

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE FISSURAS NA  
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM APLICAÇÕES DE  
CAMADA FINA POR MEIO DE ANÁLISE DE IMAGENS.**

**TOMÁS JOVIANO LEITE DA SILVA**

**ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: T.DM – 287/17**

**BRASÍLIA, DF, 30 DE MAIO DE 2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE FISSURAS NA  
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM APLICAÇÕES DE  
CAMADA FINA POR MEIO DE ANÁLISE DE IMAGENS.**

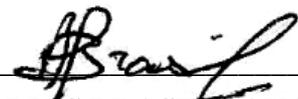
**TOMÁS JOVIANO LEITE DA SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDO AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
GEOTECNIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM GEOTECNIA.**

**APROVADA POR:**



**LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc.  
(ORIENTADOR)**



**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc.  
(EXAMINDADOR INTERNO)**



**ANTÔNIO THOMÉ, DSc.  
(EXAMINDADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA / DF: MAIO DE 2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, TOMÁS JOVIANO LEITE

**Avaliação do Impacto de Fissuras na Condutividade Hidráulica em Aplicações de Camada Fina por Meio de Análise de Imagens.** [Distrito Federal] 2017.

XV, - 154 p. (ENC/FT/UnB, Mestrado, Pós-Graduação em Geotecnia, 2017)

Dissertação de Mestrado – Programa de pós-graduação em Geotecnia, UnB.

- |                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| 1. Ressecamento e Fissuração | 2. Análise de Imagens   |
| 3. Condutividade Hidráulica  | 4. Camadas de Cobertura |
| I. PPG/UnB                   | II. Título (série)      |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, T.J.L. (2017). **Avaliação do Impacto de Fissuras na Condutividade Hidráulica em Aplicações de Camada de Espessura Fina por Meio de Análise de Imagens.** Dissertação de Mestrado, Publicação, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 154 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: TOMÁS JOVIANO LEITE DA SILVA

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Avaliação Do Impacto De Fissuras Na Condutividade Hidráulica Em Aplicações De Camada Fina Por Meio De Análise De Imagens.**

GRAU/ANO: Mestrado em Geotecnia / 30 de Maio de 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de Mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Tomás Joviano Leite da Silva

SQN 216 Bloco K Ap. 310

Brasília – Distrito Federal – Brasil

e-mail: [jovianotomas@gmail.com](mailto:jovianotomas@gmail.com)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, ao meu orientador, professor Luís Fernando pela sua presença e orientação em todas as etapas e no seu apoio nos meus acertos e sua correção nos meus erros ao longo do mestrado. Agradeço ao meu pai, Geraldo, minha mãe, Juvenília e meu irmão Bernardo por sempre estarem comigo, ajudando de todas as formas possíveis e às vezes, impossíveis. Às minhas orientadoras de projeto final, professoras Cláudia e Conceição que me ensinaram muito do que usei ao longo do mestrado. Aos meus tios e tias que tanto fizeram por mim durante as muitas partes da dissertação.

Tem minha gratidão todos meus colegas, técnicos e professores que estiveram presentes e me ajudaram, ensinaram e orientaram. Por fim, agradeço às instituições envolvidas, a Universidade de Brasília, o programa de pós-graduação em geotecnia e ao CNPq.

# **AValiação DO IMPACTO DE FISSURAS NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM APLICAÇÕES DE CAMADA FINA POR MEIO DE ANÁLISE DE IMAGENS.**

## **RESUMO**

Todos materiais sujeitos a esforços mecânicos são passivos de fissuração e ruptura, e a avaliação da mudança de parâmetros como resistência mecânica e condutividade hidráulica após essa condição é de interesse à engenharia como um todo. Materiais porosos que permitem a passagem de água através de sua estrutura sofrem mudanças sensíveis no fluxo de fluidos através dos mesmos quando fissurados. Camadas finas apresentam espessuras tal que as fissuras possam atravessar inteiramente o meio em suas iterações mais severas, modificando o próprio regime do fluxo por meio da intensa alteração do meio. Em diversas obras da geotecnia, essas fissuras manifestam-se nas superfícies, sejam elas geossintéticos, pavimentos, faces de barragem ou especificamente camadas de cobertura de aterros. A manifestação dessas fissuras nas suas respectivas superfícies permite a avaliação de situações que refletem comportamentos internos que não são facilmente acessíveis. As diferentes técnicas de análise de imagem permitem a extração de dados complexos das fissuras, da distribuição das aberturas, área fissurada e comprimento das mesmas. Estes dados de difícil extração sem uso da computação permitem avaliar várias propriedades de interesse ao correlacionar esses parâmetros geométricos com as propriedades do meio fissurado. A partir de algumas correlações de abertura das fissuras e geometria tridimensional pode-se entender o modo de ruptura do material e também simular o comportamento das trincas em níveis profundos. Com os dados da geometria superficial correlacionados aos valores de profundidade ao longo do meio pode-se determinar o meio fissurado pelo qual um fluido deve percolar. Definindo-se as condições de contorno, avalia-se como ocorrerá a infiltração por um modelo análogo ao de um tanque, no qual a lâmina de água altera-se proporcionalmente ao valor do volume percolado. Para avaliar e calibrar os métodos da etapa computacional foi produzida uma camada de mistura de solo e bentonita compactada em uma caixa que permitissem a fissuração do solo. O material foi selecionado como resultado de ensaios de fissuração em pequena escala e avaliações de parâmetros relevantes para que manifestasse propriedades avaliadas na dissertação, em especial a fissuração após ciclos de ressecamento. O solo foi submetido a uma saturação na condição de fissuração estável e foi avaliada a infiltração da água através do mesmo. Com os dados das fissuras superficiais nesse estado e os dados experimentais da infiltração, foram feitas comparações entre os modelos de calibração e os resultados experimentais. Com os valores experimentais verificou-se que o modelo de tanque em meio fissurado previu bem os resultados, quando as condições de contorno eram definidas com rigor e que as fissuras aumentaram a vazão 42 vezes em relação ao resultado para o meio intacto.

**Palavras-chave:** Fissuração, ressecamento, análise de imagem, condutividade hidráulica, camada finas.

# EVALUATION OF CRACKING IN THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF THIN LAYERS WITH IMAGE ANALYSIS.

## ABSTRACT

All materials under mechanical loads are subject to cracking and failure; as such, the evaluation of the relevant parameter changes under such conditions is of great interest to engineering field as a whole. Porous materials that allow the passage of fluids through them suffer sensible change in flow conditions when cracked. Thin layers have a thickness that allows severe cracks to penetrate it fully, changing the flow regime in the medium as a result of intense geometric changes in the layer. The cracks manifest themselves in several geotechnical applications, from geosynthetics, pavement, dams and specifically in liners. The surface cracks in those respective techniques allows the collection of relevant data that reflects internal behaviour of the medium that is not easily obtainable. The different image analysis techniques allow the extraction of complex data of the cracks themselves, such as the distribution of openings, the percentage of cracked area and even the length of the cracks. This data is of difficult extraction without the use of computation and it creates the possibility of determining interesting properties by correlating geotechnical parameters to the cracked medium. With correlations of crack opening and three-dimensional geometry, it is possible to both understand the cracking condition of the application and simulate the geometry of the fissures in depth. The flow of water through the fractured medium is then simulated as an interaction between the geometry of the cracked layer and boundary conditions of water head, in analogue manner to a closed tank where the water level reduction is proportional to the volume flown. A layer composed of a mixture of natural tropical soil with added bentonite was compacted into a larger scale to calibrate and evaluate the results of the simulation. The material was selected after several experimental evaluations done prior to the larger scale infiltration, where different conditions were created to optimize the desired properties, mostly cracking after desiccation. After three cycles of desiccation, the cracks were in a stable state, and the soil was submitted to a saturation. In this state, the volume infiltrated was measured and later compared with the simulation results. In a latter step, the models were evaluated in relation to their reliability and sensibility towards change in fed parameters. The evaluation of flow in a saturated cracked medium by a water tank model produced very close results when the boundary conditions are defined rigorously and that the presence of cracks increased the water flow by a factor of 42 in relation to the intact surface.

**Keywords:** Cracking, desiccation, image analysis, hydraulic conductivity, thin layers.

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
SUMÁRIO.....	vii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 CONTEXTO GERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 ESCOPO DO TRABALHO.....</b>	<b>3</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 CAMADAS FINAS.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 APLICAÇÕES SUJEITAS À FISSURAÇÃO.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2.1 ARGILAS EXPANSIVAS .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.2 PAVIMENTAÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2.3 CAMADA DE COBERTURA DE ATERROS.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3 FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.4 INFLUÊNCIA DA FISSURAÇÃO NA INFILTRAÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2.5 CAPTURA E ANÁLISE DE IMAGENS .....</b>	<b>15</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 SELEÇÃO DO MATERIAL.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 FISSURAÇÃO EM PEQUENA ESCALA.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3 COMPACTAÇÃO, GRANULOMETRIA E PERMEABILIDADE.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.1 COMPACTAÇÃO .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.2 GRANULOMETRIA .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E BENTONITA .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3.4 ENSAIO DE PERMEABILIDADE A CARGA VARIÁVEL.....</b>	<b>31</b>
<b>3.4 FISSURAÇÃO E INFILTRAÇÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>3.5 MODELAGEM DA FISSURAS .....</b>	<b>41</b>
<b>3.6 ANÁLISE DAS IMAGENS .....</b>	<b>46</b>
<b>3.6.1 TRANSFORMAÇÃO PARA ESCALA DE CINZA.....</b>	<b>47</b>
<b>3.6.2 TRANSFORMAÇÃO BINÁRIA .....</b>	<b>49</b>
<b>3.6.3 DETERMINAÇÃO DA DILATAÇÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>3.6.4 ESQUELETIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....</b>	<b>54</b>
<b>3.6.5 TRANSFORMADA DE DISTÂNCIA E SUPERPOSIÇÃO COM         ESQUELETO .....</b>	<b>55</b>

3.6.6	CALIBRAÇÃO.....	56
3.6.7	SIMULAÇÃO DE INFILTRAÇÃO .....	57
4	RESULTADOS.....	59
4.1	FISSURAÇÃO EM PEQUENA ESCALA.....	59
4.1.1	SOLO NATURAL, VARIANDO SUA PROFUNDIDADE.....	60
4.1.2	SOLO NATURAL, VARIANDO O CONTEÚDO DE BENTONITA ADICIONADA .....	68
4.1.3	AREIA ADICIONADA DE DIFERENTES PERCENTUAIS DE BENTONITA.....	75
4.1.4	MISTURA DE SOLO E BENTONITA UMEDECIDO COM SOLUÇÃO SALINA.....	82
4.1.5	MISTURA DE AREIA E BENTONITA UMEDECIDA COM SOLUÇÃO SALINA.....	89
4.1.6	MISTURA COM SOLO NATURAL E BENTONITA E VARIANDO A ENERGIA DE COMPACTAÇÃO .....	96
4.2	COMPACTAÇÃO, GRANULOMETRIA E PERMEABILIDADE.....	103
4.2.1	GRANULOMETRIA .....	103
4.2.2	COMPACTAÇÃO.....	106
4.2.3	PERMEABILIDADE.....	108
4.3	FISSURAÇÃO E INFILTRAÇÃO.....	109
4.4	MODELAGEM DAS FISSURAS .....	115
4.4.1	CALIBRAÇÃO POR MOLDAGEM .....	117
5	ANÁLISES.....	120
5.1	RELAÇÃO DE CHERTKOV .....	122
5.2	CALIBRADO EMPIRICAMENTE .....	124
5.3	AVALIANDO SOMENTE COM CIF.....	126
5.4	AVALIADO COM ABERTURA MÉDIA .....	129
5.5	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS .....	131
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	133
6.1	CONCLUSÃO .....	133
6.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	135
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	137
	SITES CONSULTADOS .....	141
	CRONOGRAMA .....	142
	ANEXOS .....	143

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 3.1 – Representação dos parâmetros avaliados e a identificação das amostras individuais.....	19
Tabela 3.1 – Valores da intensidade do infravermelho e energia total.....	28
Tabela 3.2 – identificação das misturas.....	33

# LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 – Representação de duas camadas, sendo que a), com fissuras de 4 cm de profundidade classifica-se como fina, enquanto b) com fissuras de 40 cm não se classifica. ...	4
Figura 2.2 – Fissuras por ressecamento em resíduos de bauxita.....	6
Figura 2.3 – Modelo de fissuração de argilas descrito por Li et al (2012).....	7
Figura 2.4 – Representação do bombeamento de finos (Palmeira,2008).....	8
Figura 2.5 – Representação de um aterro sanitário ideal. ....	9
Figura 2.6 – Figuras com diferentes valores de CIF equivalente, sendo a) com 50%, b) 25% e c) 18% .....	11
Figura 2.7 – Diferentes profundidades de fissuras irão alterar de forma diferente a percolação da água através do meio. ....	13
Figura 2.8 – Diferentes profundidades em relação à abertura, Chertkov (1998). ....	13
Figura 2.9 – Alcance de micro fissuras, Chertkov (1998). ....	14
Figura 2.10 - Representação da função $f(x, y) = Cor\ no\ ponto\ (x, y)$ em cores, para: (a) espaço de cor contínuo e (b) espaço de cor discreto de <i>pixels</i> . ....	16
Figura 2.11 – Representação lógica da transformação de uma imagem teórica contínua em uma figura estruturada em matriz de cores sendo (a) a imagem teórica, (b) o grid de referência, (c) a quantização e (d) a matriz de pixels .....	17
Figura 2.12 – Diferentes espaços de cor dentro do espectro total de luz visível .....	18
Figura 2.13 – Representação de um espaço de cor sRGB em uma matriz tridimensional.....	19
Figura 2.14 – Representação de uma imagem genérica em sRGB por meio de um vetor de matrizes. ....	20
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia completa.....	21
Figura 3.2 – Ponto de coleta do solo natural. ....	22
Figura 3.3 – Representação simplificada dos ciclos de menor escala, onde (a) representa a homogeneização, (b) compactação, (c) molhagem e (d) saturação.....	23
Figura 3.4 – Aparato-piloto de ressecamento de solos.....	24
Figura 3.5 – Interface ou GUI do programa de análise de imagens.....	26
Figura 3.6 – Material em estado natural antes do destorroamento.....	26
Figura 3.7 - Solo puro, destorroado à direita e bentonita à esquerda. ....	27

