isotrópico/Anisotrópico;
 - Homogêneo/Heterogêneo;
 - Deformável/Indeformável;
- ❖ As características do fluido percolante:
 - Compressível/Incompressível;
- ❖ O regime do fluxo:
 - laminar (lei de Darcy) / não laminar;
 - estacionário / transiente;

O fluxo de fluidos em meios porosos é governado pelas leis de conservação de massa e pelas relações constitutivas que relacionam as variáveis dependentes.

A equação de conservação de massa (equação de continuidade) que rege os fluxos em meios porosos é dada pela Eq. 2.

$$\frac{\partial(\rho_{\alpha}nS_{\alpha})}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{j}_{\alpha}) + \mathbf{f}_{\alpha} \quad (2)$$

Onde α representa a fase que pode ser líquida (l) ou gasosa (g), ρ_{α} é a densidade da fase, n é a porosidade, S_{α} é o grau de saturação na fase, ∇ é o operador divergente, $\mathbf{j}_{\alpha}$ é o vetor de fluxo da fase e $\mathbf{f}_{\alpha}$ é o vetor de termo fonte/ sumidouro.

O primeiro termo da equação representa o termo de armazenamento de massa da espécie nas fases consideradas, o primeiro termo do segundo membro da equação representa o termo de fluxo da espécie nas fases consideradas e o segundo termo do segundo membro representa o termo de fonte/ sumidouro.

O fluxo de fluídos líquidos no meio poroso não saturado é dado pela lei de Darcy, com o fluxo mássico de água definido pela Eq. 3.

$$\mathbf{J}_l = \rho_l \cdot \mathbf{q}_l + n \cdot S_l \cdot \rho_l \mathbf{\dot{u}} \quad (3)$$

Sendo, $\mathbf{q}_l$ é o termo de fluxo de Darcy, $\mathbf{\dot{u}}$ é a velocidade fase sólida, no meio deformável, e a equação de balanço de massa de água pode ser redefinida:

$$\frac{\partial(\rho_l n S_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \cdot \mathbf{q}_l + n \cdot S_l \cdot \rho_l \mathbf{\dot{u}}) = 0 \quad (4)$$

O termo de armazenamento da equação de balanço de massa de água, pode ser escrito através da Eq 5.

$$\frac{\partial(\rho_l n S_l)}{\partial t} = \rho_l n \frac{\partial(S_l)}{\partial t} + \rho_l S_l \frac{\partial(n)}{\partial t} + n S_l \frac{\partial(\rho_l)}{\partial t} \quad (5)$$

Onde, o primeiro termo no segundo membro representa a curva de retenção, o segundo termo da equação no segundo membro representa a deformação do meio, e o terceiro termo no segundo membro representa a compressibilidade da água.

A lei constitutiva de Darcy define o termo de fluxo da equação de balanço de massa de água, considerando o solo saturado, o fluxo laminar, o meio homogêneo, e

o fluido incompressível. Assim, a lei de Darcy estabelece relações básicas entre a vazão e o gradiente hidráulico que podem ser adaptadas, no intuito de simular numericamente fluxos laminares, estacionários e/ou transientes.

Considerando o fluido compressível e meio poroso não saturado, a lei de Darcy é dada por (BEAR, 1973):

$$\mathbf{q}_l = -\frac{\mathbf{\kappa}}{\mu_l} \cdot \mathbf{K}_{rel} (\nabla p_l - \rho_l \mathbf{g}) \quad (6)$$

Sendo, $\mathbf{K}_{rel}$ e μ_l são a permeabilidade relativa e a viscosidade da fase líquida, respectivamente, ρ_l é a densidade do líquido, p_l é a pressão da fase líquida e $\mathbf{g}$ é a gravidade.

A permeabilidade intrínseca pode ser definida em função da porosidade, por exemplo através da relação de Kozeny - Carman:

$$\mathbf{\kappa} = \mathbf{\kappa}_{ref} \frac{n^3(1 - n_{ref})^2}{(1 - n)^2 \cdot n_{ref}^3} \quad (7)$$

Onde, $\mathbf{\kappa}_{ref}$ é a permeabilidade intrínseca para a porosidade de referência (n_{ref}).

Pode-se destacar a relação exponencial entre permeabilidade relativa e a saturação de líquido:

$$\mathbf{K}_{rel} = A_m S_e^{\lambda_m} \quad (8)$$

Sendo, S_e é o grau de saturação ($0 \leq S_e \leq 1$) e A_m e λ_m são parâmetros de ajuste.

O grau de saturação do solo não saturado e a sucção matricial influenciam fortemente o coeficiente de permeabilidade de um meio poroso não saturado (JUCÁ, 1990).

Logo, a curva de retenção é essencial para esse estudo. Nesse trabalho foi utilizada o ajuste a partir de VAN GENUTCHEN (1980), Eq. 9.

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left\{ 1 + \left(\frac{p_a - p_l}{P_o} \right)^{1/1-\lambda} \right\}^{-\lambda} \quad (9)$$

Onde, $p_a - p_l$ é a pressão capilar, S_e é o grau de saturação efetivo, S_{rl} é o grau de saturação residual, S_{ls} é o grau de saturação máximo, P_o é a pressão de entrada de ar e λ é o índice de distribuição do tamanho dos poros.

MORENO (2011) aponta que, no estado de completa saturação, todos os espaços do meio poroso estão conectados pelo mesmo fluido percolante e, à medida que o grau de saturação diminui, os poros vão sendo ocupados por ar, tendo como consequência:

- ❖ Uma diminuição da seção disponível para o fluxo de água, pois o ar tende a ocupar os poros de maior diâmetro;
- ❖ A redução dos meniscos de água com o aumento da sucção, diminuindo a velocidade de fluxo do fluido e a permeabilidade;
- ❖ Com o crescente volume de poros ocupados por ar, o volume de fluido fica desconectado e, como consequência, o fluxo será possível apenas pela fase gasosa.

Assim, quanto maior a umidade do solo, menor será sua avidez por água e menor será a sucção. Em contrapartida, quanto menor a umidade do solo, maior será a sucção e maior será a sua avidez por água. Dessa maneira, o aumento da sucção reduz a permeabilidade do meio poroso ao fluido percolante, enquanto que ela aumenta quando a saturação aumenta e a sucção mátrica diminui.

3.2 BARCELONA BASIC MODEL (BBM)

O modelo constitutivo geomecânico Barcelona Basic Model (BBM) foi desenvolvido por ALONSO et. al. (1990), com o intuito de descrever o comportamento tensão-deformação de solos parcialmente saturados, inicialmente apresentado como uma extensão do modelo Cam-Clay Modificado para condições não-saturadas (RUTQVIST; IJIRI; YAMAMOTO, 2011).

Esse modelo captura muitos dos comportamentos apresentados pelos solos não-saturados (ALONSO; GENS; JOSA, 1990), e por sua importância e vasta

aplicação em problemas geotécnicos, que em sua maioria apresentam solos não-saturados, esse modelo constitutivo tem sido intensamente utilizado para a previsão do comportamento de solos através de métodos numéricos.

Nessa tese o principal interesse na utilização desse modelo é a sua capacidade de representar o comportamento de umedecimento-secagem, colapso, cisalhamento, bem como o comportamento de pré-consolidação aparente do material devido a sucção.

De acordo com ALONSO et. al. (1990), o BBM reproduz adequadamente o efeito da sucção na mudança da rigidez, da resistência ao cisalhamento, do comportamento elasto-plástico e do possível colapso das estruturas de solo.

Dessa maneira, esse modelo foi utilizado para descrever o ensaio experimental realizado com o solo Romainville, representando o comportamento de retração do solo quando submetido ao ressecamento.

3.1.1 Formulação para o Estado Isotrópico de Tensões

Esse modelo foi desenvolvido a partir de ensaios experimentais (ALONSO; GENS; JOSA, 1990), os quais permitiram representar o estado de tensões hidrostático e triaxial (FUTAI, 1997) através de uma região de comportamento elástico limitada por uma superfície de escoamento LC (carregamento e colapso) e SI (aumento da sucção). Uma lei de endurecimento define a evolução das variáveis de história, que variam com as deformações.

Para o estado isotrópico de tensões, foram utilizadas as seguintes variáveis de história:

$$p = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} - p_{ar}, \text{ tensão média líquida} \quad (10)$$

$$s = p_{ar} - p_w, \text{ sucção} \quad (11)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3), \text{ tensão desviatória} \quad (12)$$

$$v = (1 + e), \text{ volume específico} \quad (13)$$

Dentre essas variáveis, o volume específico varia conforme a rigidez do material, que varia com a sucção.

$$v = N(s) - \lambda(s) \ln \frac{p}{p^c} \quad (14)$$

Nessa equação, $\lambda(s)$ é a rigidez do material, que varia com a sucção s ; p^c é tensão de referência no qual $v = N(s)$, e p é o incremento de tensão ao longo da reta virgem. O parâmetro de rigidez máximo em função da sucção do solo, pode ser dado por:

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1 - r)\exp(-\beta s) + r] \quad (15)$$

Onde,

$\lambda(0)$ É o parâmetro de compressão virgem para a condição saturada ($S = 0$);

βs É o parâmetro que controla a taxa do aumento da rigidez do solo com a sucção;

r É uma constante relacionada à rigidez máxima do solo $\left(r = \lim_{s \rightarrow \infty} \left(\frac{\lambda(s)}{\lambda(0)}\right)\right)$;

$N(s)$ É volume específico referente à tensão p^c com a sucção;

p^c É a tensão de referência para $v = N(s)$;

A partir dessa equação e dos parâmetros descritos acima, após algumas manipulações matemáticas podemos ter a relação que descreve a variação da tensão de pré-adensamento com a sucção:

$$\left(\frac{p_0}{p^c}\right) = \left(\frac{p_0^*}{p^c}\right)^{\frac{[\lambda(0)-k]}{[\lambda(s)-k]}} \quad (16)$$

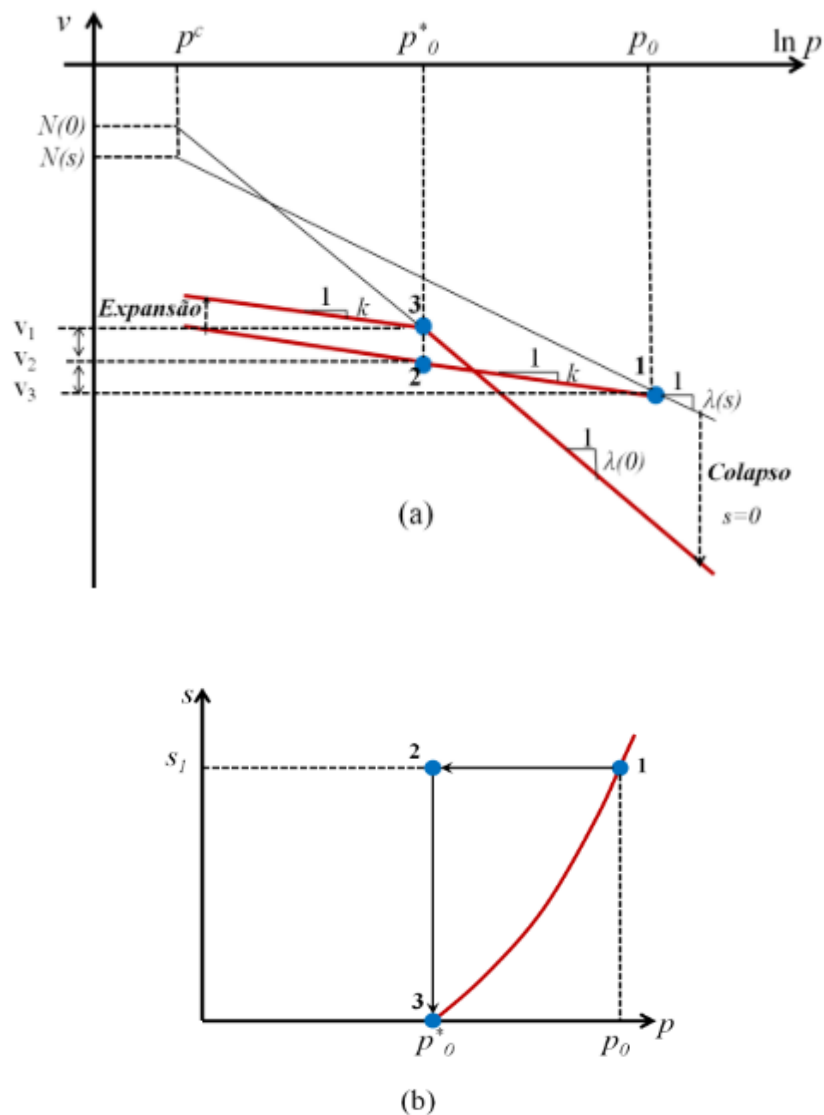
Onde p_0 é a tensão de pré-adensamento na condição não-saturada e p_0^* na condição saturada.

Sob um comportamento de carga e descarga à sucção constante, v deverá evoluir de maneira elástica:

$$dv = -k \frac{dp}{p} \quad (17)$$

A Figura 60 ilustra a resposta a um carregamento isotrópico, de duas amostras submetidas a diferentes valores de sucção ($s = 0$ e $s \neq 0$). A amostra com um valor de sucção diferente de zero atingirá a superfície de escoamento com maiores valores de tensões.

Figura 60 – Relação entre (a) variação de volume x tensão média e (b) sucção x tensão média



Fonte: SILVA (2012) adaptado de ALONSO; GENS; JOSA (1990).

Esse comportamento elástico da deformação volumétrica está ilustrado na Figura 60, do trecho $1 \rightarrow 2$ ou $2 \rightarrow 1$, no qual, sob o mesmo valor de sucção, a amostra tem a atualização das tensões e do seu volume de vazios a partir do descarregamento e do carregamento da amostra, respectivamente.

Já se considerado o trecho $3 \rightarrow 2$ ou $2 \rightarrow 3$, Figura 60, no primeiro ocorre o ressecamento da amostra, com o aumento da sucção, enquanto que no segundo ocorre o umedecimento da amostra, atingindo a saturação, ambos com sob o mesmo estado

$$dv = -k_s \frac{ds}{(s + p_{atm})} \quad (18)$$

Onde, p_{atm} é a pressão atmosférica e k_s é a rigidez elástica para a variação de sucção s .

3.1.2 Leis de endurecimento

De acordo com a (17) a evolução das tensões p na região elástica induz uma deformação volumétrica de compressão:

$$d\varepsilon_{vp}^e = -\frac{dv}{v} = \frac{k}{v} \frac{dp}{p} \quad (19)$$

Quando o estado de tensões evolui até atingir a tensão de pré-adensamento, o valor de p atinge p_0 e as deformações são calculadas da seguinte forma:

$$d\varepsilon_{vp} = \frac{\lambda(s)}{v} \frac{dp_0}{p_0} \quad (20)$$

Com as deformações plásticas volumétricas dadas por:

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(s) - k}{v} \frac{dp_0}{p_0} \quad (21)$$

Ou

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(0) - k}{v} \frac{dp_0^*}{p_0^*} \quad (22)$$

De maneira similar, na trajetória de umedecimento ALONSO et. al. (1990) considera a deformação elástica expansiva pode ser calculada por:

$$d\varepsilon_{vs}^e = \frac{k_s}{v} \frac{ds}{(s + p_{atm})} \quad (23)$$

E se a superfície de fluência for atingida, a deformação volumétrica plástica é dada por:

$$d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda_s - k_s}{v} \frac{ds_0}{(s_0 + p_{atm})} \quad (24)$$

Diante disso, ALONSO et. al. (1990) propuseram as leis de endurecimento do BBM para a tensão média ((25) e para a sucção ((26):

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{v}{\lambda(0) - k} \cdot d\varepsilon_{vp}^p \quad (25)$$

$$\frac{ds_0}{s_0} = \frac{v}{\lambda(s) - k(s)} \cdot d\varepsilon_{vs}^p \quad (26)$$

3.1.3 Modelo para o Estado Tridimensional

Para o caso tridimensional, é necessário além de considerar a tensão confinante, considerar a evolução da variável $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ para incluir o efeito de cisalhamento (ALONSO; GENS; JOSA, 1990).

A deformação volumétrica para esse estado triaxial de tensões é dado por:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_\varepsilon \quad (27)$$

Enquanto que a deformação cisalhante é dada por:

$$\varepsilon_c = 2 \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{\varepsilon} \quad (28)$$

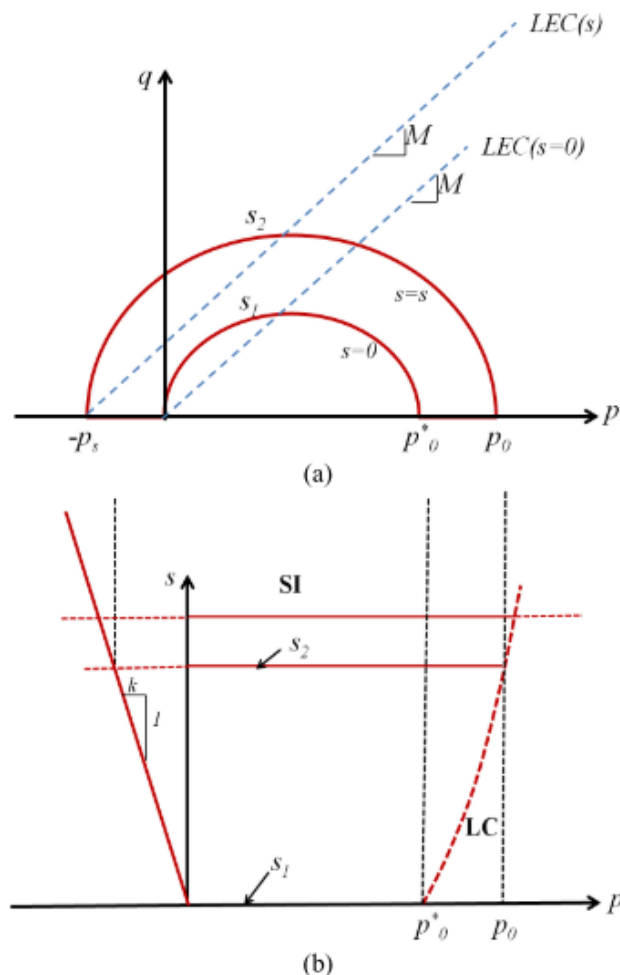
Para a condição saturada esse modelo adota as condições limite do modelo Cam-Clay modificado, que representa adequadamente o comportamento dos solos saturados (ALONSO; GENS; JOSA, 1990).

O parâmetro M que representa a inclinação da linha de estados críticos (Critical State Line - CSL) é a mesma para a situação saturada ou não-saturada. E considerando uma relação linear entre a coesão e a sucção, a elipse que representa a superfície de fluência do material no espaço (p, q, s) , Figura 61, encontra o eixo p em:

$$p = -p_s = -ks \quad (29)$$

Onde k é uma constante.

Figura 61 – Superfície de fluência, (a) relação tensão desviadora x tensão média (b) relação sucção com a tensão média



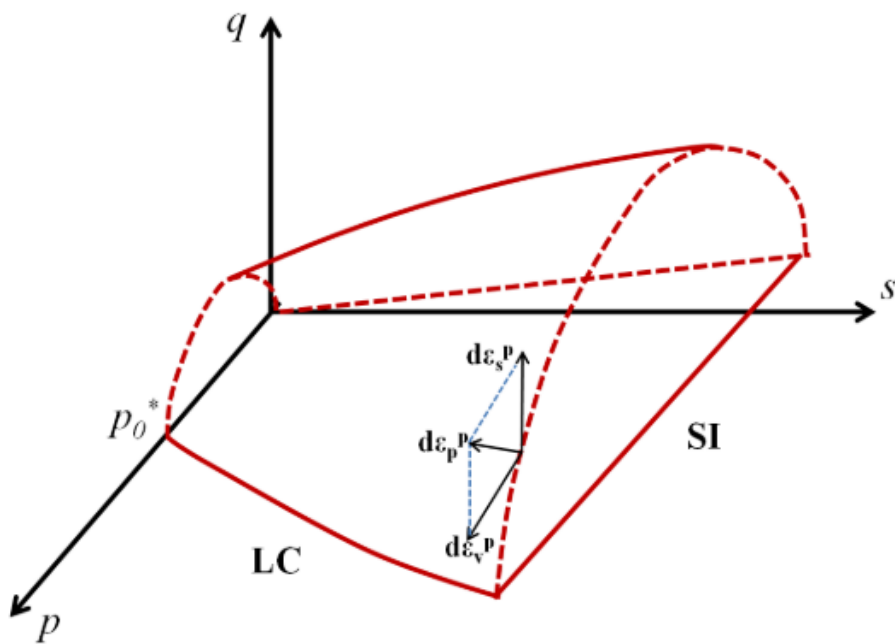
Fonte: SILVA (2012) adaptado de ALONSO; GENS; JOSA, (1990).

E a elipse expande de $s = 0$ para $s \neq 0$, de segmento $-p_s(s)$ a $p_0(s)$ e (30):

$$q^2 = M^2(p + p_s)(p_0 - p) \quad (30)$$

Também foi proposto que a evolução da superfície de fluência SI estende em $q > 0$ em um plano paralelo ao eixo de q . A Figura 62 mostra a vista tridimensional do espaço (p, q, s) .

Figura 62 – Superfície de fluência em três dimensões



Fonte: SILVA (2012) adaptado de ALONSO; GENS; JOSA, (1990).

Considerando a direção do incremento da deformação plástica associada a superfície de fluência, uma lei de fluxo não associada no plano com sucção constante foi sugerida por ALONSO et. al. (1990):

$$\frac{d\varepsilon_s^p}{de_{vp}^p} = \frac{2q\alpha}{M^2(2p + p_s - p_0)} \quad (31)$$

Em cuja equação é introduzido o parâmetro α (OHMAKI, 1982), que para a plasticidade associada é considerada igual à unidade ($\alpha = 1$). E as deformações elásticas são computadas através do módulo de cisalhamento, Eq. 32.

$$d\varepsilon_s^e = \left(\frac{1}{3}G\right)dq \quad (32)$$

Sendo G o módulo cisalhante do material.

3.3 MODELO CONSTITUTIVO DE DANO

A heterogeneidade das rochas, quanto à disposição dos poros e microfissuras, influencia fortemente o seu comportamento mecânico (MARTINEZ, 2012), e quando submetidas a sobrecargas, são responsáveis pela degradação das suas propriedades mecânicas (AUBERTIN; SIMON, 1997). Nesse sentido, o modelo constitutivo de Dano é apropriado para descrever o comportamento da degradação de geomateriais quando submetido a carregamentos. (SÁNCHEZ; MANZOLI; GUIMARÃES, 2014a)

Seguindo esse raciocínio, vários autores têm estudado o modelo de Dano e a degradação de múltiplos materiais como rochas (CHEN et al., 2018; MARTINEZ, 2012; YAN et al., 2017), solos cimentados (GAI; SÁNCHEZ, 2018), carvão mineral, materiais quase-frágeis (MAEDO, 2015; SEIXAS, 2015), vidro (HOLMQUIST; WERESZCZAK, 2014), rochas submetidas a ciclos de baixas e altas temperaturas (ZHOU et al., 2017), entre outros materiais.

A formulação utilizada para o modelo constitutivo de dano foi apresentada por SÁNCHEZ et. al. (2014), implementada no CODE_BRIGHT por BESERRA (2015), e aplicada com sucesso por SEIXAS (2015) e MACIEL (2017). A seguir está apresentada a formulação do modelo de Dano.

Foi proposto, portanto, nessa tese, avaliar a degradação do solo através desse modelo constitutivo de Dano à tração, representando o comportamento da formação e propagação de fissuras no solo.

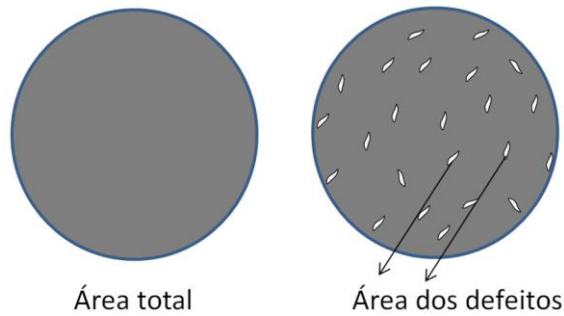
3.3.1 Introdução ao modelo constitutivo de dano

Na representação da degradação do material por esse modelo, uma variável escalar “ d ” é adotada para representar o nível de danificação do material, estando essa variável entre 1, quando o dano é 100%, e 0, quando não há danificação.

$$d = \frac{A_D}{A} \quad (33)$$

sendo, A_D a área de defeitos de uma seção transversal e A a área total, conforme ilustrado na Figura 63.

Figura 63 - Seção transversal representando o (a) material intacto e o (b) material degradado



Fonte: BESERRA (2015).

Sabendo-se, portanto, da presença da área danificada, a região que fornece resistência efetiva à esforços é conhecida como área efetiva ($\bar{A}$), Eq. 34.

$$\bar{A} = A - A_D \quad (34)$$

Nesse modelo foi inserido um conceito de tensões efetivas para melhor representação do efeito de danificação do material. Para entender essa representação, vamos partir de um elemento unidimensional submetido a um esforço de tração uniaxial (Figura 64). Definindo-se uma tensão aparente (nominal) σ associada à área total A de uma seção transversal, e, após a degradação do material, uma tensão efetiva de dano $\bar{\sigma}$ associada à área efetiva $\bar{A}$, temos que:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (35)$$

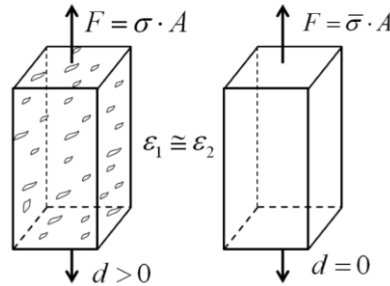
e

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{\bar{A}} \quad (36)$$

Tratando essas duas equações chegamos a:

$$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}} = \frac{\bar{A}}{A} = 1 - d \rightarrow \sigma = (1 - d)\bar{\sigma} \quad (37)$$

Figura 64 - Elemento unidimensional submetido a um carregamento uniaxial F



Fonte: BESERRA (2015).

Assim, temos que para o material na configuração intacta, $d = 0$, a tensão efetiva é equivalente à tensão nominal, mas à medida que o dano cresce, $d > 0$, e se aproxima de 100 %, a tensão nominal tem seu limite tendendo a zero.

3.3.2 Deformações na ocorrência de dano

Seguindo então com o conceito de tensão efetiva e admitindo o princípio da equivalência das deformações, proposto por LEMAITRE & CHABOCHE (1994) que afirma que a deformação associada ao aplicar uma tensão nominal em um meio danificado é equivalente à deformação de um meio não danificado submetido a uma tensão efetiva. Assim, temos:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_D} \quad (38)$$

e

$$\varepsilon_2 = \frac{\bar{\sigma}}{E} \quad (39)$$

Onde E é o módulo de Young do material não danificado e E_D é o módulo de Young do material degradado. Dessas equações podemos ter que:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \rightarrow \frac{\bar{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{E_D} \rightarrow E_D = E \frac{\sigma}{\bar{\sigma}} \rightarrow E_D = (1 - d)E \quad (40)$$

Dessa maneira:

$$\sigma = E_D \varepsilon \rightarrow \sigma = (1 - d)E \varepsilon \rightarrow \sigma = (1 - d)\bar{\sigma} \quad (41)$$

sendo

$$\bar{\sigma} = E \varepsilon \quad (42)$$

$\bar{\sigma}$ representa a tensão efetiva, que possui um comportamento elástico linear.

3.3.3 Critério de degradação

O domínio elástico do dano é estabelecido pelo critério de degradação do material, no qual uma função de dano, $\varphi(\sigma)$, é descrita a partir da tensão equivalente, $\tau(\sigma)$, e da variável interna do modelo, q .

$$\varphi(\sigma) = \tau(\sigma) - q \leq 0 \quad (43)$$

no qual $\tau(\sigma)$ representa a evolução das tensões no domínio elástico e q define uma tensão que tem um limite na máxima tensão do domínio elástico, q_0 .

Levando para o espaço das tensões efetivas temos:

$$\frac{\varphi(\sigma)}{1 - d} = \frac{\tau(\sigma)}{1 - d} - \frac{q}{1 - d} \leq 0 \quad (44)$$

$$\bar{\varphi}(\sigma) = \tau(\bar{\sigma}) - r \leq 0 \quad (45)$$

no qual r é uma variável interna que define o limite do domínio elástico no espaço das tensões efetivas.

Tem-se, então que a variável dano pode ser escrita em função das variáveis q e r :

$$r = \frac{q}{1-d} \rightarrow d = 1 - \frac{q}{r} \quad (46)$$

As relações de carga e descarga de Kuhn-Tucker pode ser definida da seguinte maneira:

$$\dot{d} \geq 0 \quad (47)$$

$$f(\bar{\sigma}) \leq 0 \quad (48)$$

$$\dot{d}f(\bar{\sigma}) \geq 0 \rightarrow \text{Condição de consistência} \quad (49)$$

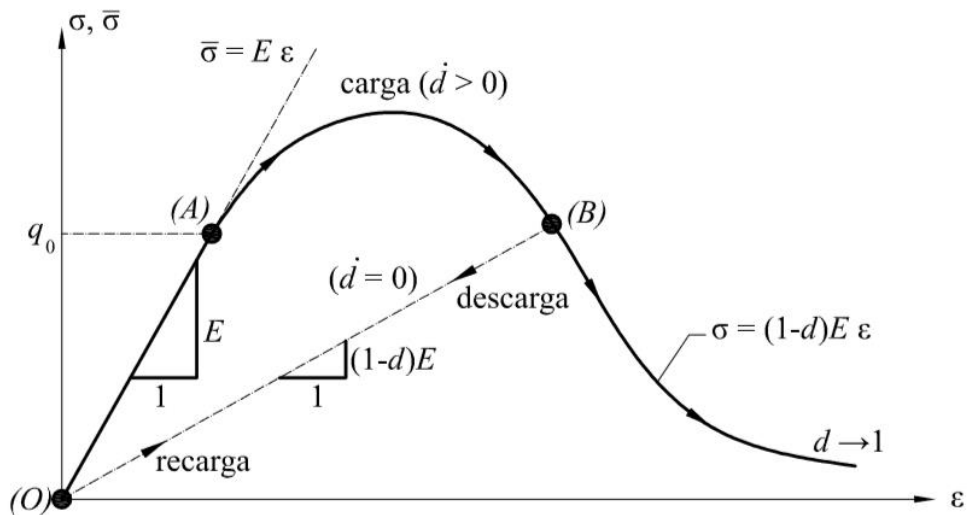
Mais especificamente:

$$\text{Se } f(\bar{\sigma}) < 0 \rightarrow \dot{d} = 0 \rightarrow \text{regime elástico} \quad (50)$$

$$\text{Se } f(\bar{\sigma}) = 0 \rightarrow \begin{cases} \dot{\bar{\sigma}} < 0 \rightarrow \begin{cases} \dot{d} = 0 \\ \dot{r} = 0 \end{cases} \rightarrow \text{descarga elástica} \\ \dot{\bar{\sigma}} > 0 \rightarrow \begin{cases} \dot{d} > 0 \\ \dot{r} = \dot{\bar{\sigma}} > 0 \end{cases} \rightarrow \text{carga ou recarga} \end{cases} \quad (51)$$

A Figura 65 descreve as etapas de carga e descarga de um material submetido a tensões de carga, descarga e recarga, identificando os pontos de evolução da degradação do material quando supera o limite elástico.

Figura 65 – Diagrama de tensão x deformação



Fonte: MAEDO (2015).

No trecho AO o gráfico mostra o comportamento elástico linear, quando não há danificação do material. Seguindo com a evolução das tensões, no trecho AB, a tensão ultrapassa o limite do regime elástico, ocorrendo a etapa do carregamento, onde a degradação do material é crescente ($d \neq 0$).

Após a tensão de pico que o material suporta, até atingir o ponto B o dano continua crescente. Do ponto B segue-se para a descarga, quando as tensões são aliviadas pela redução da sobrecarga até o ponto O, nessa etapa a evolução da variável de dano (d) não ocorre.

O solo pode, então, ser recarregado no trecho OB, mas devido a danificação que ocorreu, o seu módulo de elasticidade é atualizado de E para $Ed = (1 - d)E$.

Chegando no ponto B o solo pode continuar no ciclo como uma carga ou recarga, nessa etapa as tensões no elemento danificado são aliviadas devido à evolução da variável de dano, chegando até $d = 1$, com a danificação de 100% do elemento.