Figura 3.8 – Representação de todos os dados característicos do solo, sendo LL limite de liquidez, LP limite de plasticidade, $\rho$ peso aparente, $\rho_s$ peso aparente seco, $G_s$ massa específica dos grãos, e MCT a sua classificação em acordo com a metodologia MCT.....	29
Figura 3.9 – Dimensões da caixa, (a) em planta e (b) em perspectiva.....	32
Figura 3.10 – Caixa, em (a) com o esqueleto de alumínio e borrachas e (b) com os perfis de aço, tampa e impermeabilizante asfáltico preta. ....	33
Figura 3.11 – Representação da caixa com o material a ser fissurado.....	33
Figura 3.12 – Fotografia do soquete em (a) e em (b) os dados de altura de queda e massa do soquete e camisa.....	34
Figura 3.13 – Execução da compactação do material na caixa em (a) e a superfície compactada em (b). ....	35
Figura 3.14 – Ressecamento do solo sob ação das lâmpadas, onde (a) é o diagrama em perspectiva, (b) o mesmo em vista lateral e (c) uma amostra após um ciclo de saturação exposto às lâmpadas. ....	36
Figura 3.15 – Queda da intensidade ao longo da superfície esférica.....	36
Figura 3.16 – Distâncias planas entre cada lâmpada e os cantos da caixa.....	37
Figura 3.17 – Representação da placa perfurada em (a) e o processo de molhagem por gotejamento da água sobre a camada compactada em (b). ....	38
Figura 3.18 – Mistura fissurada após a saturação, com o efeito da suspensão das partículas de bentonita.....	39
Figura 3.19 – Continuidade do volume de água no sistema.....	40
Figura 3.20 – Em (a) as posições na qual os fios de aço foram usados e (b) como as medidas das profundidades foram tomadas.....	41
Figura 3.21 – Todos os corpos de prova para as diferentes misturas, sendo em (a) o grupo de materiais hidratados com água em (b) grupo de resinas, (c) grupo de técnica mista, (d) traços diferentes e aditivo e (e) adição de argila sintética. ....	44
Figura 3.22 – Detalhe do molde produzido com nata de graute e aditivo de pega super rápida. ....	45
Figura 3.23 – Representação total da etapa computacional. ....	46
Figura 3.24 – Representação da escala de cinza com diferentes números de canais 1 ,2, 3, 4, 5, e 8 bits.....	47
Figura 3.25 – Representação de como um limite separa logicamente um sinal em duas categorias discretas. Adaptado de Scientific Volume Imaging (2016). ....	49

Figura 3.26 – Representação de diferentes valores de <i>threshold</i> aplicados a uma mesma imagem (a) sendo que (b) a (d) representam, em ordem crescente, a aplicação de um <i>threshold</i> à imagem (a), representado no histograma como uma linha vermelha.....	49
Figura 3.27 – Representação do processo lógico de determinação da dilatação.....	53
Figura 3.28 – Posição do esqueleto dentro ao longo dos centróides.....	54
Figura 3.29 – Representação dos valores de um esqueleto e de vizinhança.....	55
Figura 3.30 – Diferentes métricas transformadas de distância.....	55
Figura 3.31 – Imagens geradas para avaliar a precisão dos parâmetros sendo a), uma única abertura e 4% da área, b) diferentes valores de abertura, ocupando 28% da área com cruces de e c) 21% coberto com uma forma genérica de mesma abertura.....	56
Figura 3.32 – Distribuição das aberturas a), uma única abertura e 4% da área, b) diferentes valores de abertura, ocupando 28% da área com cruces de e c) 21% coberto com uma forma genérica de mesma abertura.....	57
Figura 3.33 – Fluxograma da etapa de simulação de infiltração.....	58
Figura 3.34 – Etapas das simulação da infiltração.....	58
Figura 4.1– Uso do aparato-piloto, sendo o ressecamento da amostra em (a) molhagem da camada compactada com uma placa gotejadora em (b) e em (c), o soquete simplificado e o molde usado para a compactação nessa escala.....	59
Figura 4.2– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, variando a profundidade do solo extraído em campo, , onde C1 representa o primeiro ciclo, C2 o segundo e C3 o terceiro.....	60
Figura 4.3– Distribuição das aberturas, variando a profundidade do solo puro, obtidas pelo método do operador, sendo (a) as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro ciclo.....	61
Figura 4.4 – Distribuição das aberturas, variando a profundidade do solo puro, obtidas por Otsu, (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro ciclo.....	62
Figura 4.5– Distribuição das aberturas, em vários ciclos, pelo método do Operador, sendo (a) o solo extraído de 2m de profundidade, (b) de 3m, (c) de 4m e (d) de 5m.....	63
Figura 4.6– Distribuição das aberturas, em vários ciclos, pelo método de Otsu (a) o solo extraído de 2m de profundidade, (b) de 3m, (c) de 4m e (d) de 5m.....	64
Figura 4.7– CIF em relação aos ciclos sendo (a) calculados a partir dos resultados do método do operador e em (b) automaticamente pelo método de Otsu.....	65

Figura 4.8– Abertura média em relação aos ciclos, pelos métodos: (a) do Operador e (b) Otsu .....	66
Figura 4.9 – Desvio padrão das aberturas em relação aos ciclos, pelos métodos: (a) do Operador e (b) Otsu.....	66
Figura 4.10– Relações entre propriedades das aberturas e CIF sendo (a) a relação o desvio padrão da abertura e o CIF e (b) a relação entre a abertura média e o CIF.....	67
Figura 4.11– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, variando o percentual de bentonita adicionado ao solo, onde C1 representa o primeiro ciclo, C2 o segundo e C3 o terceiro. ....	68
Figura 4.12– Distribuição das aberturas, variando o percentual de bentonita pelo método do operador, onde (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro ciclo do ressecamento. ....	69
Figura 4.13– Distribuição das aberturas, variando o percentual de bentonita, por Otsu, onde (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro ciclo do ressecamento. ....	70
Figura 4.14– Distribuição das aberturas, para uma mistura de solo e bentonita, em vários ciclos, pelo método do Operador sendo que (a) representa os resultados da amostra com 0% de bentonita para todos os ciclos, (b) da amostra com 10% de bentonita e (c) amostra com 20% de bentonita e (d) a amostra com 30% de bentonita. ....	71
Figura 4.15– Distribuição das aberturas, para uma mistura de solo e bentonita, em vários ciclos, pelo método de Otsu sendo que (a) representa os resultados da amostra com 0% de bentonita para todos os ciclos, (b) da amostra com 10% de bentonita e (c) amostra com 20% de bentonita e (d) a amostra com 30% de bentonita. ....	72
Figura 4.16– CIF em relação aos ciclos, para a mistura de solo com bentonita, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b).....	73
Figura 4.17– Abertura em relação aos ciclos, para a mistura de solo com bentonita, pelos métodos (a) do Operador e (b) Otsu.....	74
Figura 4.18– Abertura em relação aos ciclos, para a mistura de solo com bentonita, pelos métodos do Operador e Otsu.....	74
Figura 4.19– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, variando o percentual de bentonita adicionado à areia padrão, onde C1 representa o primeiro ciclo, C2 o segundo, C3 o terceiro e C4 o quarto. ....	75
Figura 4.20 – Distribuição das aberturas, variando o percentual de bentonita adicionada à areia, pelo método do operador, onde (a) após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem,	

(b) após o segundo e (c) após o terceiro e (d) após o quarto ressecamento, para as diferentes amostras.....	76
Figura 4.21– Distribuição das aberturas, variando o percentual de bentonita adicionada à areia, pelo método de Otsu onde (a) após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro e (d) após o quarto ressecamento.....	77
Figura 4.22– Distribuição das aberturas para areia com bentonita, pelo método do Operador sendo que (a) representa a areia adicionada de 0% de bentonita, (b) adição de 10% de bentonita, (c) de 20% de bentonita e (d) de 30% de bentonita.....	78
Figura 4.23– Distribuição das aberturas para areia com bentonita, pelo método de Otsu sendo que (a) representa o solo adicionado de 0% de bentonita, (b) adição de 10% de bentonita, (c) de 20% de bentonita e (d) de 30% de bentonita.....	79
Figura 4.24– CIF em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b)...	80
Figura 4.25– Abertura média em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b). .....	80
Figura 4.26– Desvio padrão das aberturas em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b).....	81
Figura 4.27– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, variando o íon adicionado à mistura com 10% de bentonita.....	82
Figura 4.28– Distribuição das aberturas, variando o íon adicionado à mistura com 10% de bentonita, pelo método do operador sendo (a) após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo ciclo e (c) após o terceiro ciclo e (d) após o quarto ciclo do ressecamento. ....	83
Figura 4.29– Distribuição das aberturas, variando o íon adicionado à mistura com 10% de bentonita, pelo método do Otsu, sendo(a) após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo ciclo e (c) após o terceiro ciclo e (d) após o quarto ciclo do ressecamento. ....	84
Figura 4.30– Distribuição das aberturas, com uso de solução, pelo método do Operador, sendo que (a) refere-se à mistura umedecida com água destilada, (b) a mistura umedecida com solução de CaCH <sub>3</sub> , (c) a mistura umedecida com solução de KCl e (d) a mistura umedecida com a solução de CuSO <sub>4</sub> . ....	85
Figura 4.31– Distribuição das aberturas, com uso de solução, pelo método de Otsu, sendo que (a) refere-se à mistura umedecida com água destilada, (b) a mistura umedecida com solução de CaCH <sub>3</sub> , (c) a mistura umedecida com solução de KCl e (d) a mistura umedecida com a solução de CuSO <sub>4</sub> .....	86

Figura 4.32– CIF em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b)...	87
Figura 4.33– Abertura média em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b) .....	87
Figura 4.34– Desvio padrão das aberturas em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b).....	88
Figura 4.35– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, o íon adicionado à mistura de areia padrão com bentonita a 20% da massa seca, onde C1 representa o primeiro ciclo, C2 o segundo, C3 o terceiro e C4 o quarto.....	89
Figura 4.36– Distribuição das aberturas, variando o íon adicionado à mistura de areia padrão com bentonita a 20% da massa seca, pelo método do operador, sendo que (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo ciclo e (c) após o terceiro ciclo e (d) após o quarto ciclo do ressecamento. ....	90
Figura 4.37– Distribuição das aberturas, variando o íon adicionado à mistura de areia padrão com bentonita a 20% da massa seca, pelo método de Otsu, , sendo que (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo ciclo e (c) após o terceiro ciclo e (d) após o quarto ciclo do ressecamento... ..	91
Figura 4.38– Distribuição das aberturas, em vários ciclos, para uma mesma amostra, pelo método do operador sendo que (a) representa a mistura umedecida com água destilada, (b) umedecida com solução de CaCH <sub>3</sub> , (c) umedecida com a solução de KCl e (d) umedecida com a solução de CuSO <sub>4</sub> . ....	92
Figura 4.39– Distribuição das aberturas, em vários ciclos, para uma mesma amostra, por Otsu, sendo que (a) representa a mistura umedecida com água destilada, (b) umedecida com solução de CaCH <sub>3</sub> , (c) umedecida com a solução de KCl e (d) umedecida com a solução de CuSO <sub>4</sub> .	93
Figura 4.40– CIF em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b)...	94
Figura 4.41– Abertura média em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador e Otsu .....	94
Figura 4.42– Desvio padrão das aberturas em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador e Otsu .....	95
Figura 4.43– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, variando a energia de compactação sobre a mistura de solo e 10% de bentonita em massa seca, onde C1 representa o primeiro ciclo, C2 o segundo, C3 o terceiro e C4 o quarto. ....	96
Figura 4.44– Distribuição das aberturas, variando a energia de compactação sobre a mistura de solo e 10% de bentonita, pelo método do operador, sendo (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro e (d) após o quarto ciclo do ressecamento. ....	97

Figura 4.45– Distribuição das aberturas, variando a energia de compactação sobre a mistura de solo e 10% de bentonita, pelo método de Otsu, sendo (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro e (d) após o quarto ciclo do ressecamento. ....	98
Figura 4.46– Distribuição das aberturas, para uma mesma energia pelo método Operator, sendo (a) energia Normal, (b) energia Intermediária e (c) a energia Modificada. ....	99
Figura 4.47 – Distribuição das aberturas, para uma mesma energia pelo método de Otsu , sendo (a) energia Normal, (b) energia Intermediária e (c) a energia Modificada. ....	100
Figura 4.48– CIF em relação aos ciclos, pelos métodos do Operator em (a) e Otsu em (b)	100
Figura 4.49 – Abertura média em relação aos ciclos, pelos métodos do Operator em (a) e Otsu em (b).....	101
Figura 4.50– Desvio padrão das aberturas em relação aos ciclos, pelos métodos do Operator em (a) e Otsu em (b).....	102
Figura 4.51 – Granulometria do solo puro. ....	103
Figura 4.52– Granulometria da mistura do solo com bentonita.....	104
Figura 4.53– Granulometria da bentonita. ....	104
Figura 4.54– Detalhe da parcela fina de solos . ....	105
Figura 4.55– Comparação do resultado da mistura com a média da proporção. ....	105
Figura 4.56– Curvas de compactação para a mistura em (a) e para o solo puro em (b). ....	106
Figura 4.57– Todas as curvas compactação. ....	106
Figura 4.58– Definição das umidades ótimas para as curvas de solo natural em (a) e da mistura em (b). ....	107
Figura 4.59– Permeabilidade do solo copactado em (a) e detalhe da câmara em (b). ....	108
Figura 4.60– Diferentes estados de fissuração na caixa, sendo (a) após o primeiro ressecamento, em (b) após o segundo, (c) o terceiro e (d) o quarto ciclo. ....	109
Figura 4.61– Diferentes estados de fissuração na caixa após a binarização, (a) após o primeiro ressecamento, em (b) após o segundo, (c) o terceiro e (d) o quarto ciclo. ....	110
Figura 4.62– As representações dos esqueletos ao final de cada ciclo, (a) após o primeiro ressecamento, em (b) após o segundo, (c) o terceiro e (d) o quarto ciclo. ....	111
Figura 4.63– Distribuição de aberturas para cada um dos ciclos. ....	112
Figura 4.64– Variação do CIF ao longo dos ciclos. ....	112
Figura 4.65– Variação da abertura média ao longo dos ciclos.....	113
Figura 4.66– Correlação entre abertura média e CIF. ....	113
Figura 4.67– Deposição da bentonita na superfície do solo, na proximidade das fissuras. ...	114