3.3.4 Lei de evolução do dano

O comportamento dos materiais frente à sua danificação varia de um dano perfeito, endurecimento ou abrandamento. Por tanto, diferentes leis de evolução de dano são estudadas para se avaliar adequadamente o comportamento dos materiais após o limite de elasticidade. (BESERRA, 2015; SEIXAS, 2015)

Esse comportamento do material após o limite elástico pode ser regido por leis de dano de endurecimento ou amolecimento, que quando forem regidas por um comportamento linear, podem ser escritas em função de q e r :

$$q(r) = q_0 + H(r - q_0) \quad (52)$$

sendo $q_0 = r_0$, e H um parâmetro que indica se o comportamento do material é de enrijecimento ou amolecimento:

$$\begin{cases} H > 0 \rightarrow \text{endurecimento} \\ H < 0 \rightarrow \text{amolecimento} \end{cases} \quad (53)$$

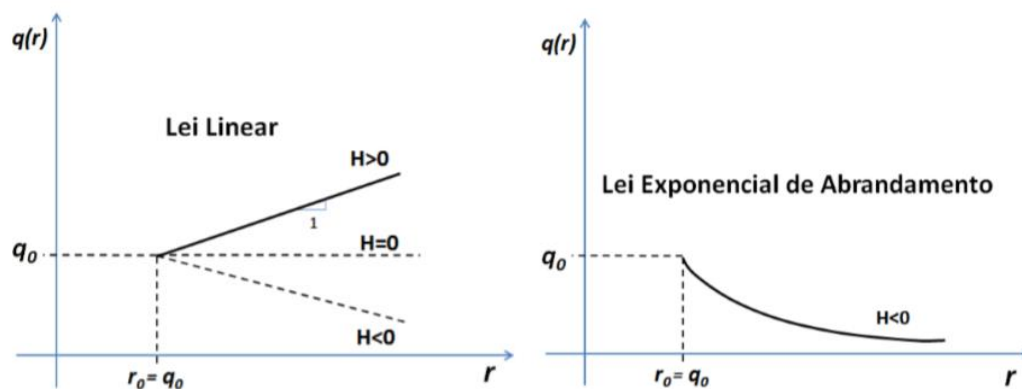
Quando o dano for regido por um comportamento exponencial de abrandamento tem-se:

$$q(r) = q_0 e^{A_e \left(\frac{1}{r_0} \right)} \quad (54)$$

onde A_e é um parâmetro de abrandamento exponencial.

Para um melhor entendimento desse comportamento após ruptura, a Figura 66 ilustra o comportamento de endurecimento e amolecimento.

Figura 66 – Evolução (a) linear e (b) exponencial do dano



Fonte: OLIVEIRA (2016).

3.3.5 Modelo constitutivo de dano à tração

A ruptura por tração é o mecanismo mais comum de geração de fraturas. No modelo de dano a degradação do material ocorre em um estado de tração, enquanto que ambientes compressivos permanecem com o comportamento elástico. (SEIXAS, 2015)

O tensor de tensão efetiva de dano é dada como:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (55)$$

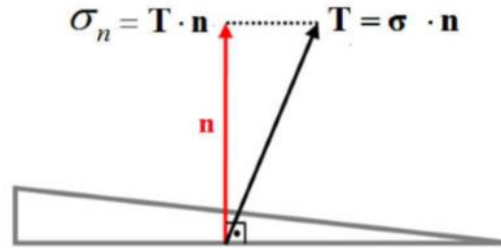
onde $\mathbf{C}$ é o tensor constitutivo elástico.

Esse modelo constitutivo apresenta uma lei constitutiva que pode ser escrita como:

$$\begin{cases} \sigma = (1 - d)\bar{\sigma} & \text{se } \bar{\sigma}_n > 0 \rightarrow \text{estado tensional} \\ \sigma = \bar{\sigma} & \text{se } \bar{\sigma}_n \leq 0 \rightarrow \text{estado compressivo} \end{cases} \quad (56)$$

onde $\bar{\sigma}_n$ é a componente normal do vetor de tensões $\bar{T}$, que é um vetor gerado pela projeção do tensor de tensões na direção normal à base do elemento, Figura 67.

Figura 67 – Vetor de tensões $\bar{T}$ projetado na direção da normal à base do elemento



Fonte: SANCHEZ et. al. (2014).

O domínio elástico é estabelecido por:

$$\varphi(\sigma) = \tau(\sigma) - q(r) \leq 0 \quad (57)$$

onde q e r são variáveis internas de tensão e deformação do material, e τ é a tensão equivalente no domínio elástico.

A tensão equivalente é a componente normal $\bar{\sigma}_n$, que é utilizada para definir o critério de degradação do material:

$$\bar{\tau}(\bar{\sigma}) = \bar{\sigma}_n \quad (58)$$

$$\varphi = \bar{\sigma}_n - q(r) \leq 0 \quad (59)$$

Ou ainda

$$\bar{\varphi} = \bar{\sigma}_n - r \leq 0 \quad (60)$$

sendo a variável de dano expressa como:

$$d(r) = 1 - \frac{q(r)}{r} \quad (61)$$

r controla o domínio elástico no espaço das tensões efetivas. A Lei de evolução da variável r é, portanto:

$$r = \text{Max}[\bar{\sigma}_n, r_0] \quad (62)$$

Assim, o valor de r atinge o valor máximo de tensão de tração, tendo início no valor de resistência a tração do material f_t , $r_0 = f_t$, e máximo em $\bar{\sigma}_n$.

A evolução da variável interna $q(r)$ pode ser expressa pela lei de abrandamento exponencial:

$$q(r) = f_t e^{\frac{f_t^2}{G_f E} h (1 - \frac{r}{f_t})} \quad (63)$$

sendo E o módulo de elasticidade, f_t a resistência à tração, G_f a energia de fratura do material, e h a espessura da banda de localização das deformações.

Na Tabela 2 está apresentado um resumo das relações constitutivas do modelo de dano à tração.

Tabela 2 – Equações constitutivas do modelo de dano à tração

Relação constitutiva:	$\sigma = (1 - d)\bar{\sigma}$, se $\bar{\sigma}_n > 0$ $\sigma = \bar{\sigma}$, se $\bar{\sigma}_n \leq 0$
Tensões efetivas:	$\bar{\sigma} = \mathbf{C} : \varepsilon$
Tensão equivalente:	$\bar{\tau}(\bar{\sigma}) = \bar{\sigma}_n$
Critério de dano:	$\varphi = \bar{\tau} - q(r) \leq 0$
Evolução da variável r :	$r = \text{Max}[\bar{\sigma}_n, f_t]$
Evolução do dano:	$d(r) = 1 - \frac{q(r)}{r}$, $d = [0,1]$
Lei de abrandamento:	$q(r) = f_t e^{\frac{f_t^2}{G_f E} h (1 - \frac{r}{f_t})}$

Fonte: BESERRA (2015)

3.3.6 Algoritmo de integração Implícito-Explícito (IMPL-EX)

O algoritmo de integração implícita é muito eficiente para soluções numéricas, porém, em casos muito complexos esses algoritmos apresentam alta não linearidade

e podem apresentar difícil convergência. Diante disso, (OLIVER; HUESPE; CANTE, 2008) propuseram uma simplificação do algoritmo de integração implícita com uma projeção explícita e robusta da variável de dano. Essa simplificação facilita a convergência no que reduz a não linearidade do algoritmo.

A utilização dessa simplificação pode fazer com que o algoritmo apresente oscilações ou perda de precisão, porém, esse problema pode ser resolvido com a redução do incremento de tempo. (BESERRA, 2015)

Esse algoritmo IMPL-EX para o modelo constitutivo de dano à tração trata a variável interna r , utilizada no cálculo da variável de dano atual. Para o passo de tempo seguinte, $j + 1$, temos:

$$d(\tilde{r}_{j+1}) = 1 - \frac{q(\tilde{r}_{j+1})}{\tilde{r}_{j+1}} \quad (64)$$

onde

$$\tilde{r}_{j+1} = r_j + \Delta r_j \quad (65)$$

e

$$\Delta r_j = r_j - r_{j-1} \quad (66)$$

Pode-se afirmar então que nesse caso a variável $\tilde{r}_{j+1}$ é uma aproximação da função r_{j+1} , a partir do seu valor calculado no passo de tempo anterior, utilizada no cálculo da variável dano.

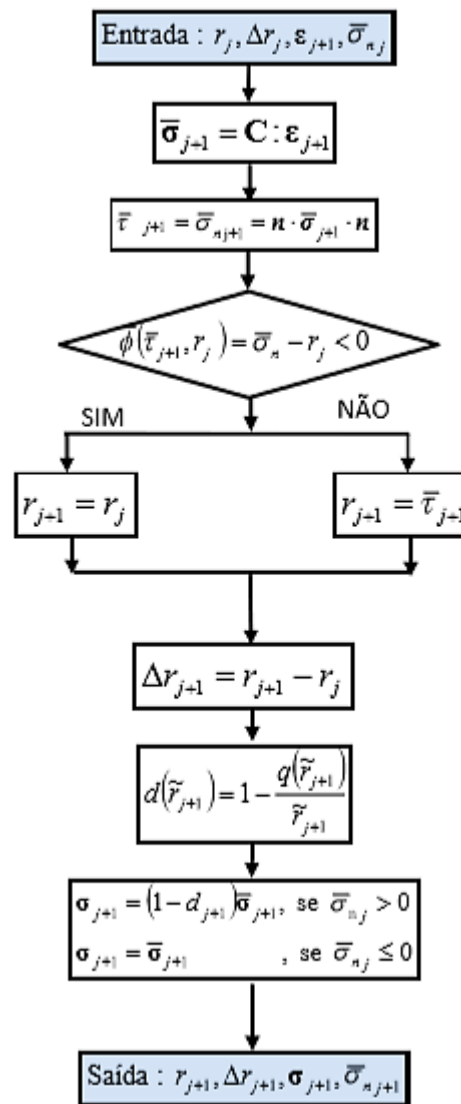
A matriz constitutiva tangente, $\mathbf{C}_{tg}$, fica definida como:

$$\mathbf{C}_{tg} = \frac{\boldsymbol{\sigma}_{j+1}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}} = (1 - d)\mathbf{C}, \text{ se } \bar{\sigma}_n > 0 \quad (67)$$

$$\mathbf{C}_{tg} = \frac{\boldsymbol{\sigma}_{j+1}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}} = \mathbf{C}, \text{ se } \bar{\sigma}_n \leq 0 \quad (68)$$

A Figura 68 mostra o algoritmo IMPL-EX de integração de tensões para o modelo de dano à tração já implementado no CODE-BRIGHT por BESERRA, 2015.

Figura 68 – Fluxograma do algoritmo IMPL-EX



Fonte: SEIXAS, 2015.

3.3.7 Algoritmo de controle do passo de tempo

Como a aproximação de tensões do algoritmo IMPL-EX, foi visto que esse algoritmo pode perder em precisão quando comparado à integração implícita, podendo também apresentar oscilações numéricas a depender do incremento de tempo utilizado. Dessa maneira, para garantir que o algoritmo fosse robusto, BESERRA (2015) inseriu uma ferramenta de controle automático do passo de tempo, que, a partir da degradação do material do passo de tempo atual, calcula o próximo incremento de tempo.

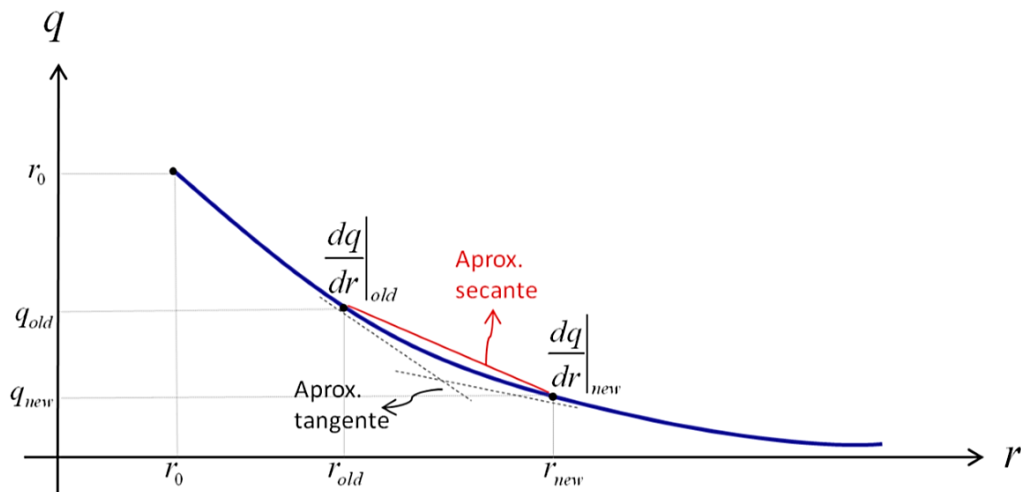
A partir da lei de abrandamento, vista anteriormente, a taxa de degradação do material pode ser medida por dq/dr . Sabendo disso, a aproximação dessa derivada (Figura 69) pode ser tida como tangente:

$$\left. \frac{dq}{dr} \right|_{rg} = \frac{1}{2} \left(\left. \frac{dq}{dr} \right|_{new} + \left. \frac{dq}{dr} \right|_{old} \right) \quad (69)$$

ou secante:

$$\left. \frac{dq}{dr} \right|_{sec} = \frac{q_{new} - q_{old}}{r_{new} - r_{old}} \quad (70)$$

Figura 69 – Evolução da variável q em função de r



Fonte: Beserra (2015).

A diferença entre as aproximações secante e tangente é o erro associado ao passo de tempo atual (Δt). Logo, é calculado um fator que relaciona o erro com uma tolerância previamente definida.

$$Erro = \frac{\left. \frac{dq}{dr} \right|_{sec} - \left. \frac{dq}{dr} \right|_{tg}}{\left. \frac{dq}{dr} \right|_{tg}} \quad (71)$$

$$Fator = \sqrt[4]{\frac{Tol}{Erro}} \quad (72)$$

$$\Delta t^{new} = \Delta t \cdot Fator \quad (73)$$

Assim, pode-se afirmar que quanto maior o erro, menor será o fator calculado, e assim o próximo passo de tempo será reduzido. Há, porém, uma limitação para esse fator de redução do incremento de tempo:

$$\begin{cases} \text{Se Fator} > 1.4 \rightarrow \text{Fator} = 1.4 \\ \text{Se Fator} < 0.7 \rightarrow \text{Fator} = 0.7 \end{cases} \quad (74)$$

Além disso, o incremento de tempo também é limitado aos valores máximos e mínimos definidos previamente.

3.4 TÉCNICAS EM ELEMENTOS FINITOS PARA REPRESENTAÇÃO DA FORMAÇÃO DE FISSURAS

Na engenharia diversos materiais são submetidos à esforços de tração. Sabendo disso, vários autores (MAEDO et al., 2018; MANZOLI et al., 2014, 2018; SÁNCHEZ; MANZOLI; GUIMARÃES, 2014b; SANCHO et al., 2007; VO et al., 2018) têm investigado técnicas para representar esse fenômeno e o comportamento dos materiais submetidos a esse tipo de esforço.

Nesse sentido, a utilização de técnicas que simplificam numericamente a física do problema tem sido comum nos últimos anos. Esse processo tem sido essencial para a reprodução de fenômenos de dissipativos associados à deterioração do material. Nesse sentido, o método de elementos finitos tem sido aplicado para realizar aproximações nos campos cinemáticos de deslocamentos e deformações para representar a transição entre campos contínuos e descontínuos.

Com o intuito de representar a degradação do material, uma descontinuidade pode ser introduzida na cinemática do problema através da técnica de Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes. Essa técnica é capaz de representar a degradação do material através da introdução de uma cinemática espacial que passa pela zona de processamento da fratura em bandas estreitas de deformação, denominadas descontinuidades fracas, até o limite completo de degradação do material, formando uma descontinuidade no campo dos deslocamentos, descontinuidades forte (SEIXAS, 2015).

Nos elementos finitos, essa técnica pode ser aplicada através da incorporação de descontinuidades fortes no contínuo, que consiste em enriquecer os campos cinemáticos do elemento através da inserção de uma banda estreita que atravessa o elemento para representar o comportamento não-linear do material, essa técnica tem sido avaliada por diversos autores (BELFORT et al., 2018; BESERRA, 2015).

Outra maneira de incorporar essa descontinuidade é através da inserção de elementos finitos com elevada razão de aspecto que tem sido vastamente estudada (ANTUNES et al., 2016; MACIEL, 2017; MAEDO, 2015; SEIXAS, 2015). Esses elementos possuem uma cinemática semelhante à incorporação de descontinuidades fortes no contínuo, porém eles são empregados como elementos de interface que podem reproduzir o efeito da danificação do material por esforços de tração (MANZOLI et al., 2012), permitindo descrever a formação das fissuras em uma malha de um contínuo em elementos finitos (SANCHEZ et al., 2014).

Nesse contexto, Sanchez et al. (2014), realizaram modelagens numéricas do problema de ressecamento do solo e mostraram que essa técnica é adequada para a investigação desse tipo de cenário geotécnico.

Além disso, outras técnicas numéricas têm sido desenvolvidas para representar o comportamento dos materiais frente à degradação, tais como modelos coesivos (SÁNCHEZ; MANZOLI; GUIMARÃES, 2014a; SANCHO et al., 2007; VO et al., 2018), SPH (smoothed particle hydrodynamics) (BUI et al., 2015), elementos finitos de alta razão de aspecto (CLETO et al., 2017; MAEDO et al., 2018; MANZOLI et al., 2018), PDS-FEM (Particle Discretization Scheme Finite Element Method) (HIROBE; OGUNI, 2017), entre outros.

3.5 TÉCNICA DE FRAGMENTAÇÃO DE MALHA

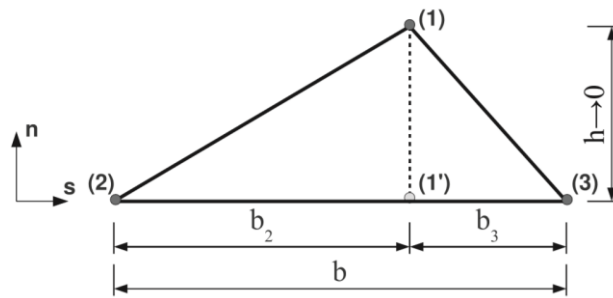
Dentre esses métodos, o método de elementos finitos de alta razão de aspecto foi escolhido para as análises desse trabalho por ser uma técnica que não exige a utilização de algoritmos complexos para a localização das bandas de deformações. Esses elementos são contínuos, mas com uma alta razão entre o seu comprimento e a sua altura, sendo delgados e discretos numa malha com uma lei de abrandamento

das tensões que leva em consideração a espessura do elemento, e a correta dissipação, associada a sua energia de fratura (MAEDO, 2015).

4.2.1 Elemento Finito de Interface

O elemento finito de interface é inserido com três nós, como ilustrado na Figura 70. Nessa figura pode ser observada a altura do elemento h , que será muito reduzida, tendendo a zero, dessa maneira a relação entre a base “ b ” e a altura “ h ” será de alta razão, sendo este um elemento de alta razão de aspecto (MANZOLI et. al., 2012).

Figura 70 – Elemento finito com alta razão de aspecto



Fonte: Manzoli (2012).

Considerando o sistema cartesiano (s, n) dado e n ortogonal a base do elemento, o tensor de deformações pode ser dado por:

$$\varepsilon = \tilde{\varepsilon} + \hat{\varepsilon} \quad (75)$$

Sendo:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{1}{b} \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}(u_n^{(3)} - u_n^{(2)}) & 0 \\ \frac{1}{2}(u_n^{(3)} - u_n^{(2)}) & (u_n^{(3)} - u_n^{(2)}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (76)$$

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} [[u]]_n & \frac{1}{2}[[u]]_s & 0 \\ \frac{1}{2}[[u]]_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (77)$$

com:

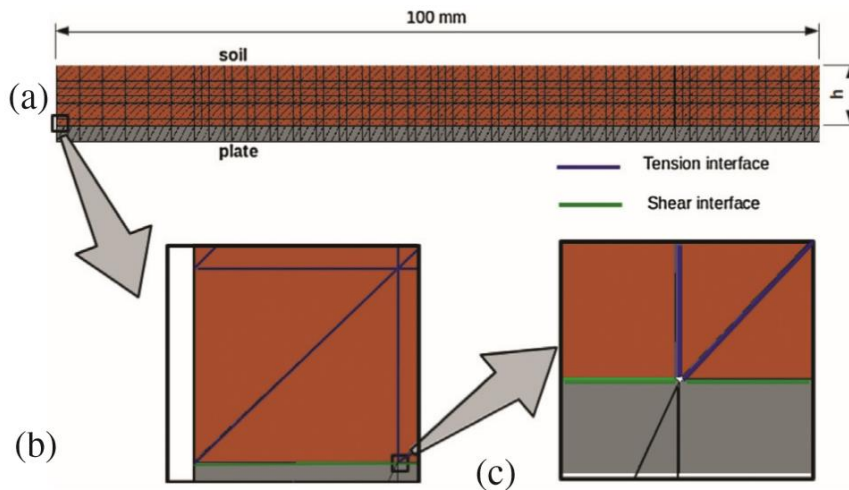
$$[[u]]_n = u_n^{(1)} - u_n^{(1')} = u_n^{(1)} - [\alpha u_n^{(3)} + (1 - \alpha) u_n^{(2)}] \quad (78)$$

$$[[u]]_s = u_s^{(1)} - u_s^{(1')} = u_s^{(1)} - [\alpha u_s^{(3)} + (1 - \alpha) u_s^{(2)}] \quad (79)$$

Onde $u_n^{(i)}$ e $u_s^{(i)}$ são deslocamentos do nó “i” no eixo “n” e “s”. Dessa maneira, quando “h” tende a zero, $\tilde{\epsilon}$ se torna limitado, o que não ocorre com relação a $\hat{\epsilon}$. Nota-se na Figura 36, portanto, que na condição limite, a projeção do nó (1) na base do elemento e o nó convergem para o mesmo ponto material, sendo o deslocamento relativo computado como uma descontinuidade no campo dos deslocamentos (descontinuidade forte).

Esses elementos de alta razão de aspecto são introduzidos entre os elementos do contínuo originais, aumentando o número de nós e de graus de liberdade do problema, o que gera um aumento do tempo computacional (SANCHEZ et. al., 2014).

Figura 71 - (a) Malha em elementos finitos de caso 2D, (b) zoom de elementos e um (c) segundo zoom para visualizar os elementos de interface em azul e verde



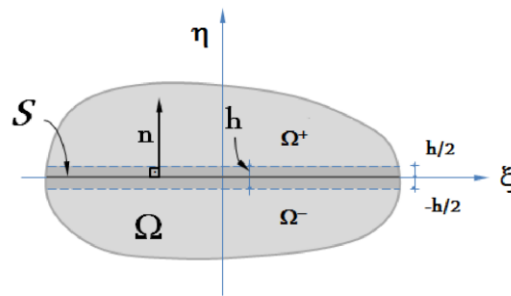
Fonte: SANCHEZ et. al. (2014).

Todavia, mesmo com esse aumento do tempo computacional, muitos problemas de engenharia se mostram capazes de suportar essa técnica de fragmentação de malha. Ainda assim, para problemas de grandes dimensões recomenda-se inserir esses elementos apenas as regiões propícias à danificação, reduzindo o tempo computacional. (SANCHEZ et. al., 2014)

4.2.2 Cinemática da Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes

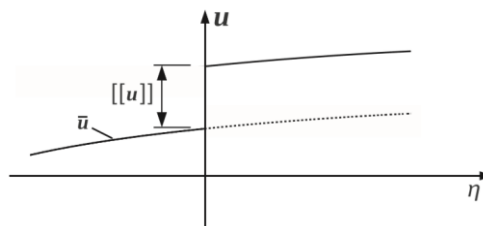
Considerando o elemento cujo domínio é Ω , apresentado na Figura 72, dividido por uma descontinuidade S em Ω^+ e Ω^- , localizando uma banda de deformações de espessura h , o deslocamento em um ponto material $\mathbf{x}$ no interior desse elemento pode ser descrito como a soma entre o deslocamento regular $\bar{\mathbf{u}}$ e a descontinuidade do campo dos deslocamentos, associado ao deslocamento da descontinuidade $[[\mathbf{u}]]$ ao longo de S no limite para $h \rightarrow 0$, Figura 73.

Figura 72 – Representação da Descontinuidade S e da banda de localização h



Fonte: OLIVEIRA (2016).

Figura 73 – Campo de deslocamentos da descontinuidade forte



Fonte: MANZOLI et al. (2012).

Dessa maneira o deslocamento em S é dada por:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + H_s [[\mathbf{u}]] \quad (80)$$

onde H_s é a função degrau, *Heaviside*:

$$H_s = \begin{cases} 0 & \text{se } \eta < 0 \\ 1 & \text{se } \eta \geq 0 \end{cases} \quad (81)$$

4 MODELAGEM NUMÉRICA DO RESSECAMENTO DE UMA ARGILA EXPANSIVA

Nesse capítulo está apresentada a modelagem numérica em 2D do ressecamento de uma argila expansiva. Devido a limitação da modelagem numérica em 2D, essa simulação representa a superfície do solo, de maneira que foi possível representar a tendência do movimento de ressecamento do solo com livre movimentação na base.

Assim, foram escolhidos 4 cenários para representar numericamente o comportamento do ressecamento do solo utilizando as mesmas configurações geométricas dos ensaios das amostras No. 1T, No. 5T, No. 6T e No. 7T apresentados no Capítulo 2 dessa tese. Esses cenários foram escolhidos por fornecerem configurações sem a presença de elementos rígidos, com a presença de um elemento rígido, com três e com dez.

O ensaio de ressecamento foi realizado em Paris com a argila Romainville, como dito anteriormente, e não houve tempo hábil, no local, para se realizar os ensaios necessários (adensamento com monitoramento da sucção, resistência ao cisalhamento, ensaio de sucção e de resistência à tração) para se obter os parâmetros dos modelos constitutivos utilizados nesse trabalho.

Diante disso, para que o comportamento de solos expansivos fosse investigado não só experimentalmente, mas também numericamente, de modo a viabilizar a investigação numérica do comportamento hidromecânico desse tipo de solo, foram utilizados parâmetros característicos de solos argilosos expansivos oriundos da literatura (ALONSO; GENS; JOSA, 1990; MAEDO et al., 2018; MORENO, 2011; SILVA, 2012).

Dessa maneira, esse item vem apresentar a viabilidade de utilizar o acoplamento dos modelos constitutivos apresentados anteriormente (BBM e Dano à tração) aliados à técnica de elementos finitos de alta razão de aspecto para representar o fissuramento em solos argilosos.

O modelo BBM foi necessário para representar a redução de volume nos elementos finitos convencionais devido à redução da saturação e ao aumento da sucção. Já o modelo de Dano à tração foi utilizado nos elementos finitos de alta razão de aspecto para representar a formação de fissuras e sua propagação, pois, diante da presença de tensões de tração na superfície da amostra, ao se atingir o valor da resistência à tração, o elemento danifica e a abertura de fissuras é iniciada.

A modelagem numérica foi realizada através da ferramenta numérica CODE_BRIGHT, inicialmente desenvolvido por (OLIVELLA et al., 1996) e aperfeiçoado por outros autores, dentre eles, BESERRA (2010, 2015) e NÓBREGA (2008). Esse é um programa em elementos finitos capaz de resolver problemas mecânicos de análise tensão-deformação considerando vários modelos constitutivos para solos e rochas e diversas possibilidades de condições de contorno aplicadas ao meio poroso deformável.

4.1 PARÂMETROS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Visando a representação de um solo argiloso expansivo, nos elementos finitos convencionais, foram utilizados valores elásticos para modelo constitutivo do BBM descritos na Tabela 3. Já para a representação da formação de fissuras, nos elementos finitos de alta razão de aspecto, foram utilizados os valores de Dano da Tabela 4.

Tabela 3 - Parâmetros elásticos do modelo BBM

κ_{io}	κ_{so}	α_{is}	α_{ss}	p_{ref}	v'
0.043	0.076	0.016	-0.080	0.10	0.42

Fonte: MAEDO et al. (2018).

Sendo:

- κ_{io} - Parâmetro elástico inicial para volume específico x tensão média
- κ_{so} - Parâmetro elástico inicial para volume específico x sucção
- α_{is} - Parâmetro para cálculo de κ_i
- α_{ss} - Parâmetro para cálculo de κ_s
- p_{ref} - Tensão média de referência

ν' - Coeficiente de Poisson

Tabela 4 - Parâmetros do modelo de Dano à tração

$E(MPa)$	$G_f(N/m)$	$f_t(MPa)$
4	0.8	0.04

Fonte: Modificado de MAEDO et al. (2018).

Sendo:

E Módulo de Young do material não danificado

f_t Resistência à tração

G_f Energia de fratura do material

E para os dados hidráulicos do material foram utilizados os valores da Tabela 5 e da Tabela 6, esses parâmetros foram baseados em valores médios encontrados na bibliografia (ALONSO; GENS; JOSA, 1990; MORENO, 2011; SILVA, 2012).

Tabela 5 - Parâmetros para Curva de Retenção

$P_o(MPa)$	$\sigma_o(MPa)$	λ	S_{rl}	S_{ls}
0.10	0.072	0.4	0.0	1.0

Sendo:

P_o Pressão de entrada de ar

σ_o Tensão de pré-adensamento na condição saturada

λ Índice de distribuição do tamanho dos poros

S_{rl} Grau de saturação residual

S_{ls} Grau de saturação máximo

Tabela 6 - Parâmetros para Cálculo da Permeabilidade

A_m	λ_m
1.0	2.0

Sendo:

A_m Parâmetro de ajuste

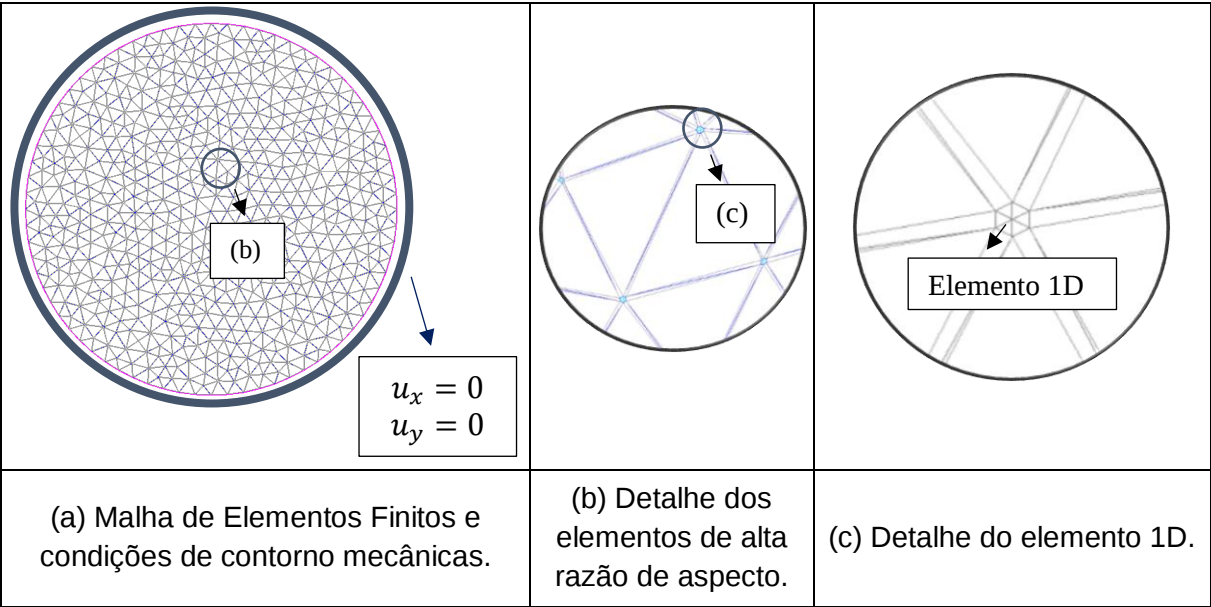
λ_m Parâmetro de ajuste

4.2 CENÁRIO 1T

O primeiro cenário avaliado teve a mesma configuração geométrica do ensaio experimental da amostra No. 1T. A geometria e as condições de contorno estão descritas na Figura 74. A malha foi constituída por 957 nós e 1912 elementos, e a condição de fluxo foi prescrita no elemento 1D, sendo essa condição vazão (-1E-08 kg/s).