Figura 4.68– Deposição da bentonita na superfície do solo, na proximidade das fissuras. ...	114
Figura 4.69– Valores das profundidades das fissuras, por aferição direta. ....	115
Figura 4.70– Distribuição acumulada dos valores pelo centro dos bins. ....	116
Figura 4.71– Moldagem das fissuras.....	117
Figura 4.72– Resultado da moldagem das fissuras em perspectiva (a) e em vista plana (b). .	117
Figura 4.73 – Valores das profundidades das fissuras, por moldagem. ....	118
Figura 4.74– Distribuição acumulada dos valores pelo centro dos <i>bins</i> . ....	118
Figura 4.75 – Representação dos dados extraídos da correlação de Chertkov (1998). ....	119
Figura 4.76 – Correlação entre abertura e alcance da fissura.....	119
Figura 5.1– Representação lógica da equivalência de modelo, Santos e Silva (2014) .....	120
Figura 5.2– Representação da coleta da água percolada que acumulou-se.....	120
Figura 5.3– Representação do procedimento para avaliação da percolação ao logo do tempo .....	121
Figura 5.4 – Volume de água percolada acumulada experimentalmente.....	121
Figura 5.5– Diferentes profundidades para, Chertkov (1998). ....	122
Figura 5.6– Profundidades das fissuras geradas por Chertkov. ....	122
Figura 5.7– Volume de água acumulada experimental e calculado dor Chertkov .....	123
Figura 5.8– Profundidades das fissuras geradas por aferição direta. ....	124
Figura 5.9– Volume de água acumulada experimental e calculado da profundidade aferida diretamente .....	124
Figura 5.10– Profundidades das fissuras geradas por medição do molde.....	125
Figura 5.11– Volume de água acumulada experimental e calculado pela medição no molde. .....	125
Figura 5.12– Superfícies de CIF equivalente à do ensaio, sendo (a) linhas paralelas, (b) linhas inclinadas, (c) as cruzetas e (d) o quadrados .....	126
Figura 5.13– Superfícies geradas a partir de Chertkov (1998) , sendo (a) linhas paralelas, (b) linhas inclinadas, (c) as cruzetas e (d) o quadrados. ....	127
Figura 5.14– Superfícies geradas a partir da calibração por moldagem, , sendo (a) linhas paralelas, (b) linhas inclinadas, (c) as cruzetas e (d) o quadrados. ....	128
Figura 5.15– Valores de vazão acumulados por cada uma das superfícies aleatórios pela relação de Chertkov (1998) (a) e pela moldagem em (b).....	128
Figura 5.16 – Representação de duas superfícies com CIF e aberturas médias equivalentes, sendo (a) as fissuras naturais e (b) a representação equivalente. ....	129

Figura 5.17– Representação das profundidades das fissuras equivalentes em relação a cada modelo, sendo (a) aferição direta, (b) moldagem e (c) Chertkov (1998).....	129
Figura 5.18– Resultados calculados para os valores a partir da equivalência de abertura e CIF .....	130
Figura 5.19– Representação da região fissurada lateral em (a), essa fissura isolada em (b) e transformada em superfície em (c).....	131
Figura 5.20– Volume de água acumulada experimental e calculado com fissuras de abertas junto às paredes. ....	132
Figura 5.21 – Volume de água acumulada em três condições diferentes. ....	132

# LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CIE - Commission internationale de l'éclairage

CIF – Crack Intensity Factor

CMYK - Cyan Magenta Yellow Key colour space

D – Diâmetro dos grãos do solo

e – Índice de vazios

EOI - End of Image

GUI – Graphical User Interface

IEC - International Electrotechnical Commission

JPEG - Joint Photographic Experts Group

$k$  – Coeficiente de permeabilidade

*MEKP - Methyl ethyl ketone peroxide*

RGB - Red-green-blue colour space

SRGB - Standard RGB colour space

YUV - 1-Luma and 2-Chrominance colour space

ISO - International Organization for Standardization

SOI - Start of Image

SPIE - Society of Photographic Instrumentation Engineers

VANT - Veículo aéreo não tripulado

$W_o$  – Umidade Inicial

$\gamma_w$  – Peso específico do líquido

$\mu$  – Viscosidade do líquido

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO GERAL

Fissuração e propagação de trincas são fenômenos presente em diversas áreas da engenharia e foco da mecânica de fraturas (O'DOWD, 2003). A propagação e o surgimento de fissuras e trincas estão associados a uma série de condições e consequências negativas para as múltiplas aplicações da engenharia:

- ❖ Perda de desempenho de materiais cuja vida útil e fator de segurança são reduzidos pela piora nos requisitos como estanqueidade, segurança estrutural e conforto;
- ❖ Acréscimo de custos com manutenção e eventual troca de materiais cujo processo de deterioração pode ser acelerado pela fissuração;
- ❖ Possibilidade de contaminação das águas subterrâneas, pela percolação de materiais nocivos e chorume através das fissuras em camadas impermeabilizantes;

Os efeitos deletérios das fissuras são especialmente danosos quando o propósito de uma camada é a impermeabilização. As fissuras formadas alteram as condições de fluxo e comportamentos mecânicos, destruindo as camadas, pavimentos, canais, causando acidentes, aumentando a produção de chorume e contaminando os sistemas de água subterrâneos. Essas consequências negativas da fissuração geram danos à saúde pública, causam perda econômica e são um risco a todos que rotineiramente estão envolvidos nessas obras.

As fissuras são de importância central em camadas de cobertura de aterro também denominados *liners*. Em um *liner* que fissura por ressecamento há simultaneamente uma camada de espessura fina e uma aplicação cujo desempenho é fortemente afetado pelas fissuras. Além das fissuras que permitem a percolação de contaminante através das células, fissuras superficiais permitem a entrada de um volume maior de água que por sua vez aumenta o volume de chorume produzido.

É necessário entender e avaliar o impacto do fenômeno de fissuração sobre a infiltração para que se possa mensurar as mudanças nos parâmetros de segurança e desempenho dessas aplicações, em especial camadas de cobertura de aterros.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é avaliar como diferentes fatores, como percentual de argilominerais expansivos, energia de compactação, adição de íons influenciam o mecanismo de fissuração em uma mistura de solo e bentonita que é sensível ao ressecamento. Avaliando também como esse estado modifica a condutividade hidráulica e dessas aplicações de camadas finas quando as mesmas sofrem fissuração.

São os objetivos específicos desse trabalho:

- ❖ Avaliar como diferentes condições, como composição do solo, energia de compactação e presença de íons influenciam o estado de fissuração de amostras sujeitas à fissuração por ressecamento;
- ❖ Correlacionar o impacto da fissuração sobre a condutividade hidráulica em aplicações geotécnicas que sofram fissuração por ressecamento, com um foco em camadas de cobertura de aterros.;
- ❖ Avaliar diferentes correlações para a profundidade e alcance das fissuras a partir de imagens planas;
- ❖ Comparar diferentes métodos de tratamento de imagens para reconhecimento e análise de fissuras;
- ❖ Verificar se dados médios de área fissurada como o coeficiente de intensidade de fissuração são bons parâmetro para estimar permeabilidade equivalente ou se a abertura média das fissuras representa de forma mais simples uma relação ideal;
- ❖ Avaliar a sensibilidade da simulação de infiltração em relação às mudanças na abertura e geometria das fissuras.

É importante reiterar que as fissuras avaliadas nesse projeto serão geradas devido ao ressecamento de solos, cujas propriedades usadas como camadas impermeáveis em aterros sanitários.

### **1.3 ESCOPO DO TRABALHO**

O trabalho estrutura-se em seis capítulos. O primeiro apresenta a importância da análise de fissuras e o impacto das mesmas sobre diferentes técnicas e obras da engenharia. Os objetivos específicos são representados neste capítulo.

O segundo capítulo engloba revisão bibliográfica sobre as diferentes técnicas e materiais da engenharia que sofrem fissuração e como esse fenômeno afeta certas propriedades relevantes. Há um foco na fissuração por ressecamento de solos argiloso, em especial aos fatores que irão modificar o estado de fissuração de uma amostra. Está também apresentada a base lógica e matemática das análises de imagem nos algoritmos usados nas etapas computacionais.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia das etapas laboratoriais e computacionais. Na etapa laboratorial, descreve-se os ensaios que são usados para caracterizar o material e avaliar os fatores de influência sobre o estado de fissuração dos solos. O algoritmo de análise de imagem e todas as técnicas usadas pelo mesmo também são detalhadas a fundo nessa etapa.

O quarto capítulo contém os resultados obtidos experimentalmente nas etapas e ensaios descritos no terceiro capítulo. Estão também apresentadas as análises dos resultados experimentais obtidos para essas etapas.

O quinto capítulo contém a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente em comparação com os resultados calculado unicamente a partir do modelo teórico simples. Uma comparação entre o uso de diferentes parâmetros médios descritivos da fissura para avaliar a sensibilidade dos modelos também está presente neste capítulo.

O sexto capítulo contém as conclusões da comparação entre os modelos usados e sua proximidade com os valores experimentais e apresenta sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CAMADAS FINAS

Khudnev e Kovtunenکو (1999) utilizam placas e cascas (*plates and shells*) para a definição do comportamento mecânico das regiões circundantes de fissuras. Esses elementos geométricos empregados pelos autores são de espessura diferencial e usados para avaliar deformações contínuas ao longo da fissura.

Uma definição de camada fina aplicável a materiais reais empregados na geotecnia não é apresentada dentro da obra de Khudnev e Kovtunenکو (1999), pois ambos autores ficam no âmbito geral da mecânica das fissuras. Para esse estudo uma camada de qualquer material fissurado era considerada como uma camada fina caso se encaixasse em uma das seguintes condições:

- ❖ A dimensão principal da fissura era da mesma ordem de magnitude da espessura da camada avaliada;
- ❖ As propriedades hidromecânicas eram alteradas de forma significativa pela manifestação de fissuras nessa camada.

Essa é uma definição que põe como fator determinante a profundidade da fissura e a sua influência no desempenho do material avaliado. A Figura 2.1 representa duas camadas fissuradas, sendo que a) está uma camada fina e em b) apenas um material com fissuras superficiais.

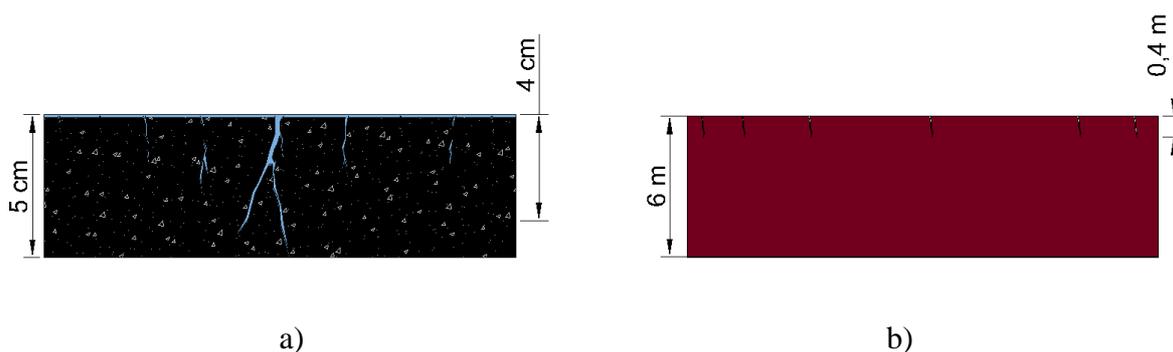


Figura 2.1 – Representação de duas camadas, sendo que a), com fissuras de 4 cm de profundidade classifica-se como fina, enquanto b) com fissuras de 40 cm não se classifica.

Muitas técnicas da geotecnia classificam-se como camadas finas, e várias dessas aplicações são exploradas no capítulo 2.2.

## 2.2 APLICAÇÕES SUJEITAS À FISSURAÇÃO

Dentro da engenharia, todas aplicações sujeitas a solicitações mecânicas podem sofrer fissuras. O quanto essas fissuras são relevantes para o desempenho ou comportamento da obra dependerá da natureza da técnica ou obra em si.

As fissuras são rupturas localizadas dentro de materiais submetidos a esforços cisalhantes ou de tração. Representam a modificação da geometria do material para adequar-se a um estado de tensões diferente do original (O'DOWD, 2003).

As técnicas e situações onde a condutividade hidráulica é relevante são fortemente afetadas pelas fissuras, que criam caminhos preferenciais para o fluxo e reduzem as espessuras de material pelo qual o fluido deve atravessar. Em aplicações cuja resistência mecânica seja importante, as fissuras representam pontos na geometria onde houve uma concentração de tensões superior à resistência do próprio material (O'DOWD, 2003).