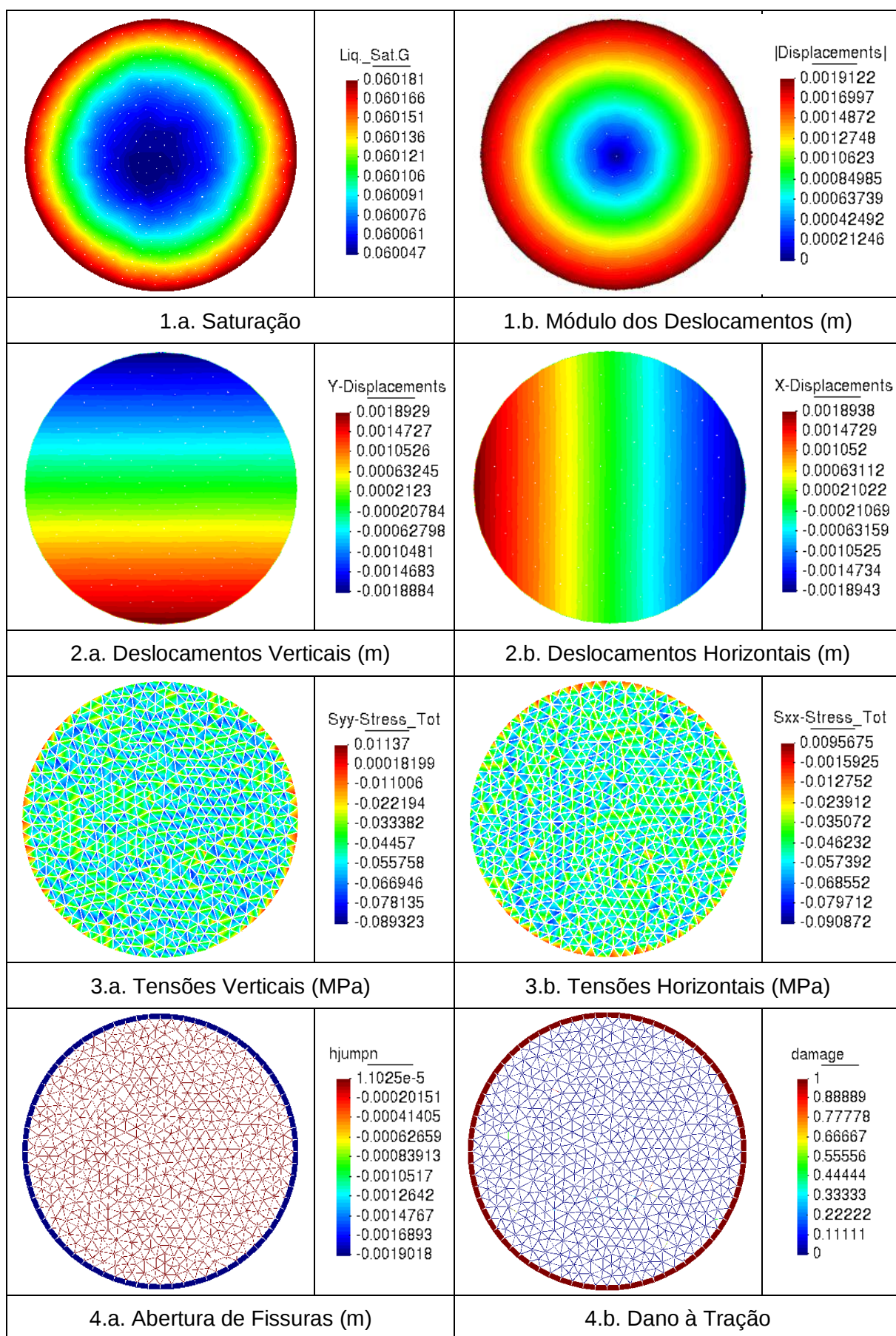
Para esse cenário foram obtidos os resultados de tensões, deslocamentos, porosidades, saturação, além dos resultados de abertura de fissuras, dano à tração e dos índices de vazios apresentado pela amostra. Esses resultados podem ser observados na Figura 75.

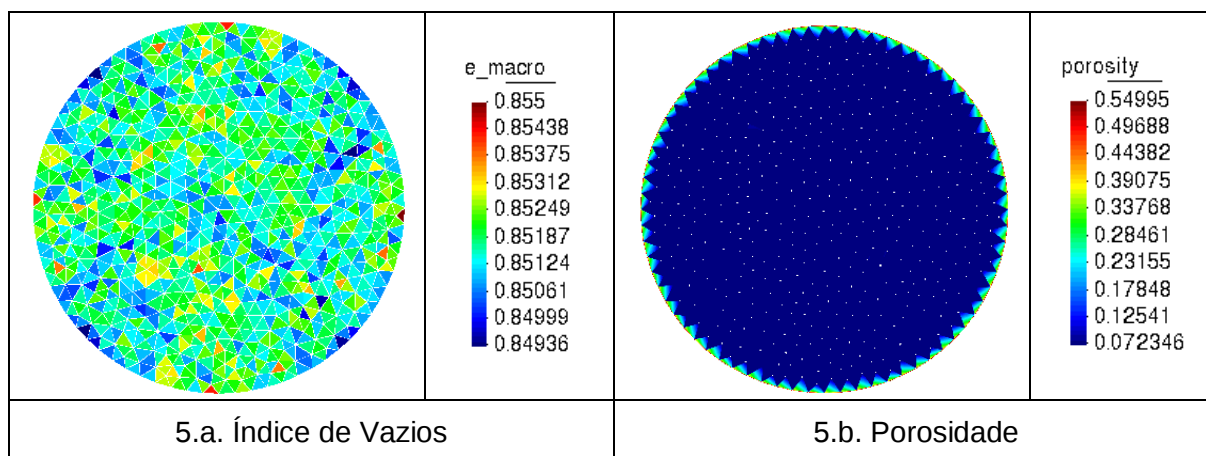
Figura 74 - Geometria e Condições de contorno do Cenário 1T



Fonte: A Autora (2019).

Figura 75 – Resultados em gráficos para o Cenário 1T





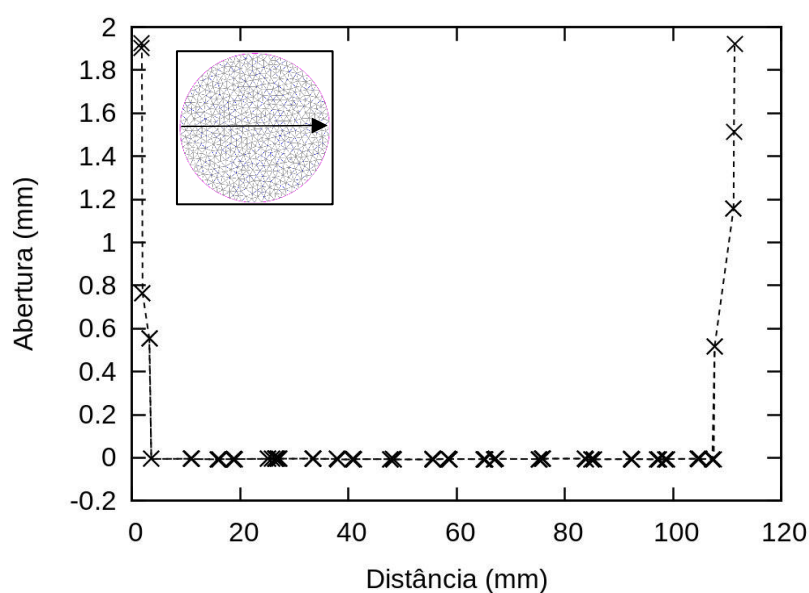
Fonte: A Autora (2019).

Esse cenário mostrou que para essa configuração, o comportamento do solo expansivo se apresentou com uma contração radial, concêntrica, com a abertura de fissuras exclusivamente ocorrendo nas bordas.

Também se observou uma resposta no campo das tensões de maneira uniformemente distribuída, mostrando a estabilidade do modelo numérico. Isso é confirmado pela distribuição dos índices de vazios e das porosidades.

Na Figura 76 pode ser confirmado o comportamento da modelagem do cenário 1T, com a abetura concentrada nas bordas.

Figura 76 – Abertura de fissura (mm) x Distância (mm) para o Cenário 1T

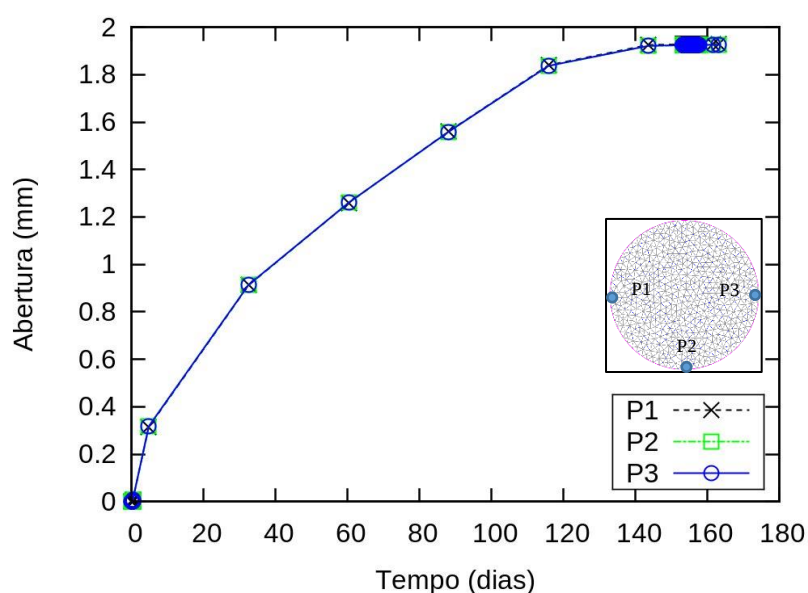


Fonte: A Autora (2019).

Se comparado o comportamento dessa simulação com o do ensaio da amostra No. 1T, apesar de serem solos expansivos diferentes, pode-se observar que as aberturas, para ambas investigações, se concentraram exclusivamente na borda. Esse comportamento mostra a mesma tendência da formação fissuras tanto para o ensaio experimental, quanto para a simulação numérica.

Se observarmos no ensaio, a abertura da fissura foi irregular, pois o solo teve uma aderência na parede da cápsula, fazendo a amostra transladar, já na simulação, como a aderência foi a mesma para todos os elementos, a amostra contraiu por igual, concentricamente ao longo da simulação. Na Figura 77 se observa o crescimento da abertura para os pontos da borda, P1, P2 e P3, em detalhe na imagem.

Figura 77 – Abertura de fissura (mm) x Tempo (dias) para o Cenário 1T



Fonte: A Autora (2019).

Foram, então, gerados cenários em planta, com a representação de inclusões rígidas inseridas na amostra de solo argiloso. Esses cenários possuem diferentes números de inclusões, de maneira a ser possível avaliar a sua influência na modelagem do comportamento dos solos expansivos.

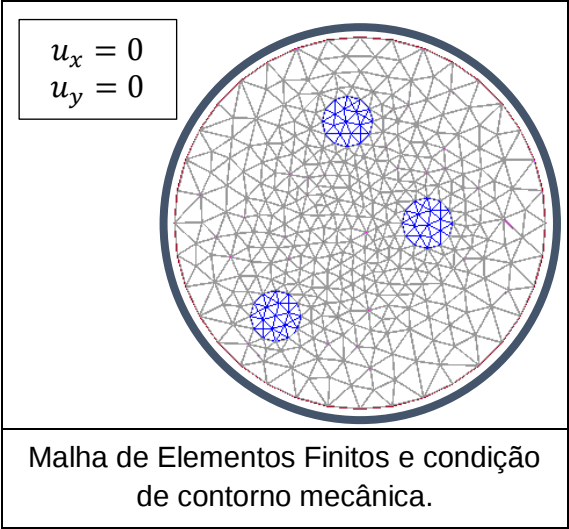
4.3 CENÁRIO 5T

O cenário 5T avaliado teve a mesma configuração geométrica do ensaio experimental da amostra No. 5T do Capítulo 2. A geometria e as condições de

contorno estão descritas na Figura 78. A malha foi constituída por 2456 nós e 4946 elementos, e a condição de fluxo foi prescrita no elemento 1D.

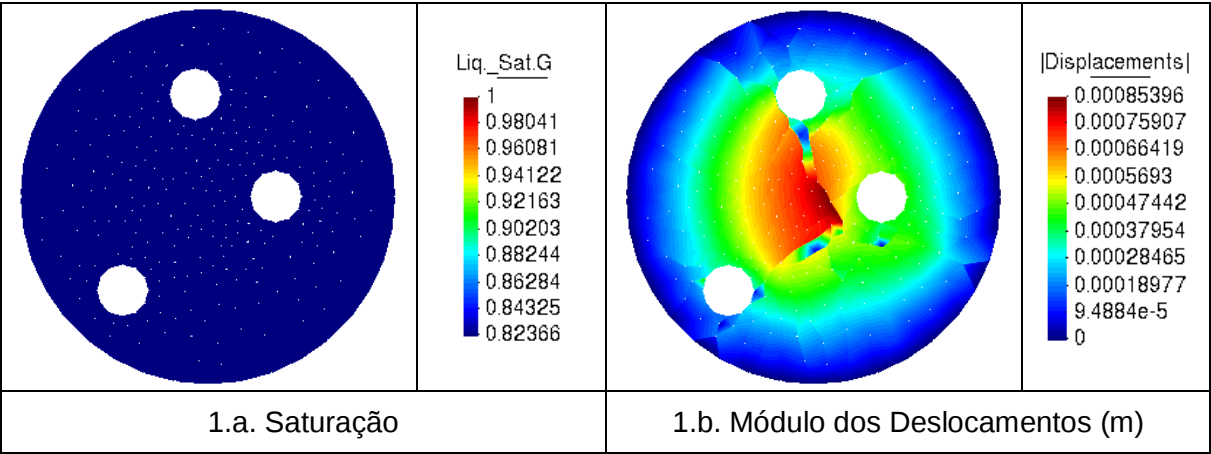
Similarmente ao cenário anterior, foram obtidos para o cenário atual os resultados das tensões, dos deslocamentos, das porosidades, além dos resultados de abertura de fissuras, dano à tração e dos índices de vazios apresentados pela amostra. Esses resultados podem ser observados na Figura 79.

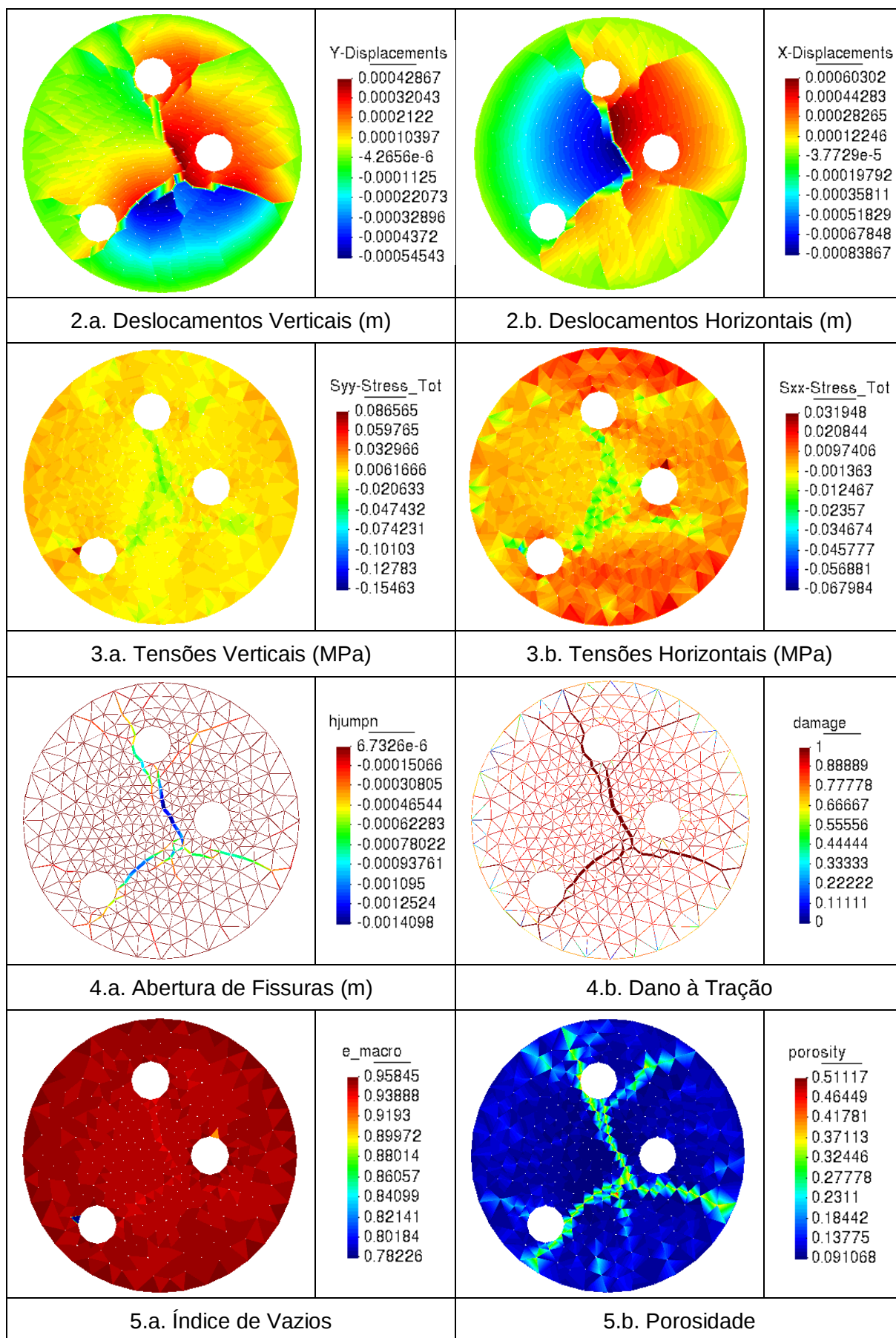
Figura 78 - Geometria e Condições de contorno do Cenário 5T



Fonte: A Autora (2019).