Como consequência da complexidade do fenômeno e das múltiplas variáveis envolvidas, modelos de geometria que correlacionem os padrões de fissuras com sua profundidade ou seu alcance ainda não são inteiramente confiáveis (CHERTKOV, 1998). É de interesse verificar as correlações empíricas entre abertura e geometria espacial dos meios fissurados com correlações já estabelecidas por trabalhos anteriores.

Liners ou cobertura de aterros construídos com argilas expansivas podem sofrer uma alteração sensível nos valores de condutividade hidráulica, a ponto dos mesmos não se tornarem materiais adequados para essa finalidade (NOVAK et al, 2000). Dentro da pavimentação, pequenas fissuras são os caminhos pelos quais o bombeamento de finos ocorre, podendo destruir do revestimento até a base. No concreto, as fissuras podem ter origens diferentes provocadas pela ação individual ou combinada de variações higrotérmicas ou carregamento e esforços maiores que sua resistência, como relatado em Techné, (1998).

O impacto na mudança de parâmetros como condutividade hidráulica, devido à fissuração, é objeto de estudos que tentam avaliar como esse fenômeno se desenvolve e a magnitude de seu impacto. No entanto, por sua natureza localizada, e sujeita a ação de diferentes mecanismos a correta modelagem da fissura é um tópico bastante complexo a ser desenvolvido.

A Figura 2.2 mostra o resultado do ressecamento de um resíduo mineral de bauxita após 90 dias, que apresenta aberturas de fissuras de diâmetro considerável em relação às pessoas representadas.



Fonte: <http://www.womp-int.com/images/story/2010vol08/11d.jpg>

Figura 2.2 – Fissuras por ressecamento em resíduos de bauxita.

## 2.2.1 ARGILAS EXPANSIVAS

O mecanismo causal da fissuração por ressecamento em materiais argilosos está geralmente associado ao ressecamento e à sucção mátrica que fissura a superfície do material argiloso, onde há a maior taxa de perda de água. O solo resseca, a sucção mátrica, associada ao grau de saturação do solo, modifica-se, que por sua vez altera a tensão da película ou filme contráctil tracionando o solo adjacente causando a fissuração como representado na Figura 2.3 (Li et al, 2012).

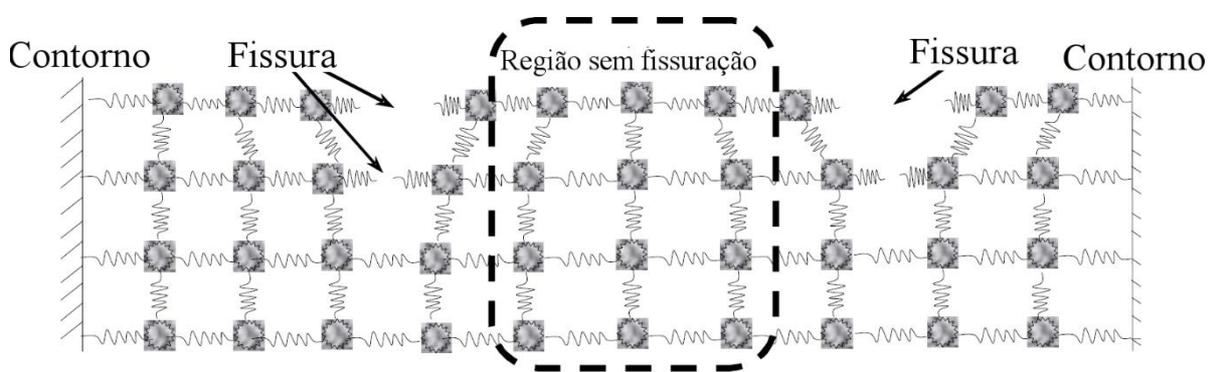


Figura 2.3 – Modelo de fissuração de argilas descrito por Li et al (2012).

A perda de desempenho em barragens de terra e concreto pode ser prevista pelo surgimento de fissuras ao longo da face e por vezes no núcleo impermeável. A presença dessas fissuras está associada tanto a um acréscimo de tensões quanto à um possível ressecamento da face (FILHO, 2006).

Em acordo com Egloffstein (2001), o fenômeno de ressecamento tende a causar mudanças irreversíveis em argilas, principalmente em bentonitas. O ressecamento a elevadas temperaturas leva à remoção rápida da água, modificando as propriedades coloidais e expansivas das bentonita. Se a perda de água do solo ocorrer com uma taxa menor e constante, o decréscimo de volume do solo se encerra quando o solo atinge a estabilidade das fissuras, resultado do mínimo volume que pode ser ocupado para um solo em certo estado. Nesse ponto, pode-se assumir que a argila atinge seu menor valor de porosidade (Santos e Silva, 2014).

## 2.2.2 PAVIMENTAÇÃO

As causas de fissuração em pavimentação asfáltica são múltiplas, Maia (2012) apresenta um levantamento das principais causas identificadas em obras viárias:

- ❖ Ruptura da camada de desgaste devido à solicitação do tráfego;
- ❖ Espessura da camada subdimensionada em relação à necessária, projeto estrutural inadequado;
- ❖ Fadiga e envelhecimento do material;
- ❖ Falta de capacidade de suporte do conjunto pavimento, causado por vários fatores (perda de base, sub-base ou leito do pavimento, deficiência nos elementos de drenagem)
- ❖ Construção de baixa qualidade (compactação inadequada).

Um dos fenômenos deletérios que é diretamente vinculado ao estado de fissuração de um material é o bombeamento de finos. O mesmo ocorre quando o material do leito sobe para a camada de lastro em decorrência do efeito das cargas de serviço associadas à presença de água no subleito, este material fino é alojado entre os vazios da camada de lastro alterando a rigidez da estrutura. O bombeamento torna-se cada vez mais intenso e a via entra em um ciclo acelerado de deterioração e fissuração (PORTO,1984).

As primeiras fissuras que se manifestam em um pavimento podem então se tornar o caminho preferencial para o movimento reverso de material do subleito, por meio do bombeamento de finos como representado na Figura 2.4.

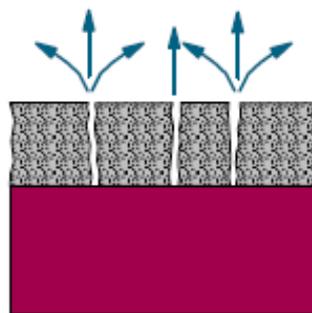
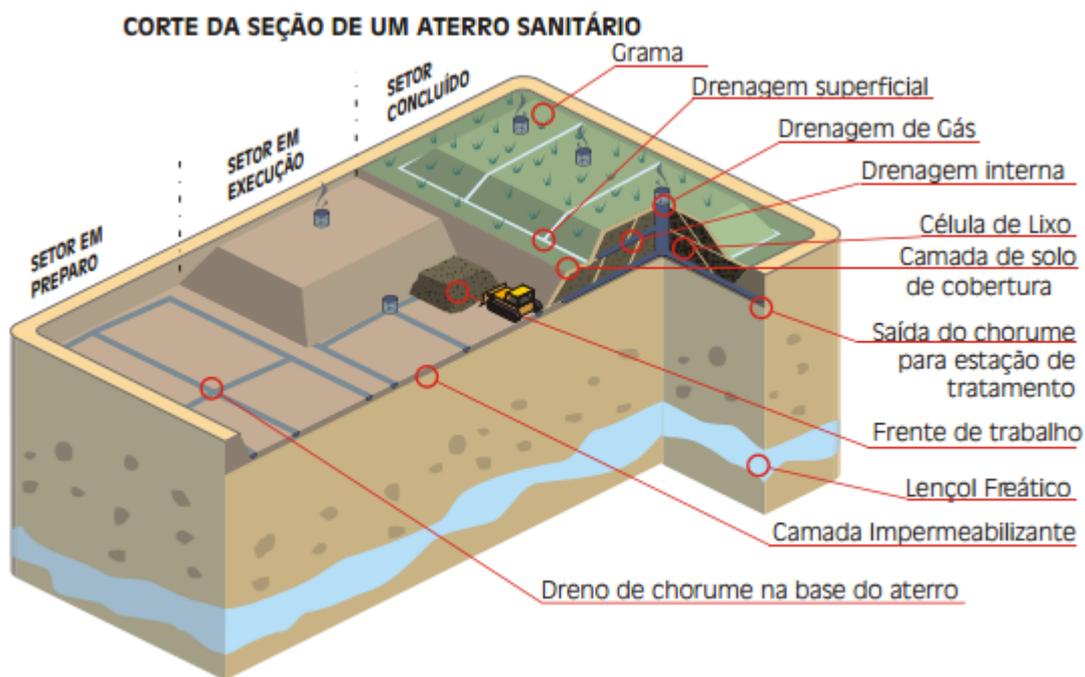


Figura 2.4 – Representação do bombeamento de finos (Palmeira,2008).

O bombeamento de finos é um fenômeno que potencialmente intensifica a abertura de fissuras aumentando o diâmetro médio das mesmas já existentes, tornando uma camada originalmente impermeável em um meio de permeabilidade equivalente elevada.

### 2.2.3 CAMADA DE COBERTURA DE ATERROS

Em acordo com a NBR 8419 (ABNT, 1996), aterros sanitários são uma técnica de disposição de resíduos no solo que, fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permitem o confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública, minimizando os impactos ambientais. A Figura 2.5 representa um aterro sanitário com todas as estruturas requisitadas pela norma.



Fonte: Manual de Aterros Sanitários, Governo da Bahia

Figura 2.5 – Representação de um aterro sanitário ideal.

Coberturas de aterro ou *liners* são aplicações que qualificam como camada fina que são sujeitas a fissuração em condição de ressecamento. As múltiplas funções de um aterro sanitário operando em um estado ótimo podem ser listadas:

- ❖ Evitar a exposição, reação e decomposição dos resíduos com a atmosfera;
- ❖ Impedir a entrada de água nas células de resíduos sólidos;
- ❖ Controlar a drenagem de chorume e materiais lixiviados;
- ❖ Impedir a liberação de gases nocivos e de efeito estufa, como o metano permitindo, se não a coleta, ao menos a captura ou queima desse biogás nocivo;
- ❖ Reduzir a proliferação de animais que sejam vetores de doenças;

Os sistemas de cobertura estão sujeitos a um grande número de solicitações como variações de temperatura, ciclos de molhagem e ressecamento, recalques causados pela decomposição dos resíduos, movimento de veículos, erosão por água ou vento, presença de raízes e animais. Estas solicitações podem comprometer todo o sistema de cobertura, ocasionando a perda de estanqueidade e o surgimento de fissuras e trincas, que criam caminhos preferenciais de fluxo e aumentam a permeabilidade das camadas de cobertura (BOSCOV, 2008).

## **2.3 FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO**

Diferentes materiais vão manifestar fissuras caracteristicamente próprias e o fenômeno será regido ou desencadeado por situações específicas tanto devido à natureza do material quanto às condições de contorno (O'DOWD, 2003).

O ressecamento do solo sensível através da evaporação da água pode acarretar no surgimento de fissuras ou trincas e essas podem mudar algumas características do solo como sua permeabilidade e a geometria. Porém a capacidade do solo trincar depende também da sua estrutura e vários fatores levantados por Shi et al (2013), como composição do solo, energia de compactação e presença de íons.

Uma descrição da dinâmica do fenômeno de ressecamento nos solos compactados está representada no trabalho de Haines (1923) apud Albrecht e Benson (2001). Esse processo de ressecamento é então dividido pelo autor em duas etapas distintas: primária e residual.

O ressecamento primário inicia-se quando o solo úmido é exposto ao ar, permitindo que a água saia sem que haja a entrada do ar. A variação de volume do material tem de ser igual à perda de água, como consequência da não entrada de ar e conservação da massa do sistema fechado. É nessa etapa inicial em que ocorre a maior parte da variação do volume, mas com uma taxa cada vez menor, pois agora, a água presente resiste à perda.

Essa água que originalmente envolvia os grãos do solo sai do sistema, permitindo que os grãos se aproximem até que eles comecem a se tocar. A partir desse contato acontece a etapa secundária de ressecamento, no qual acontece um ajuste das posições dos grãos entre si. O ressecamento primário representa a maior parte da perda de água e mudança de volume.

A fissuração está associada a uma redução no volume, mas a taxa com que esse mesmo ocorre e a própria composição da matriz de solo exposto ao ressecamento influenciam o

processo. Das variáveis envolvidas na fissuração, algumas são de natureza interna, ou proprietárias ao solo em seu estado inicial e outras ambientais, dependentes de condições externas ao solo, como taxa com que a saída de água ocorre. Esses diferentes parâmetros que influenciam o processo de formação de fissuras foram listados por Shi et al. (2013):

- ❖ Conteúdo de argilominerais expansíveis;
- ❖ Estrutura e grau de compactação;
- ❖ Presença de íons ;
- ❖ Coeficiente de *Poisson*.

A presença de argilominerais expansíveis ou cuja estrutura permite a intercalação de água entre as placas determinará os limites de deformação que um volume de solo pode atingir. A distribuição de íons em cada solução pode impactar o processo de fissuração por mais de um mecanismo. O íon dissolvido pode ser intercalado entre as placas do argilomineral componente alterando a expansão da argila quando umedecida.

A taxa com a qual a água é removida do solo úmido o segundo processo pelo qual a fissuração pode ser influenciada pelos íons dissolvidos. Um dos fatores propostos por Shi et al. (2013) para a fissuração é um gradiente na taxa de perda de água pela matriz do solo e a dissolução do sal dificulta o processo de evaporação da água.

Um parâmetro importante quando se avalia a fissuração é o CIF, ou *Crack Intensity Factor*, que determina a relação entre a área de superfície das fendas e a área total da superfície da amostra. Esse parâmetro é tirado de imagens representativas das amostras e por meio de programas a superfície total é dividida em “fissurada” e “não fissurada”. A razão entre a área fissurada e a área total da amostra representa o valor de CIF. A figura 2.6 representa o conceito de CIF para algumas formas geométricas.

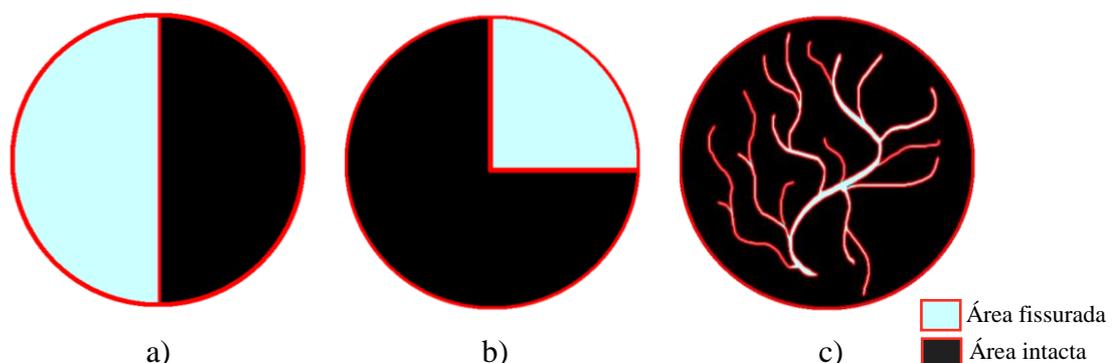


Figura 2.6 – Figuras com diferentes valores de CIF equivalente, sendo a) com 50%, b) 25% e c) 18%

Como dado, o CIF representa a intensidade do estado de fissuração da amostra, associando a área que sofreu ruptura com a área original. Como parâmetro, o CIF carrega poucas informações sobre a geometria das fissuras, pois não representa valores de abertura, comprimento ou profundidade fissura. É portanto de interesse o uso ou determinação de outro parâmetro que melhor apresente as propriedades relevantes das fissuras formadas.

Um conjunto de dados que representa de forma mais precisa as fissuras é a distribuição de aberturas. Com o uso de operações simples sobre os dados de abertura é possível a extração de outros parâmetros, como abertura média e até o CIF, permitindo a criação de meios equivalentes simplificados.

## **2.4 INFLUÊNCIA DA FISSURAÇÃO NA INFILTRAÇÃO**

Na condição saturada, a água ocupa a maior parte ou a totalidade dos vazios do solo, e quando submetida a uma diferença de potenciais, a mesma desloca-se. O estudo da percolação da água nos solos é de vital importância para o entendimento de diferentes fenômenos e problemas presentes nas diversas aplicações da geotecnia.

Em condições saturadas, aplica-se diretamente a lei de Darcy, mantidas as condições de saturação, número de Reynolds inferior ou igual a dez e fluxo laminar. Nesse contexto de fluxo permanente e solo saturado, pode-se entender de forma simplificada, a permeabilidade como a “facilidade” de um solo à passagem de um fluido.

A taxa com a qual a água irá atravessar o meio poroso é uma propriedade dependente do solo e de seu estado. Esse parâmetro é o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica ( $k$ ) que expressa como uma vazão se relaciona a um gradiente hidráulico.

Na Figura 2.7 estão representadas diferentes profundidades de um conjunto de fissuras para um solo, em perfil. Nos pontos (a) e (d), as fissuras reduziram a distância que a água precisa percolar através do solo e, portanto, modificaram o gradiente hidráulico naquele ponto. Na mesma Figura em (b) uma das ramificações do solo atravessa a camada inteira, tornando o fluxo nesse ponto uma condução forçada com fluxo turbulento no lugar de um fluxo laminar.

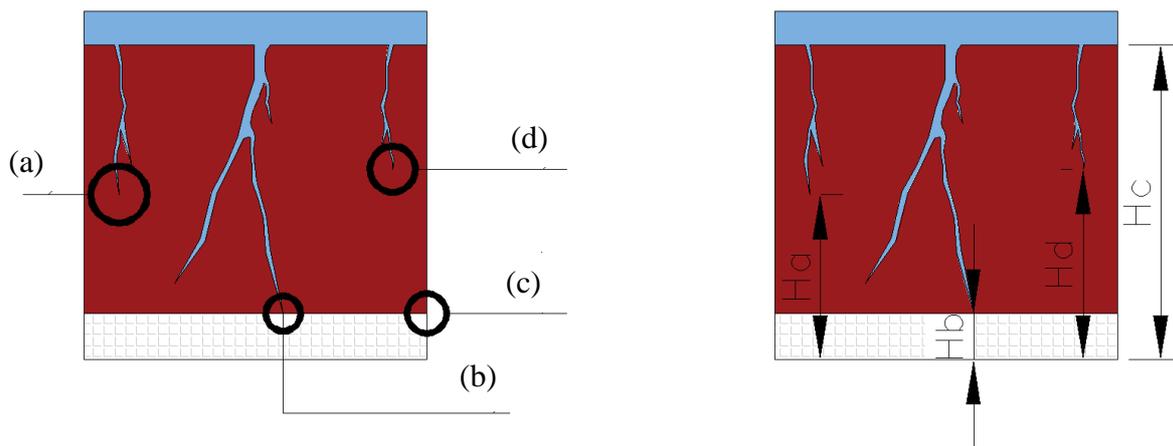


Figura 2.7 – Diferentes profundidades de fissuras irão alterar de forma diferente a percolação da água através do meio.

Para computar a contribuição de cada um dos tipos de fissura é necessário então correlacionar a abertura das mesmas, uma propriedade bidimensional, com a profundidade de cada ponto que a mesma engloba. Chertkov (1998) propõe diferentes relações para profundidades e aberturas de fissuras que são importantes para essa correlação. A Figura 2.8 representa essas relações para diferentes umidades iniciais ( $w_o$ ) para um solo expansivo.

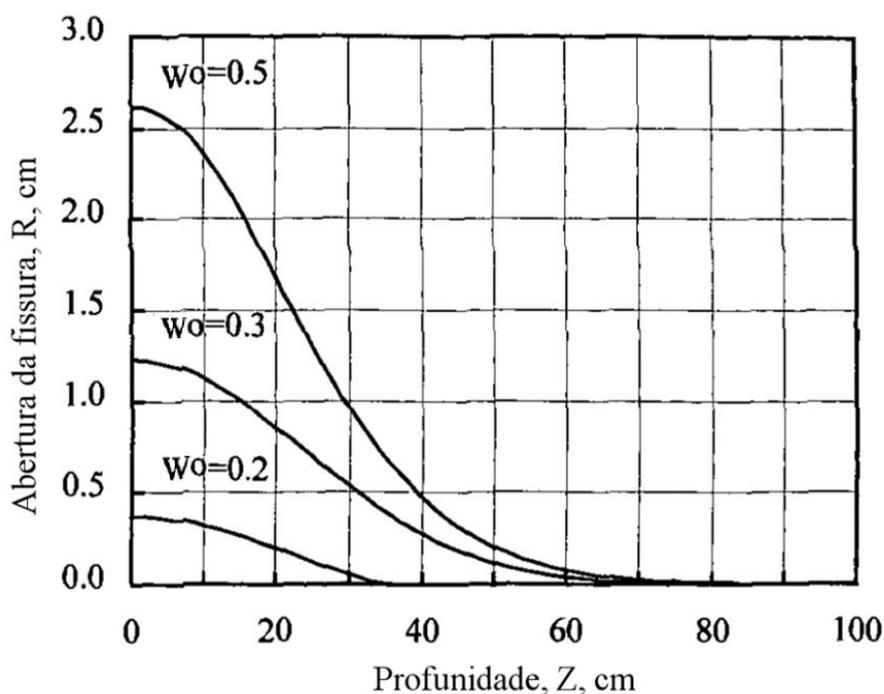


Figura 2.8 – Diferentes profundidades em relação à abertura, Chertkov (1998).

Um ponto importante a se comentar é o fato de que a distribuição de valor de abertura proposto anteriormente por Chertkov (1998) é para as macro aberturas no solo, sendo que as

micros aberturas, como representado na Figura 2.6, atingem profundidades muito maiores do que as macro fissuras.

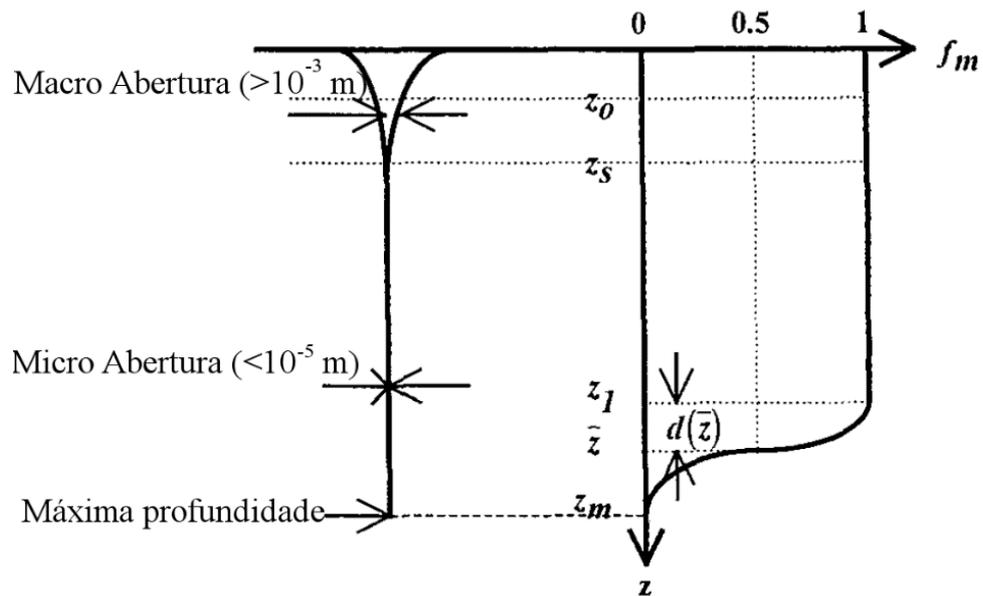


Figura 2.9 – Alcance de micro fissuras, Chertkov (1998).

Em outras aplicações sujeitas à fissuração é necessário entender o modo de ruptura (ressecamento, dilatação térmica, ação mecânica) para então correlacionar a fissura e a profundidade com o material fissurado.

## 2.5 CAPTURA E ANÁLISE DE IMAGENS

Os computadores são indispensáveis para a análise de grandes quantidades de dados para tarefas que exigem computação complexa, ou para a extração de informação quantitativa. Por outro lado, o córtex visual humano é um aparelho de análise de imagem excelente, especialmente para a extração de informação de nível mais elevado, e para muitas aplicações, como segurança, e a detecção remota - analistas humanos ainda não podem ser substituídos por computadores. Por esta razão, muitas ferramentas importantes de análise de imagem, tais como detectores de bordas e redes neurais são inspiradas por modelos de percepção visual humana (RUSS, 2016).

Análise de imagens é o processo que permite a extração de informações significativas a partir de imagens, principalmente a partir de imagens digitais por meio de técnicas de processamento computacional. A análise de imagem pode ser tão simples como barras de leitura de etiquetas codificadas ou tão sofisticado como a identificação de uma pessoa a partir de seu rosto.

O dispositivo de captura de imagem transforma um sinal de luz contínuo, que parte da fonte, recebido pelo sensor e transformado em uma matriz digital de valores associados às cores dentro de um espaço de cor específico. Para descrever as imagens digitais é necessário determinar o espaço de cor e a codificação das mesmas.

É necessário descrever o processo de transformação de uma imagem real contínua para uma imagem digital e discreta para se entender a natureza dos dados analisados. A imagem contínua e real pode ser modelada por uma função matemática descrita na equação 2.1. Para essa equação,  $x$  e  $y$  são números reais que são limitados a um intervalo fechado de 0 a  $X$  e de 0 a  $Y$ .

$$f(x, y) = \text{Cor no ponto } (x, y) \quad 2.1$$
$$x \in [0, X] \text{ e } y \in [0, Y]$$

Essa é a representação de uma imagem real de natureza contínua, que para ser transferida para um meio digital deve passar por um processo de discretização. A função  $f(x, y)$  de cor em ponto será transformada em uma matriz de resultados, por um processo lógico. A Figura 2.10 apresenta diferentes representações de uma mesma imagem que utiliza um espaço de cor teórico e contínuo e um espaço de cor discreto.