Figura 79 – Resultados em gráficos para o Cenário 5T





Fonte: A Autora (2019).

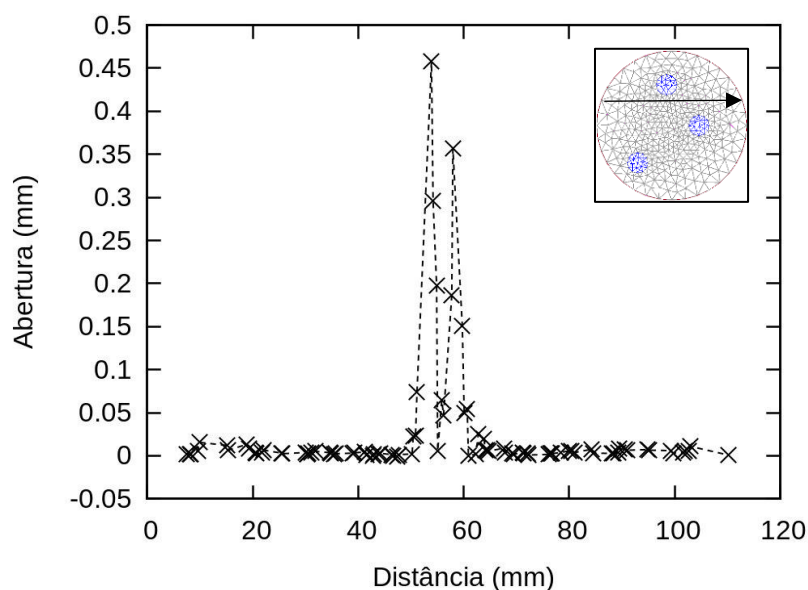
Nesse cenário, diferente do cenário anterior, se observou que a formação de fissuras não se deu primordialmente nas bordas, mas internamente à amostra. Observou-se que a presença das inclusões influenciou fortemente a concentração dos deslocamentos e das tensões próximas às mesmas, de maneira que as fissuras apareceram próximo às inclusões, nas regiões danificadas.

Na Figura 80 pode ser observada a concentração da abertura das fissuras na parte central da amostra, próximo à inclusão.

Essa simulação mostrou a concentração de fissuras conectando as inclusões. Isso pode ser observado também no ensaio que foi realizado em laboratório para a amostra No. 5T. Porém, sendo os dois solos diferentes, o comportamento foi diferente, mas ambos mostraram uma tendência da formação de fissuras a partir das inclusões.

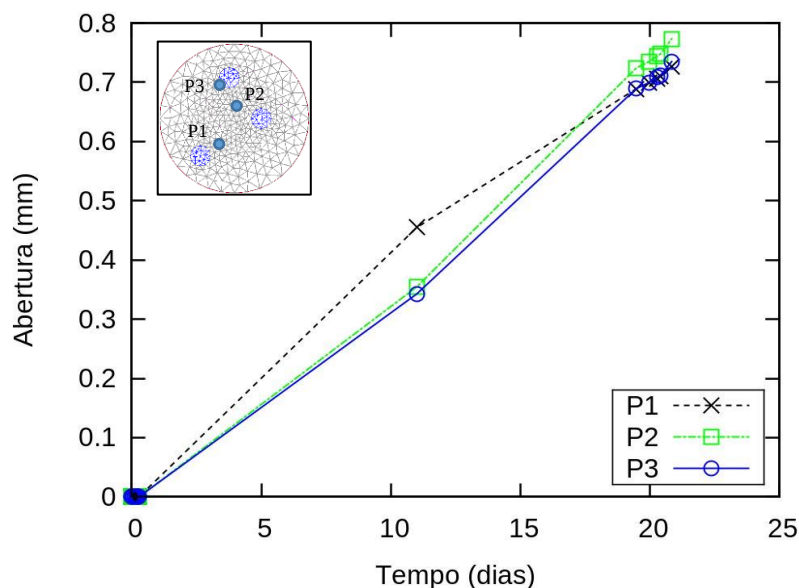
O comportamento da abertura das fissuras no tempo pode ser observado na Figura 81, onde se observou que as fissuras iniciam ao mesmo tempo, mas com taxas de crescimento diferentes. Isso também pode ser observado no resultado do ensaio da amostra No. 5T, onde as fissuras, próximo às inclusões, iniciaram ao mesmo tempo.

Figura 80 – Abertura de fissura (mm) x Distância (mm) para o Cenário 5T



Fonte: A Autora (2019).

Figura 81 – Abertura de fissura (mm) x Tempo (dias) para o Cenário 5T



Fonte: A Autora (2019).

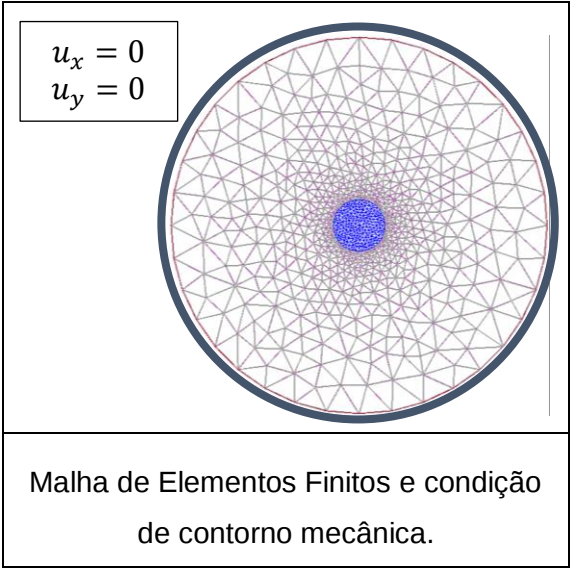
4.4 CENÁRIO 6T

O cenário 6T teve a mesma configuração geométrica do ensaio experimental da amostra No. 6T do Capítulo 2. A geometria e as condições de contorno estão descritas na Figura 82. A malha foi constituída por 4278 nós e 8602 elementos, e a condição de fluxo foi prescrita no elemento 1D.

Na Figura 83 estão ilustrados os resultados das tensões, dos deslocamentos, das porosidades, além dos resultados de abertura de fissuras, dano à tração e dos índices de vazios apresentados pela amostra No. 6T.

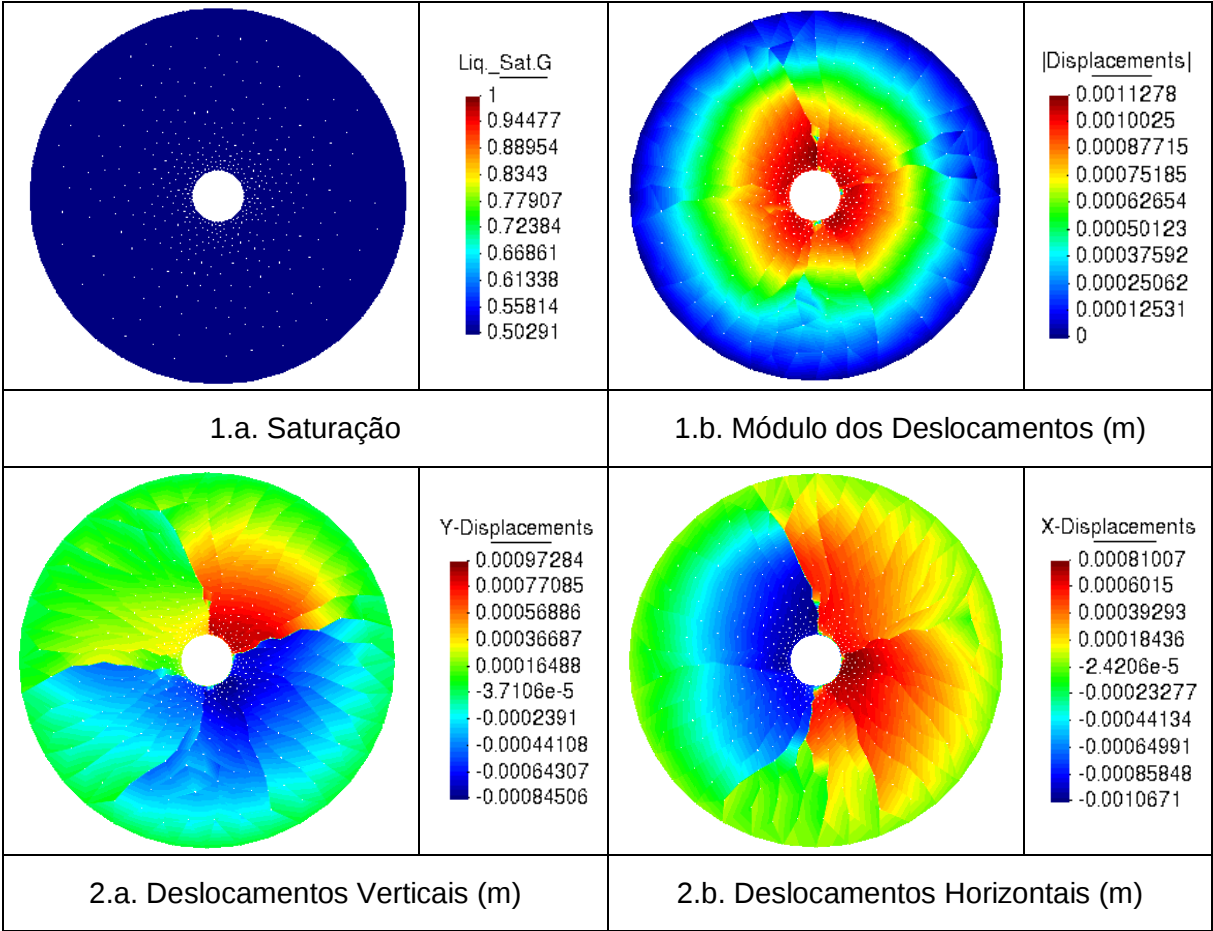
Nesse cenário 6T, de maneira semelhante ao cenário 5T se observou a influência da presença das inclusões nos resultados gráficos da Figura 83. Além disso, com a presença da inclusão no centro da amostra, se observou que as fissuras se formaram da inclusão para a borda numa direção perpendicular à inclusão, com uma tendência de seguir a direção do raio.

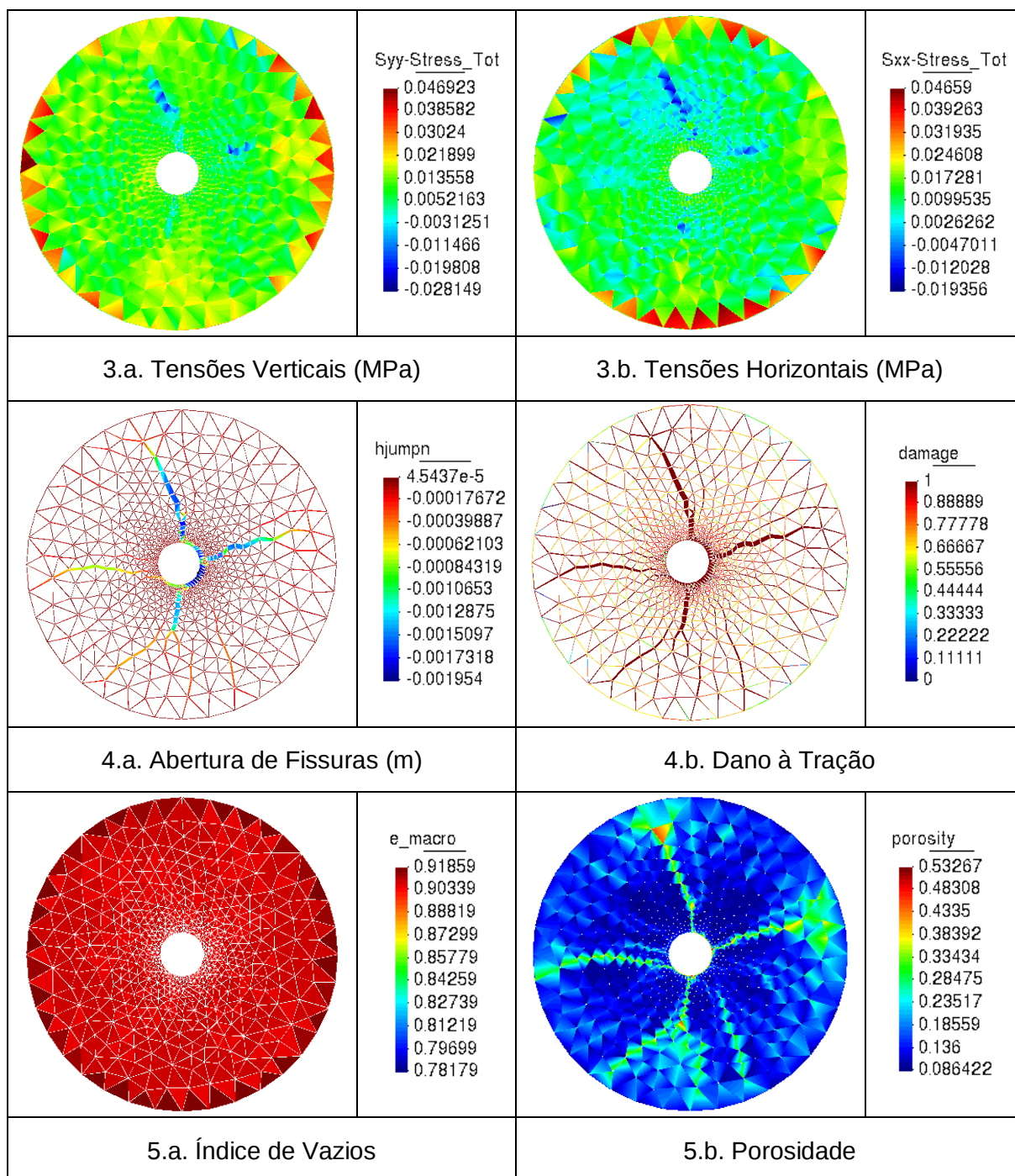
Figura 82 - Geometria e Condições de contorno do Cenário 6T



Fonte: A Autora (2019).