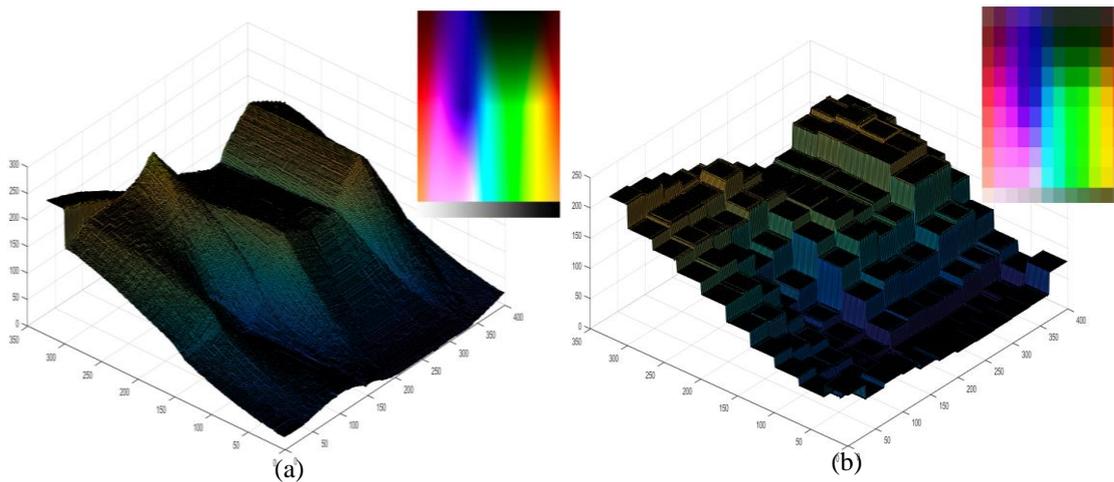
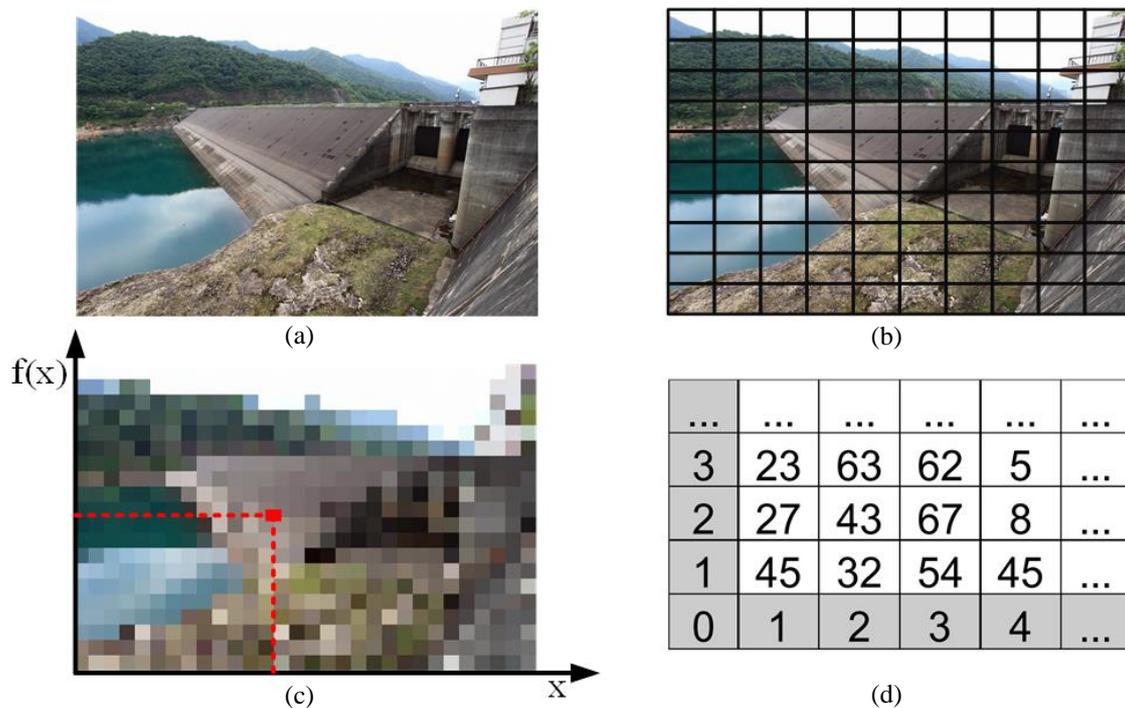


Figura 2.10 - Representação da função  $f(x, y) = \text{Cor no ponto } (x, y)$  em cores, para: (a) espaço de cor contínuo e (b) espaço de cor discreto de *pixels*.

Scuri (1999) descreve teoricamente como a captura dessas funções contínuas são transformada em uma imagem digital que pode ser analisada: A partir da amostragem e quantização da função de cores contínua e real, pode-se associar a cada área dentro da imagem real um valor inteiro representativo de cor. Esses valores de cor são estruturados em matrizes que forma as imagens digital, sendo que cada elemento dessa matriz é um Pixel, ou *Picture Element*.

Esses *pixels*, que são a menor unidade componente de uma figura, tem o valor definido pelo espaço de cores do formato da imagem, como referido anteriormente. O processo de transformação de uma imagem contínua em uma imagem discreta digital é dividido em quatro etapas lógicas, divisão em um grid, coleta, discretização e codificação

Na Figura 2.11 (a) está a representação teórica e contínua de uma imagem, nesse caso, a barragem de *Tataragi*, no Japão. Para a produção dos conteúdos dos pixels é feita uma amostragem da figura que é dividida por um *grid*, representado na Figura (b). O conteúdo de cada pixel será a transformação das cores de um bloco real que será transformada em um pixel, representado na Figura (c), processo denominado discretização. A Figura (d) representa então a última etapa da produção de uma imagem que é a codificação da mesma em uma matriz com os dados de cores para cada pixel para um determinado espaço de cor.



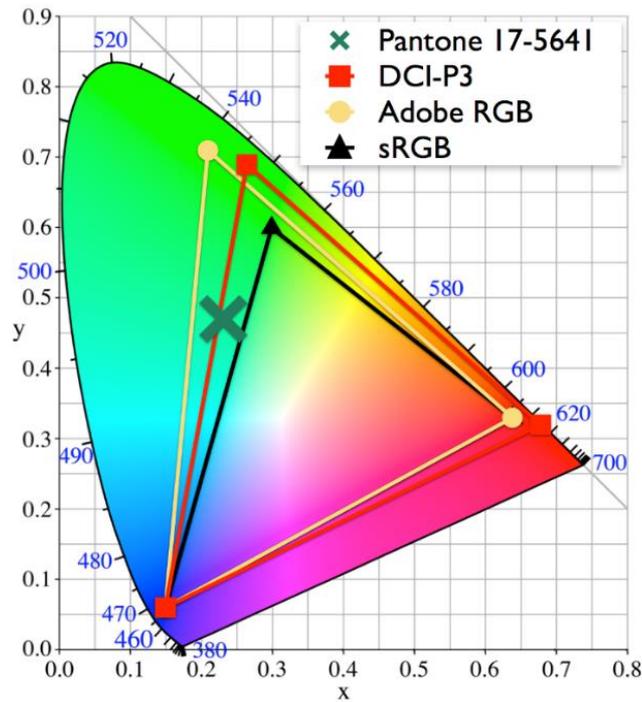
Fonte: Barragem de *Tataragi*, Takashi Yasukochi, <http://damnet.or.jp/cgi-bin/binran/enPAL.cgi?idm=72369>

Figura 2.11 – Representação lógica da transformação de uma imagem teórica contínua em uma figura estruturada em matriz de cores sendo (a) a imagem teórica, (b) o grid de referência, (c) a quantização e (d) a matriz de pixels .

De acordo com Russ. (2016), o espaço de cor é um conjunto organizado de cores que está associado a uma representação das mesmas em meio digitais, analógicos e físicos.

Existem múltiplos espaços de cor, cada um associado a uma aplicação ou uso específico. Os espaços podem ser definidos de forma arbitrária encarregando nomes ou números às cores componentes do mesmo como no espaço *Pantone*, ou matematicamente estruturadas como *CMYK* (*Cyan, Magenta, Yellow and Key*) ou *RGB* (*Red, Green and Blue*).

A Figura 2.7 representa uma gama ou *gamut* de cores. A “ferradura” externa representa todas as cores dentro do espectro visível da luz e dentro da mesma, estão alguns espaços de cor do tipo *RGB* e valores não estruturados de cores, pelo espaço de cor *Pantone*.



Fonte: [https://dotcolor.com.files.wordpress.com/2012/12/pantone\\_2013\\_dot\\_color.png](https://dotcolor.com.files.wordpress.com/2012/12/pantone_2013_dot_color.png);

Figura 2.12 – Diferentes espaços de cor dentro do espectro total de luz visível

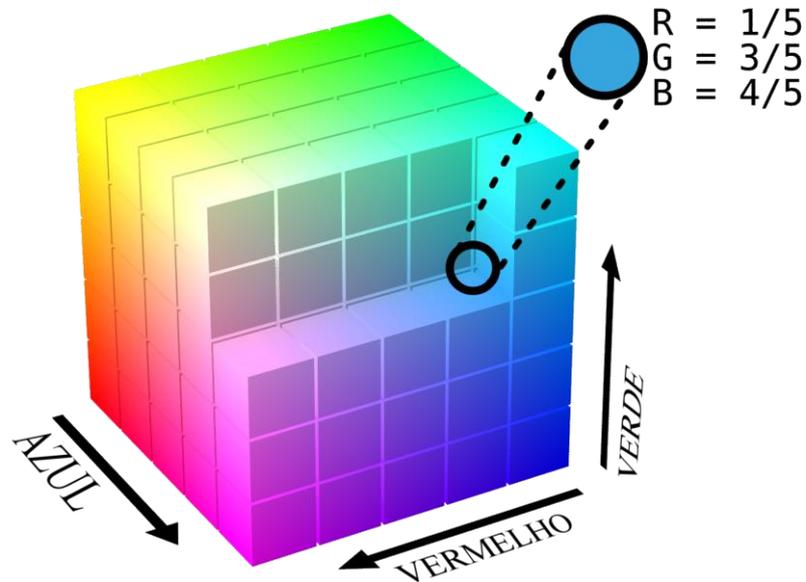
O espaço de cores de uma imagem digital é importante para se garantir que não haja a perda de informações relevantes nas etapas de transformação ou tratamento das fotos. As imagens capturadas geralmente estão representadas em um espaço RGB, com um canal de 8 bits.

Um sistema de RGB gera um espaço de cor a partir da superposição ou adição de 3 componentes: vermelho verde e azul, representados pelas letras “R”, “G” e “B”, respectivamente. Cada componente é descrito por um valor de um canal de 8 bits, ou seja, existem  $2^8$  ou 256 parcelas para cada uma das três cores base.

Os valores tradicionais de um sistema RGB são inteiros de 0 a 255, ou reais e definidos como um ponto flutuante entre 0 e 1, sendo que as entradas de cada canal são o resultado da divisão de seu valor natural pelo máximo de 255

Existem múltiplas variantes do espaço RGB, como por exemplo o RGB24 e RGB32 que usam diferentes codificações de cor para reduzir o tamanho de um arquivo. As imagens capturadas estão representadas em um espaço de cor sRGB (*Standard RGB*) que tornou-se o padrão para espaços de cor RGB a partir de 1996.

A Figura 2.9 representa de forma discreta o espaço de cor RGB em uma matriz tridimensional, sendo que a parcela adicionada de cada cor é dependente da posição da mesma em cada um dos eixos de cor.



Fonte: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGB\\_Cube\\_Show\\_lowgamma\\_cutout\\_b.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGB_Cube_Show_lowgamma_cutout_b.png)

Figura 2.13 – Representação de um espaço de cor sRGB em uma matriz tridimensional.

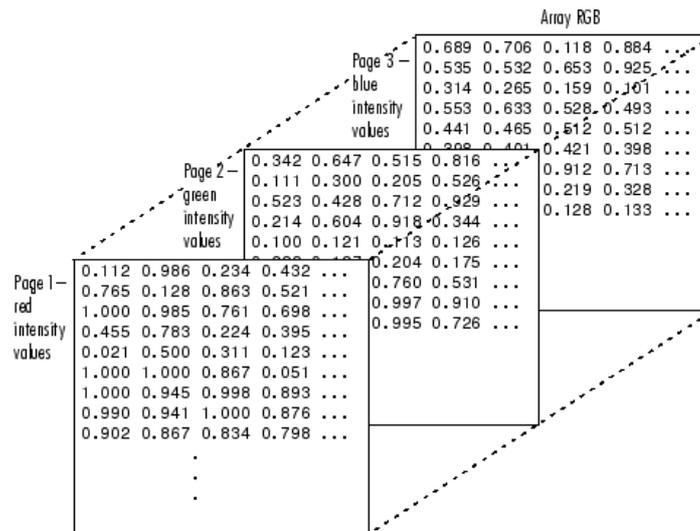
O espaço de cor determina como as cores serão definidas, mas é a codificação da imagem digital que irá determinar como os valores em sRGB serão estruturados. As imagens a serem trabalhadas estão em um formato JPEG, que determina como acontece a transformação dos dados contínuos de luz em matrizes de cor.

A codificação JPEG, ou *Joint Photographic Experts Group* pode ser definida como o algoritmo ou *codec* que define como uma imagem é compactada em um fluxo ou *stream* de *bytes* e descompactada de volta em uma imagem, sem indicar o formato usado para conter esses *bytes* (PENNEBAKER, 1993). É importante distinguir a extensão da imagem do *codec* que foi usado para comprimir a mesma. Extensões que usam JPEG como *codec* são: .jpg, .jpeg e .jif.

Para se entender como os dados serão interpretados pelo programa é necessário apresentar como um *stream* de *bytes* será transformado em uma matriz espacial. Os dados são estruturados por marcadores definidos que indicam metadados, resolução, onde começam os dados da imagem (SOI) e onde terminam os dados da imagem (EOI). Os marcadores são interpretados pelo programa e os canais de cada cor são separados em matrizes com dimensão

igual à resolução. Os detalhes dos marcadores podem ser encontrados na norma 10918-1 da ISO/IEC (1993).

Cada elemento do vetor de matrizes transformado da imagem terá valores reais de 0 a 1 que representam a parcela das três cores básicas que será adicionada a cada um dos pixels da imagem. Uma representação visual de como o vetor é descrito está na Figura 2.10.



Fonte: [http://www.mathworks.com/help/matlab/math/ch\\_data\\_struct5.gifs](http://www.mathworks.com/help/matlab/math/ch_data_struct5.gifs)

Figura 2.14 – Representação de uma imagem genérica em sRGB por meio de um vetor de matrizes.

É importante entender a estrutura de cores dentro de uma imagem para que se possa então trabalhar as figuras, pois os dados serão extraídos a partir da diferença entre pixels. A partir das cores, define-se um limiar para tornar as imagens, vetores de matrizes de cor, em matrizes binárias ou lógicas que podem ser trabalhadas com as técnicas de análise. Os detalhes do algoritmo usado e as técnicas usadas em cada etapa são aprofundados especificamente no capítulo referente à metodologia.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi dividida em duas etapas: uma laboratorial e outra computacional. Durante a primeira parte são extraídos os parâmetros e as propriedades que foram alimentadas na etapa computacional. Esses parâmetros experimentais são a condutividade hidráulica do meio, a geometria das fissuras (representada em imagem) e as condições de contorno da caixa.