Figura 83 – Resultados em gráficos para o Cenário 6T



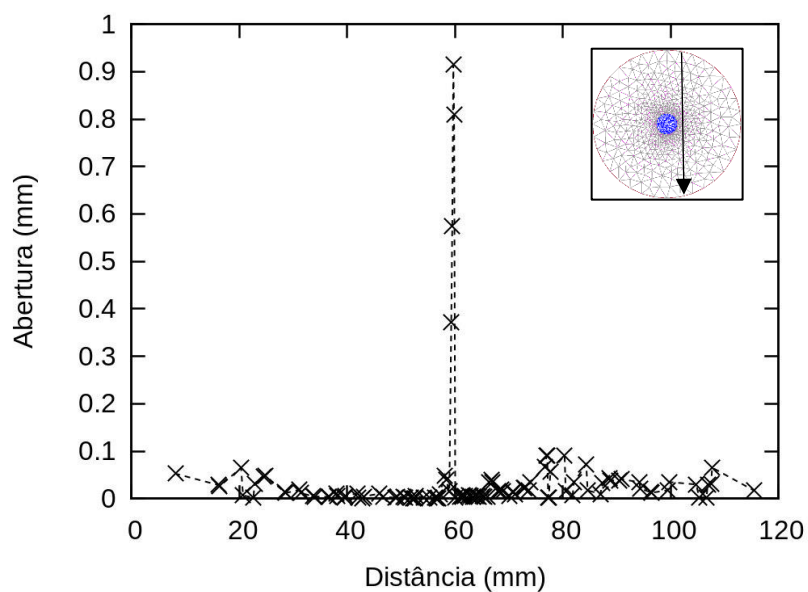


Esse comportamento de formação e propagação de fissuras a partir da inclusão em direção à borda também foi verificado para o ensaio da amostra No. 6T, porém, houve a formação de fissuras nas bordas, o que não foi detectado na simulação. Possivelmente esse efeito se deu ao atrito com a lateral da cápsula de vidro.

O comportamento da abertura ao longo de uma seção pode ser observado na Figura 84, onde se observa a concentração da abertura no centro da amostra, próximo

à inclusão. Esse mesmo comportamento foi observado também no ensaio da amostra No. 6T através do gráfico da Figura 39.

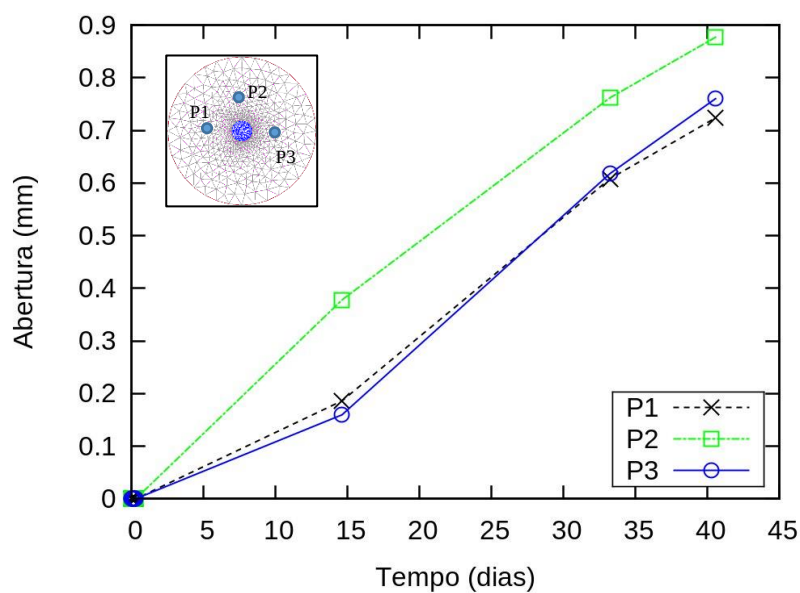
Figura 84 – Abertura de fissura (mm) x Distância (mm) para o Cenário 6T



Fonte: A Autora (2019).

A Figura 85 mostra o comportamento da abertura para os pontos P1, P2 e P3 em detalhe.

Figura 85 – Abertura de fissura (mm) x Tempo (dias) para o Cenário 6T



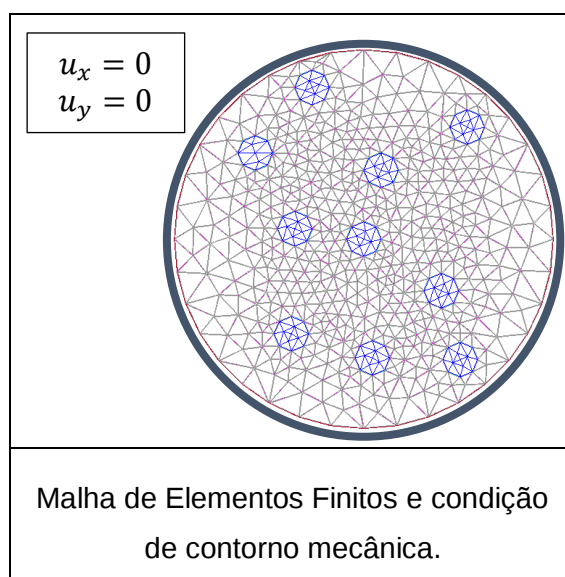
Fonte: A Autora (2019).

Observa-se que as aberturas crescem com o tempo, e que elas iniciam ao mesmo tempo, embora com uma taxa diferente de crescimento para as diferentes posições.

4.5 CENÁRIO 7T

O cenário 7T teve a mesma configuração geométrica do ensaio experimental 7T do Capítulo 2. A geometria e as condições de contorno estão descritas na Figura 86.

Figura 86 - Geometria e Condições de contorno do Cenário 7T



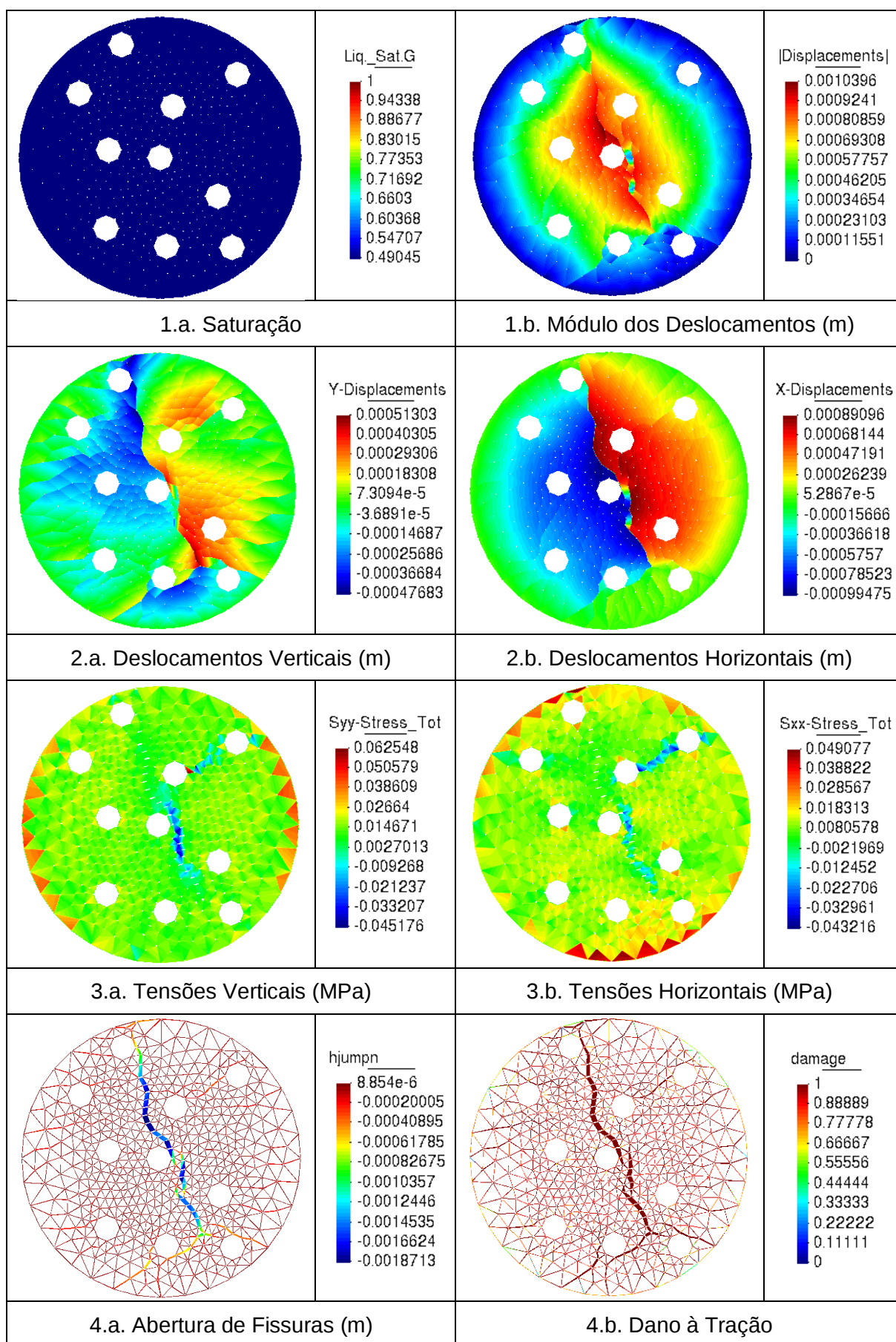
Fonte: A Autora (2019).

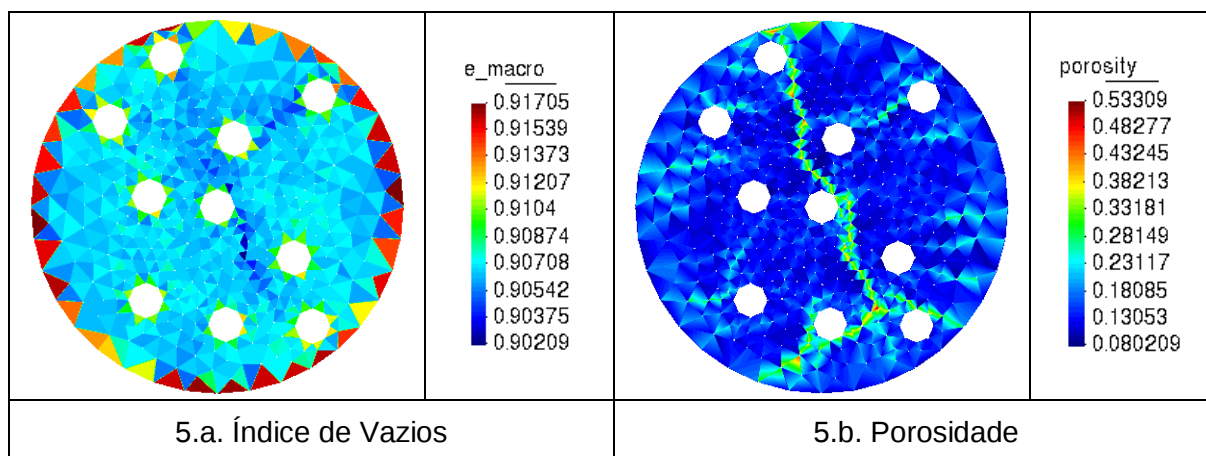
A malha foi constituída por 3639 nós e 7356 elementos, e a condição de fluxo foi prescrita no elemento 1D. Na Figura 87 estão ilustrados os resultados das tensões, dos deslocamentos, das porosidades, além dos resultados de abertura de fissuras, dano à tração e dos índices de vazios apresentados pela amostra 7T.

Nesse cenário se confirmou a influência das inclusões, com a formação de fissuras passando por inclusões ao centro e mais próximas à borda também.

Foi possível notar que, nesse cenário, as fissuras surgiram próximas às regiões onde havia uma quantidade maior de incusões próximas, onde claramente houve uma maior concentração de tensões, ilustrado na Figura 87.3.

Figura 87 – Resultados em gráficos para o Cenário 7T

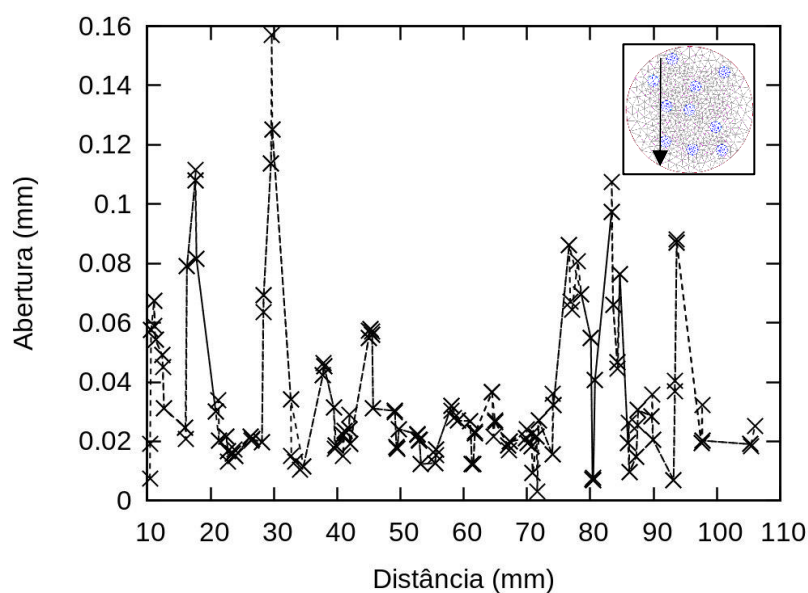




Fonte: A Autora (2019).

A abertura de fissuras ao longo de uma seção pode ser observada na Figura 88, onde se observa um comportamento semelhante ao observado para a seção do ensaio da amostra 7T.

Figura 88 – Abertura de fissura (mm) x Distância (mm) para o Cenário 7T

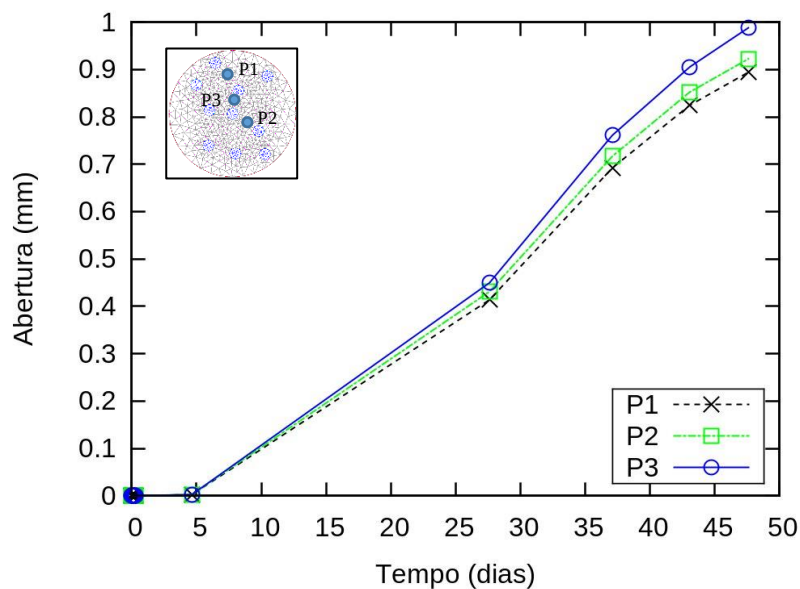


Fonte: A Autora (2019).

Nesse cenário, de maneira semelhante ao ensaio da amostra No. 7T, se observa que há uma tendência de concentração das fissuras entre as inclusões, e quase todas as fissuras se formaram a partir dessas estruturas, o que também foi observado no ensaio de laboratório.

Na Figura 89 se observa a evolução da abertura das fissuras para os pontos P1, P2 e P3, onde se observa uma iniciação de fissuras ao mesmo tempo, mas com taxas de crescimento diferentes, e P1, que se encontra mais próximo da borda, evoluiu com uma taxa inferior a P2 e P3, ficando com uma abertura final menor do que as aberturas mais ao centro indicadas.

Figura 89 – Abertura de fissura (mm) x Tempo (dias) para o Cenário 7T



Fonte: A Autora (2019).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo está apresentada a conclusão desse trabalho referente ao ensaio experimental realizada e à modelagem numérica.

5.1 ENSAIO EXPERIMENTAL DE RESSECAMENTO DE UMA ARGILA EXPANSIVA

Neste trabalho foi avaliado, inicialmente, a iniciação das fissuras através do ensaio de ressecamento da argila expansiva Romainville. O ensaio permitiu concluir que as restrições aplicadas ao deslocamento do solo, representadas pelas diferentes bases e pela presença de inclusões, variando sua geometria, quantidade e posição, influenciaram fortemente a formação e propagação de fissuras durante seu ressecamento.

Observou-se que o teflon permitiu que as amostras se contraíssem mais livremente do que a base de vidro, que apresentou uma maior aderência com o solo, o suficiente para introduzir deformações de tração ao longo da amostra, o que foi observado através da análise DIC.

Dessa maneira, concluiu-se que, com relação à restrição horizontal imposta pela base, quanto maior o atrito da base com o solo argiloso, maior o número de fissuras a serem formadas no centro da amostra. Isso ficou evidente quando se comparou as amostras de solo argiloso e se verificou que as amostras com base de vidro superaram consideravelmente o número de fissuras formadas nas amostras que possuíam a base de teflon, com um aumento de mais de 3.2 vezes, em média.

Outra influência na formação de fissuras foram as restrições verticais impostas pela presença de inclusões rígidas, que influenciaram a formação e propagação das fissuras. Nesse sentido, foi avaliada a influência do número de inclusões inseridas em uma amostra do solo argiloso, e foi detectado que com o aumento do número de inclusões, o número de fissuras aumentou.

Foi verificado, também, que o aumento no diâmetro das inclusões em 50% fez com que aumentasse o número de fissuras no interior da amostra, além disso as

fissuras apresentaram aberturas em média 2 vezes superiores às amostras com uma inclusão de diâmetro menor.

Em seguida, foi realizada uma análise quantitativa e qualitativa do ensaio através do programa Ncorr do MatLab com correlação de imagens digitais (“Digital Image Correlation - DIC”). A análise DIC foi capaz de reunir dados relevantes sobre o comportamento do efeito de secagem nesse tipo de solo, permitindo prever onde as fissuras tendem a se formar, mesmo quando não havia a presença de fissuras visíveis a olho nu.

Também foi observado, através das análises DIC, que a concentração de deformações na superfície da amostra foi mais evidente no centro da amostra quando haviam inclusões rígidas distribuídas no corpo das amostras. Além disso, se observou a presença de picos de deformações próximas às inclusões.

5.2 MODELAGEM NUMÉRICA DO RESSECAMENTO DE UMA ARGILA EXPANSIVA

A modelagem numérica permitiu observar o comportamento de um solo expansivo diferente do avaliado no laboratório, mas com as configurações geométricas de algumas amostras ensaiadas, para investigar o padrão de formação das fissuras.

Através da modelagem numérica, foi realizado o acoplamento entre o modelo elastoplástico Barcelona Basic Model (BBM) e o de Dano à tração, além da técnica de inserção de Elementos Finitos de Alta razão de Aspecto.

Foi observado na modelagem numérica que, de maneira qualitativa, o BBM representou bem o comportamento de redução de volume da amostra com o aumento da sucção, e o modelo de Dano, inserido nos elementos finitos não-convencionais, representou bem a abertura de fissuras mediante a presença de tensões de tração na amostra.

Nas simulações foi verificada uma compatibilidade entre a evolução de fissuras para a amostra homogênea, na qual as fissuras se concentraram na borda. Também para a simulação de cenários com a presença de inclusões rígidas, foi verificada uma

coerência entre as simulações e os experimentos de maneira qualitativa, pois apresentaram uma concentração de fissuras próximo às inclusões, o que também foi verificado nos ensaios de laboratório.

Por fim, esse trabalho tornou viável a investigação do comportamento hidromecânico de argilas expansivas mediante o acoplamento entre os modelos BBM e Dano com a técnica de Elementos Finitos de Alta Razão de Aspecto.

5.3 SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

Para pesquisas futuras sugere-se realizar ensaios laboratoriais para fornecer os parâmetros necessários para a modelagem numérica do solo utilizado no ensaio de ressecamento.

Sugere-se também avaliar a influência de inclusões para amostras com espessuras de solo variadas.

Além disso, para a modelagem numérica, sugere-se realizar a modelagem numérica em 3D, para verificar a compatibilidade entre o ensaio e a modelagem de maneira quantitativa, e realizar uma análise de sensibilidade da malha utilizada.

Por fim, sugere-se avaliar a profundidade das fissuras através da simulação em 3D.

REFERÊNCIAS

- AGGELIS, D. G. et al. Characterization of mechanical performance of concrete beams with external reinforcement by acoustic emission and digital image correlation. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1037–1045, 2013.
- AHMADI, M.; MOOSAVI, M.; JAFARI, M. K. Experimental investigation of reverse fault rupture propagation through wet granular soil. **Engineering Geology**, v. 239, n. December 2017, p. 229–240, 2018.
- ALONSO, E. E.; GENS, A.; JOSA, A. A constitutive model for partially saturated soils. **Geotechnique**, v. 40, n. 3, p. 405–430, 1990.
- AN, N. et al. Effects of soil characteristics on moisture evaporation. **Engineering Geology**, v. 239, Jan., p. 126–135, 2018.
- ANTUNES, I. S. et al. Caracterização do solo e propriedades de fluxo da camada de cobertura de aterro sanitário de campina. *In*: CONGRESSO..., n., 2016, local. **Anais [...]**. local: editor, 2016. (INFORMAÇÕES DO CONGRESSO)
- AUBERTIN, M.; SIMON, R. A DAMAGE INITIATION CRITERION FOR LOW POROSITY ROCKS. **Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.**, v. 34, n. 017, p. 3–4, 1997.
- BEAR, J. **Dinamics of fluids in porous média**. [s.l: s.n.].
- BELFORT, N. T. et al. **Análise numérica da sensibilidade do algoritmo implex aplicado em um cenário hipotético de estabilidade de talude via técnica de descontinuidades fortes**. Numerical. 2018
- BESERRA, L. B. DE S. **Implementação de algoritmos de integração implícita para modelos constitutivos elasto-**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- BESERRA, L. B. DE S. **Análise Hidromecânica do Fraturamento Hidráulico via Elementos Finitos com Descontinuidades Fortes Incorporadas**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2015.
- BLABER, J.; ADAIR, B.; ANTONIOU, A. Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. **Experimental Mechanics**, v. 55, n. 6, p. 1105–1122, 2015.
- BUI, H. H. et al. Soil cracking modelling using the mesh-free SPH method. *In*: AUSTRALIA NEW ZEALAND CONFERENCE ON GEOMECHANICS, 12., local. **Proceedings [...]**. local: ANZ, 2015. p. 1–8.
- CAPOROSSO, P.; MAZZANTI, P.; BOZZANO, F. Digital Image Correlation (DIC) Analysis of the 3 December 2013 Montescaglioso Landslide (Basilicata, Southern Italy): Results from a Multi-Dataset Investigation. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 9, p. 372, 2018.
- CHEN, S. et al. Comparative study on three - dimensional statistical damage

constitutive modified model of rock based on power function and Weibull distribution. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 3, p. 1–8, 2018.

CLETO, P. R. et al. Simulação Numérica De Fraturamento Hidráulico Em Elementos Finitos Com Acoplamento Hidromecânico Utilizando a Técnica De Fragmentação De Malha. **Anais do IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, n. December 2017, 2017.

CUI, Y.-J. et al. Water Retention Properties and Volume Change Behaviour of Natural Romainville Clay. v. C, n. February, p. 873–882, 2006.

CUI, Y. et al. Investigation of the hydro-mechanical behaviour of compacted expansive clay. **Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China**, v. 4, n. 2, p. 154–164, 2010.

CUI, Y. J. et al. Experimental and numerical investigation of soil-atmosphere interaction. **Engineering Geology**, v. 165, p. 20–28, 2013.

DONG, S.; GUO, Y.; XIONG, Y. Method for Quick Prediction of Hydraulic Conductivity and Soil-Water Retention of Unsaturated Soils. **J. Transport. Res. Board**, 2018.

DUC, M.; MALOULA, A.; MAKKI, L. **EFFET DU SECHAGE SUR LA DEFORMATION DE L ' ARGILE VERTE DE**. [s.l: s.n.].

ĐUREJE, J.; PROŠEK, Z. Foamed Cement Composites: Detection of the Modulus of Elasticity Using Dic Analysis and Comparison With Other Methods. **Acta Polytechnica CTU Proceedings**, v. 13, n. M, p. 35, 2017.

FLEUREAU, J. et al. Experimental Study of the Cracking Mechanisms of Clay during Drying. n. January 2016, p. 2101–2108, 2015.

FUTAI, M. M. **Análise de ensaios edométricos com sucção controlada em solos colapsíveis**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, COOPE, 1997.

GAI, X.; SÁNCHEZ, M. An elastoplastic mechanical constitutive model for microbially mediated cemented soils. v. 0123456789, 2018.

GARAKANI, A. A. . et al. Effect of road salts on the hydro-mechanical behavior of unsaturated collapsible soils. **Transp. Geotech.**, v. 17, p. 77– 90., 2018.

HARILAL, R.; VYASARAYANI, C. P.; RAMJI, M. A linear least squares approach for evaluation of crack tip stress field parameters using DIC. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 75, p. 95–102, 2015.

HARILAL R; RAMJI M. Adaptation of Open Source 2D DIC Software Ncorr for Solid Mechanics Applications. **9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics**, p. 1–6, 2014.

HIROBE, S.; OGUNI, K. Modeling and numerical investigations for hierarchical pattern formation in desiccation cracking. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 359, p. 29–38, 2017.

HOLMQUIST, T. J.; WERESZCZAK, A. A. The Internal Tensile Strength of a Borosilicate Glass Determined from Laser Shock Experiments and Computational Analysis. **International Journal of Applied Glass Science**, v. 5, n. 4, 2014.

HUANG, S. et al. Frost heaving and frost cracking of elliptical cavities (fractures) in low-permeability rock. **Engineering Geology**, v. 234, n. August 2017, p. 1–10, 2018.

JUCÁ, J. F. T. **COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS BAJO SUCCION CONTROLADA**. [s.l.] UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID, 1990.

KIM, J.; HWANG, W.; KIM, Y. Effects of hysteresis on hydro-mechanical behavior of unsaturated soil. **Engineering Geology**, v. 245, p. 1–9, 2018.

KONRAD, J. M.; AYAD, R. Desiccation of a sensitive clay: Field experimental observations. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 34, n. 6, p. 929–942, 1997.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. . **Mechanics of Solid Materials**. [s.l.] Published by Cambridge University Press, 1994.

LEVATTI, H. U.; PRAT, P. C.; LEDESMA, A. Numerical and experimental study of initiation and propagation of desiccation cracks in clayey soils. **Computers and Geotechnics**, v. 105, n. October 2018, p. 155–167, 2019.

LI, J. H. et al. Experimental study on soil-water characteristic curve for silty clay with desiccation cracks. **Engineering Geology**, v. 218, p. 70–76, 2017.

LI, J. H.; ZHANG, L. M. Study of desiccation crack initiation and development at ground surface. **Engineering Geology**, v. 123, n. 4, p. 347–358, 2011.

MACIEL, B. M. C. M. **SIMULAÇÃO DE FRATURAMENTO HIDRÁULICO COM ELEMENTOS FINITOS DE ELEVADA RAZÃO DE ASPECTO USANDO TÉCNICA DE FRAGMENTAÇÃO DE MALHA**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

MAEDO, M. A. **Simulação computacional por elementos finitos de múltiplas fissuras em sólidos usando técnica de fragmentação da malha**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2015.

MAEDO, M. A. et al. Modelling the 3D Crack Network Observed in Desiccated Soils. n. December, p. 342–351, 2018.

MANTHO, A. T. **Exchanges between soil and atmosphere application in the case of draught**. [s.l.] Ecole des Ponts ParisTech, 2005.

MANZOLI, O. et al. Modeling of multiple cracks in reinforced concrete members using solid finite elements with high aspect ratio. **Computational Modelling of Concrete Structures**, n. March 2014, p. 383–392, 2014.

MANZOLI, O. et al. **An orthotropic interface damage model for simulating drying processes in soils**. [s.l: s.n.]. v. 13

MARTINEZ, I. **Mecanismo de dano para modelagem de corte em rocha por erosão**. [s.l.] Puc-Rio, 2012.

MCCORMICK, N.; LORD, J. Strain and displacement are critical parameters within engineering and. **Materials Today**, v. 13, n. 12, p. 52–54, 2010.

MORENO, M. G. M. **Modelagem Numérica com acoplamento Hidro-Mecânico da reconstrução, enchimento e comportamento da Barragem de Açú/RN após o acidente no final de construção**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2011.

NAVARRO, V. et al. Modelling of compacted bentonite swelling accounting for salinity effects. **Engineering Geology**, v. 223, n. April, p. 48–58, 2017.

NÓBREGA, L. DE O. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2008.

OHMAKI, S. **Stress-strain behaviour of aniso- tropically, normally consolidated cohesive soil**. 1st Int. Symp. Num. Mod. Geomech. **Anais...Zurich**: 1982

OLIVELLA, S. et al. Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. **Engineering Computations (Swansea, Wales)**, v. 13, n. 7, p. 87–112, 1996.

OLIVER, J.; HUESPE, A. E.; CANTE, J. C. An implicit / explicit integration scheme to increase computability of non- linear material and contact / friction problems. n. April, 2008.

RUTQVIST, J.; IJIRI, Y.; YAMAMOTO, H. Implementation of the Barcelona Basic Model into TOUGH – FLAC for simulations of the geomechanical behavior of unsaturated soils. **Computers and Geosciences**, v. 37, n. 6, p. 751–762, 2011.

SANCHEZ, M. et al. Exploring desiccation cracks in soils using a 2D profile laser device. **Acta Geotechnica**, v. 8, n. 6, p. 583–596, 2013.

SÁNCHEZ, M.; MANZOLI, O. L.; GUIMARÃES, L. J. N. Modeling 3-D desiccation soil crack networks using a mesh fragmentation technique. **Computers and Geotechnics**, v. 62, n. July, p. 27–39, 2014a.

SÁNCHEZ, M.; MANZOLI, O. L.; GUIMARÃES, L. J. N. Modeling 3-D desiccation soil crack networks using a mesh fragmentation technique. **Computers and Geotechnics**, v. 62, p. 27–39, 2014b.

SANCHO, J. M. et al. An embedded crack model for finite element analysis of concrete fracture. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 74, n. 1–2, p. 75–86, 2007.

SEIXAS, M. G. **MODELAGEM HIDRO- MECÂNICA DO FRATURAMENTO HIDRÁULICO DE ROCHAS VIA ELEMENTOS FINITOS COM ELEMENTOS ESPECIAIS DE INTERFACE**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

SILVA, I. M. P. DA. **Estudo do comportamento e processo de formação de fissuras em um solo devido ao ressecamento**. [s.l.] UNIVERSIDADE FERDERAL

DE PERNAMBUCO, 2018.

SILVA, N. V. S. DA. Modelagem da compactação capilar e química em reservatórios de petróleo. 2012.

SONG, W. K.; CUI, Y. J.; YE, W. M. Modelling of water evaporation from bare sand. **Engineering Geology**, v. 233, n. September 2017, p. 281–289, 2018.

SOWERS, G. F. **Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering**. 4th. ed. London: Collier Macmillan, 1979.

TANG, C. S. et al. Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. **Engineering Geology**, v. 114, n. 3–4, p. 261–266, 2010.

TANG, C. S. et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. **Applied Clay Science**, v. 52, n. 1–2, p. 69–77, 2011a.

TANG, C. S. et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 111–118, 2011b.

TANG, C. S. et al. Effect of wetting-drying cycles on profile mechanical behavior of soils with different initial conditions. **Catena**, v. 139, p. 105–116, 2016.

TANG, G. P. et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under random rainfall patterns. **Eng. Geol.**, v. 245, p. 322–332., 2018.

TENG, J. et al. Modelling water content redistribution during evaporation from sandy soil in the presence of water table. **Computers and Geotechnics**, v. 75, p. 210–224, 2016.

VAN GENUTCHEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. **Soil Science Journal American Society**, v. 44, p. 892–898, 1980.

VANDANGEON, P. Exemple de sinistres en région parisienne. **Revue Française de Géotechnique**, v. 58, p. 7–14, 1992.

VO, T. D. et al. Numerical modelling of desiccation cracking of clayey soil using a cohesive fracture method. **Computers and Geotechnics**, v. 85, p. 15–27, 2017.

VO, T. D. et al. Numerical modelling of desiccation cracking of clayey soil by using cohesive fracture method. **Lecture Notes in Civil Engineering**, v. 8, p. 756–764, 2018.

WANG, L. L. et al. Nucleation and propagation mechanisms of soil desiccation cracks. **Engineering Geology**, v. 238, n. March, p. 27–35, 2018a.

WANG, L. L. et al. Nucleation and propagation mechanisms of soil desiccation cracks. **Engineering Geology**, v. 238, n. October 2017, p. 27–35, 2018b.

YAN, C. et al. Mechanical experiments and constitutive model of natural gas hydrate

reservoirs. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 31, p. 19810–19818, 2017.

ZHAO, P.; ZSAKI, A. M.; NOKKEN, M. R. Using digital image correlation to evaluate plastic shrinkage cracking in cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 108–117, 2018.

ZHOU, S. et al. Statistical damage constitutive model for rocks subjected to cyclic stress and cyclic temperature. **Acta Geophysica**, 2017.