Na etapa laboratorial, diferentes solos e misturas foram avaliados por ensaios de fissuração em pequena escala para que se escolhesse uma combinação de material, energia de compactação e íon dissolvido que manifestasse o comportamento desejado (fissuração por ressecamento) em maior escala.

O material selecionado para a infiltração fissurada na caixa foi caracterizado, por meio de ensaios descritos nas normas técnicas e literatura especializada, sendo que esses dados foram também usados como controle em etapas intermediárias dos ensaios (homogeneização e compactação).

Esse material foi compactado em uma caixa de poliestireno e submetido a ciclos de ressecamento, atingindo um estado de fissuração estável. A vazão da água através do meio fissurado é então medida dentro de um sistema fechado.

Na etapa computacional foram usadas técnicas relacionadas à identificação da geometria característica das fissuras e criação de meios equivalentes usados. Os resultados do ensaio de infiltração na camada compactada fissurada foram comparados com os esperados pelas simulações alimentadas com dados dos ensaios.

A Figura 3.1 representa todas as etapas, laboratoriais e computacionais e como as mesmas se vinculam dentro do escopo do trabalho.

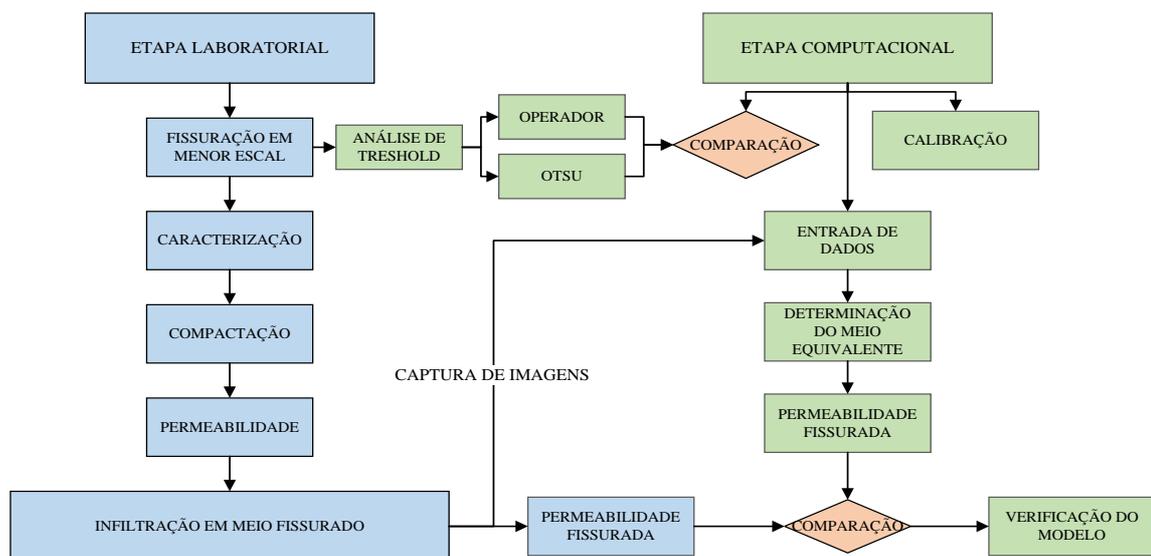


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia completa.

### 3.1 SELEÇÃO DO MATERIAL

Para a seleção do material a ser usado no trabalho foram levantadas várias possibilidades, o uso do solo natural, disponível no campo experimental ou o uso de um solo composto, adicionado de alguma argila expansível. Para avaliar se o solo natural seria um bom material para a análise de fissuras, o mesmo foi extraído em diferentes profundidades, de 2 metros a 5 metros, no período de junho de 2016 do campo experimental da geotecnia, próximo ao prédio da SG12, dentro do Campus Darcy Ribeiro, da Universidade de Brasília.

As amostras para as avaliações preliminares de fissuração foram extraídas usando um trado manual com extensores de comprimento de 1m, para diferentes profundidades. A Figura 3.2 representa o ponto de coleta de onde as amostras foram extraídas. As coordenadas do mesmo são: -15,765996, -47,872691.



Fonte: Google Earth, acessado julho 2016

Figura 3.2 – Ponto de coleta do solo natural.

Antes dos ensaios de per foi necessário verificar se o solo natural, sem adição de nenhuma parcela de material expansivo iria manifestar fissuras devido ao ressecamento. O solo extraído não fissurava de forma sensível, optando-se, portanto, pela composição de um material que tivesse o comportamento desejado quanto à formação de fissuras.

A composição do material foi feita em acordo com as propriedades de interesse para o fenômeno investigado: sendo trabalhável nas condições de energia avaliadas, disponível em quantidade condizente com a compactação e ser fissurável sob a ação do ressecamento.

### 3.2 FISSURAÇÃO EM PEQUENA ESCALA

O procedimento de fissuração em pequena escala foi usado para avaliar a sensibilidade das diferentes misturas de solo em relação ao ressecamento. A metodologia seguiu a proposta do trabalho de Aksu et. al (2015), em que um material argiloso expansivo dissolvido em uma solução de água destilada foi ressecado em placas de Petri. Para a etapa de umedecimento das amostras, o processo foi inspirado no mini simulador de chuvas de Ribeiro et al. (2007).

As diferentes composições de solo e argila foram preparadas anteriormente e seca em estufa. Foi adicionada a cada uma das misturas avaliadas uma quantidade de água ou solução de diferentes sais (cloreto de potássio, sulfato de cobre II e acetato de cálcio) para que a mesma atingisse uma umidade de 20% e foram deixadas na câmara úmida para homogeneizar. Após o período de 24 horas, a mistura foi compactada na placa de Petri de diâmetro de 10 cm com um soquete pequeno, composto por um peso cilíndrico de 200 g e uma guia de PVC para as alturas de queda.

O material compactado na placa tinha em torno de 0,5 cm de espessura e foi exposto a uma precipitação de água destilada até que se formasse uma lâmina de 0,5 cm acima do material (até a borda da placa de Petri). Essa precipitação foi feita por meio da presença de água dentro de uma segunda placa de Petri com vários furos de diâmetro de 2 a 3 mm acima do material avaliado. Essa placa furada e sustentada por hastes de alumínio permitiu o gotejamento da água, evitando uma erosão e fissuração preferencial pela ação da queda de água sobre a superfície do solo.

A Figura 3.3 representa as etapas individuais de preparação da amostra: a homogeneização seguida da compactação na placa de Petri com o material já umedecido, seguido da disposição da camada compactada embaixo da segunda placa onde as gotas de água precipitavam até se formar uma lâmina sobre o material de espessura de 0,5 cm.

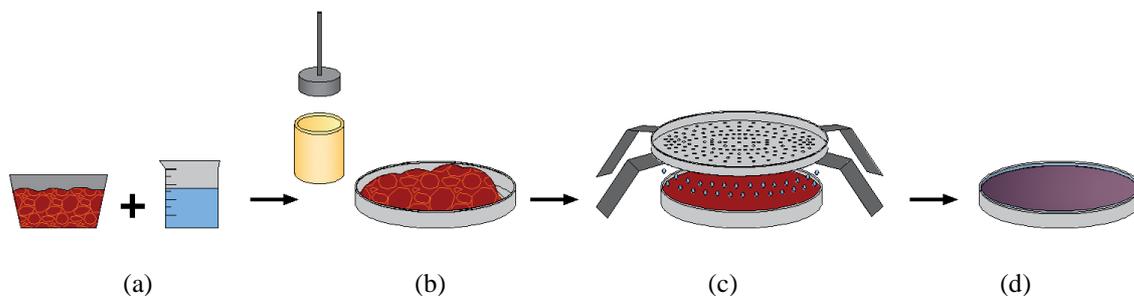


Figura 3.3 – Representação simplificada dos ciclos de menor escala, onde (a) representa a homogeneização, (b) compactação, (c) molhagem e (d) saturação.

O material umedecido e compactado na placa de Petri era então transferido para o aparato-piloto de ressecamento desenvolvido por Costa (2015), e submetido a 12 horas de exposição ao conjunto de lâmpadas que simula a energia do sol, como representado na Figura 3.4.

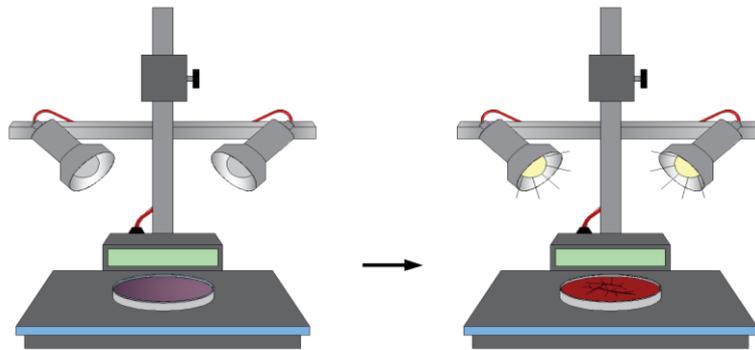


Figura 3.4 – Aparato-piloto de ressecamento de solos.

No aparato-piloto de ressecamento, foram usadas duas lâmpadas de infravermelho de 200W cada, inclinadas verticalmente a 30 graus de forma a distribuir de maneira mais homogênea possível o calor sobre as amostras de solo. O aparato piloto encontrava-se dentro laboratório de geotecnia ambiental, sem passagem de vento, com temperatura ambiente em torno de 24°C, mas sem controle da umidade ambiente. Como nessa etapa não há interesse na dinâmica de formação de fissuras, as imagens eram capturadas ao final de cada ciclo de ressecamento.

As fotos do material avaliado foram tiradas ao final das 12 horas de exposição da placa no aparato piloto. Para a captura das imagens, a placa com o material fissurado permanecia sobre uma superfície plana com luz espalhada e a câmera era disposta perpendicularmente à placa de Petri. Após essa etapa, o material fissurado foi submetido a um novo ciclo de molhagem com a placa perfurada e novamente foi transferido para exposição às lâmpadas. Esse ciclo de molhagem e ressecamento foi repetido de três a quatro vezes, dependendo da amostra.

Especificamente nesses ensaios foram avaliados os parâmetros que influenciam o estado de fissuração de uma amostra conforme sugerido por Shi et al. (2013). Os parâmetros avaliados foram:

- ❖ Percentual de argilominerais expansivos;
- ❖ Origem do solo;
- ❖ Energia compactação;
- ❖ Presença de íons dissolvidos.

Os detalhes de como foram avaliadas cada uma das condições sugerida por Shi et al. (2013) estão representados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Representação dos parâmetros avaliados e a identificação das amostras individuais.

Parâmetro avaliado	Solo Matriz	Mudança	Amostras
Profundidade/ Origem do solo	Tropical Natural	Profundidade da solo matriz	2 m
			3 m
			4 m
			5 m
Presença de Argilominerais expansíveis	Solo Natural extraído da profundidade 2m.	Percentual adicionado de Argilominerais expansíveis (Bentonita)	0%
			10%
			20%
			30%
Presença de Argilominerais expansíveis	Areia Padrão	Percentual adicionado de Argilominerais expansíveis (Bentonita)	0%
			10%
			20%
			30%
Presença de íons dissolvidos na água de umedecimento	Solo Natural extraído da profundidade 2m adicionado de 10% de Bentonita	Sal Dissolvido	H <sub>2</sub> O (pura)
			CaCH <sub>3</sub>
			KCl
			CuSO <sub>4</sub>
Presença de íons dissolvidos na água de umedecimento	Areia Padrão adicionado de 20% de Bentonita	Sal Dissolvido	H <sub>2</sub> O (pura)
			CaCH <sub>3</sub>
			KCl
			CuSO <sub>4</sub>
Energia de Compactação	Solo Natural extraído da profundidade 2m adicionado de 10% de Bentonita	Energia de compactação	Proctor Normal
			Intermediária
			Modificada

As fotos capturadas foram transferidas para o computador onde são analisadas. De forma simplificada, o programa, usa uma interface gráfica para importar imagens que foram tratadas por diferentes técnicas que permitiram a extração de dados geométricos das fissuras representadas. Os algoritmos usados serão apresentados nos capítulos referentes à parte computacional, onde as técnicas foram detalhadas em cada uma das etapas.

A interface gráfica do programa está representada na Figura 3.5, no qual uma imagem é inserida e os dados de aberturas e coeficientes de fissuração são extraídos.

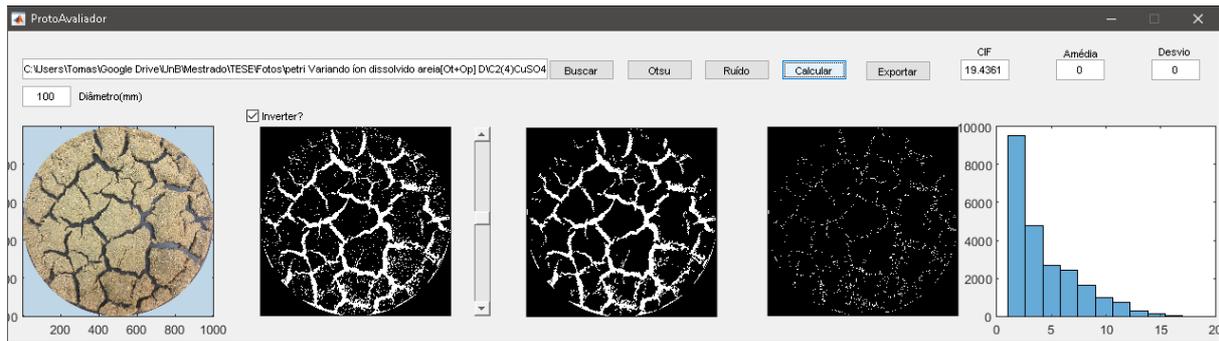


Figura 3.5 – Interface ou GUI do programa de análise de imagens.

### 3.3 COMPACTAÇÃO, GRANULOMETRIA E PERMEABILIDADE

#### 3.3.1 COMPACTAÇÃO

A etapa de fissuração em menor escala permitiu a definição do material que seria usado na etapa de infiltração em um meio fissurado. Com o material e suas proporções definidas, foi feita a determinação de propriedades relevante para os ensaios.

A preparação do material para a compactação se deu em acordo com o processo descrito no Item 4 da NBR 6457 (ABNT, 2016). A amostra foi seca ao ar com ação conjunta das lâmpadas de infravermelho até que houvesse apenas sua umidade higroscópica. O solo seco foi então destorroado e homogeneizado utilizando o almofariz e a mão de gral posteriormente passando o mesmo através da peneira de abertura de 4,8 mm. Embora o solo puro aparentasse uma textura muito grossa, como representado na Figura 3.6, após o destorroamento notou-se que os grãos maiores era torrões compostos inteiramente de um solo fino. Não houve material retido na referida peneira e, portanto, optou-se por usar o cilindro pequeno para a compactação dinâmica.



Figura 3.6 – Material em estado natural antes do destorroamento.

A NBR 6457 (ABNT, 2016) não descreve o processo para a preparação de materiais compostos de diferentes parcelas. Entretanto, repetiu-se o processo usado anteriormente e preconizado na norma para solo puro, somente substituindo o solo natural pela mistura de solo com a adição de 10% de bentonita em massa seca. Ambas as partes, solo natural e bentonita, foram misturadas em estado seco ao ar livre e sob a ação das lâmpadas de infravermelho.

As duas parcelas secas foram misturadas manualmente em uma bandeja usando uma espátula até que não houvesse diferença visível entre as duas partes. O material ainda seco foi transferido para um saco reforçado de poliéster que por sua vez foi agitado manualmente como uma etapa secundária de homogeneização da mistura por um período de 5 minutos. As duas parcelas secas componentes da mistura, solo natural e bentonita estão representados na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Solo puro, destorroado à direita e bentonita à esquerda.

Terminada essa homogeneização, o material seco foi dividido sacos individuais para a preparação das amostras nos diferentes teores de umidade correspondentes a cada um dos pontos das curvas de compactação. A cada um dos mesmos foi adicionada água nas quantidades calculadas de forma a atingir as umidades sugeridas pela norma. O processo anterior se repetiu tanto para o solo puro quanto para as misturas.

A compactação foi executada em acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016), para as energias Proctor normal e modificada. As curvas de compactação foram obtidas avaliando duas combinações de materiais, solo puro e mistura do mesmo com 10% de bentonita nas duas energias

A partir da compactação convencional foi calculada a quantidade de solo a ser compactado na caixa de fissuração utilizada na etapa de ressecamento e infiltração em maior

escala. Com a quantidade de material a ser compactado definida, foi também feita a equivalência de golpes para o soquete usado na compactação com maior volume de solo.

### **3.3.2 GRANULOMETRIA**

A granulometria foi feita por meio da técnica descrita na NBR 7181 (ABNT, 2016). Foram selecionadas para a avaliação da granulometria a bentonita pura a ser usada, o solo puro extraído do campo e o material composto com 10% em massa seca de bentonita.

A granulometria foi executada como descrito na referida norma, em duas etapas: uma referente ao peneiramento do material e a outra executada por sedimentação. Com a junção das duas etapas, pode-se avaliar se há uma consistência no material misto de solo e bentonita, sendo que as parcelas finas do solo natural e da bentonita deveriam aparecer proporcionalmente nos resultados da sedimentação do material misto.

A bentonita já havia sido previamente caracterizada e descrita no trabalho de Gutierrez (2015) e, portanto, nessa etapa foram usados os resultados obtidos por esta dissertação como ferramenta de avaliação da qualidade da mistura. Caso o material tivesse sido bem homogeneizado, deveria haver uma proporcionalidade das granulometrias do solo natural e da bentonita adicionada na curva granulométrica característica da mistura.

É importante comentar que foi necessário modificar a quantidade de água usada em uma das etapas para avaliar a sedimentação da bentonita. A NBR 7181 (ABNT, 2016), tópico 4.3.2 recomenda a adição de 125 cm<sup>3</sup> de solução defloculante em um béquer a uma quantidade definida do solo a ser avaliado. No entanto, a bentonita absorveu toda a solução adicionada, tornando-se uma massa rija e muito coesa. Foi então adicionado mais 125 cm<sup>3</sup> da solução, na mesma concentração, misturando-se vigorosamente para que a mesma pudesse ser transferida para os dispersores mecânicos.

É importante reiterar nesse ponto que essa bentonita, devido à suas propriedades tixotrópicas e potencial de expansão não produziu uma solução à qual poderia se aplicar a lei de Stokes diretamente. Mas para se manter o rigor do método entre as misturas e solos avaliados, o procedimento foi executado da mesma forma que o solo natural e a mistura.

Com exceção da quantidade de solução usada, todas as outras etapas foram executadas em acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016).

### 3.3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E BENTONITA

Ambos materiais usados para o ensaio já haviam sido caracterizados nos trabalhos de Gutierrez (2015) e Burgos (2016). Foi então somente avaliada a granulometria do solo puro, da bentonita e da mistura para usar esses dados como parâmetro comparativo entre os resultados destes trabalhos anteriores com os materiais usados.

Burgos (2016) avaliou em sua dissertação os limites de liquidez e plasticidade, a massa específica dos grãos, massa específica aparente, granulometria e mineralogia para cada uma das profundidades avaliadas.

A partir das tabelas com a caracterização de Burgos (2016), foi feito um diagrama representando todos os dados para as profundidades avaliadas para o estudo. Esse diagrama está representado na Figura 3.8

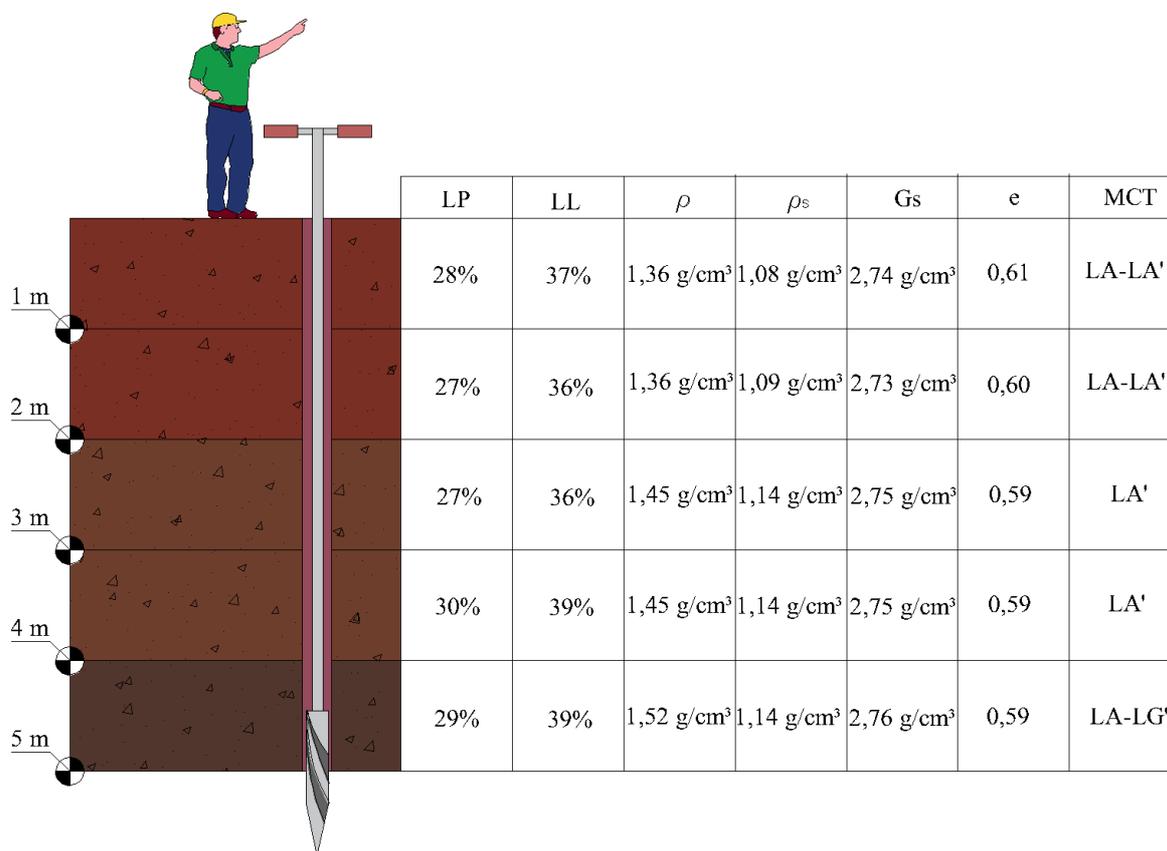


Figura 3.8 – Representação de todos os dados característicos do solo, sendo LL limite de liquidez, LP limite de plasticidade,  $\rho$  peso aparente,  $\rho_s$  peso aparente seco, Gs massa específica dos grãos, e MCT a sua classificação em acordo com a metodologia MCT.

O solo coletado do campus experimental apresentava um intemperismo alto ao longo do seu perfil, com uma mineralogia derivada da formação de argilominerais estáveis e instáveis.

No entanto apresentava limites de plasticidade e liquidez baixos em relação à sua origem tropical como resultado do equilíbrio dos argilominerais com óxidos e hidróxido (BURGOS, 2016).

Ocorreu um acréscimo da massa específica dos em acordo com a profundidade, fenômeno associado à sedimentação e presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio nas maiores profundidades. A massa específica natural  $\rho$ , aumentou ao longo da profundidade e a massa específica  $\rho_s$  também aumentou com a profundidade mas com uma taxa menor.

Na sua dissertação, Burgos (2016) sugere que o melhor sistema de classificação para esse solo seja o SPT, devido ao seu grau de intemperismo. O solo ao longo do perfil na região avaliada alterava-se ao longo da profundidade, sendo nos dois primeiros metros uma areia laterítica (LA), para então um solo laterítico arenoso (LA') nas profundidades de 3 e 4 metros e aos 5 metros, uma argila laterítica.

A bentonita usada foi fornecida pela empresa Soleminas Indústria e Comércio de Minerais Ltda, no estado da Paraíba. A bentonita é uma mistura de argilas impuras com uma granulometria muito fina. A principal componente é a Montmorilonita (60% a 80%), ocasionalmente contendo outras argilas em diferentes proporções (ilita e caulinita). Pode também haver a presença de outros minerais como quartzo, feldspato, calcita, pirita e ferro, que impõem características específicas de plasticidade e resistência (GUTIERREZ, 2015).

O íon associado à bentonita é muito importante e as principais variantes são a bentonita cálcica e a sódica. A sódica tem uma natureza muito viscosa que expande muito quando absorve água, apresentando um elevado grau de contração uma tendência a fraturar-se ao longo de processos de trocas térmicas (HUSE, 2007).

A bentonita sódica usada possui uma granulometria inteiramente fina com (argila 86,6%, silte 13% e areia fina 0,4%), apresentando valor de condutividade hidráulica de  $1 \times 10^{-11}$  m/s. O valor da densidade real dos grãos é 2,78 apresentando limites de liquidez de 50,56% e de plasticidade de 46,3% (HUSE, 2007).

### **3.3.4 ENSAIO DE PERMEABILIDADE A CARGA VARIÁVEL**

O ensaio realizado possui o propósito de determinar o coeficiente de permeabilidade a carga variável de um solo argiloso, percolando água em regime de escoamento laminar através solo. Esses valores de permeabilidade serão usados na etapa computacional como resultados da parcela de solo não fissurado pelo qual a água deve percolar.

No ensaio de permeabilidade a carga variável, medem-se os valores de carga hidráulica ( $h$ ) obtidos para diversos valores de tempo decorrido desde o início do ensaio. São anotados os valores da temperatura quando da efetuação de cada medida. O coeficiente de permeabilidade dos solos é então calculado fazendo-se uso da lei da Darcy.

A NBR 14545 (ABNT, 2000) descreve dois métodos para a realização deste ensaio. O método A que utiliza contrapressão e o método B, o qual é conduzido sem a contrapressão. Na realização deste ensaio foi usado o método B sem a aplicação de contrapressão.

A única modificação do ensaio foi o uso de areia padrão após o papel filtro no lugar de pedra porosa. Assumiu-se que a mistura de solo natural e bentonita avaliada não seria afetada por ter permeabilidade muito menor que a areia padrão.

## **3.4 FISSURAÇÃO E INFILTRAÇÃO**

Com a determinação da curva de compactação característica do solo e mistura pode-se compactar a camada em maior escala com a mesma energia. Essa camada compactada foi então submetida à exposição de um grupo de lâmpadas de infravermelho para o ressecamento e depois saturadas, em ciclos análogos ao da fissuração nas placas de Petri.

A proposta de infiltração em meio fissurado é estruturalmente análoga à descrita em Costa (2015), mas com uma tampa selante para evitar a perda de água durante a avaliação da percolação da mesma. No capítulo da etapa computacional será descrito porque que a condição de continuidade da água dentro do sistema é essencial para a simulação.

A caixa onde a camada de solo seria compactada tinha dimensões de base iguais a 50 por 50 cm e uma altura de 30 cm com uma peça de vazão na base, para permitir a saída da água infiltrada. O diagrama das dimensões da caixa e tampa estão apresentados na Figura 3.9, sendo uma em planta e outra em perspectiva.

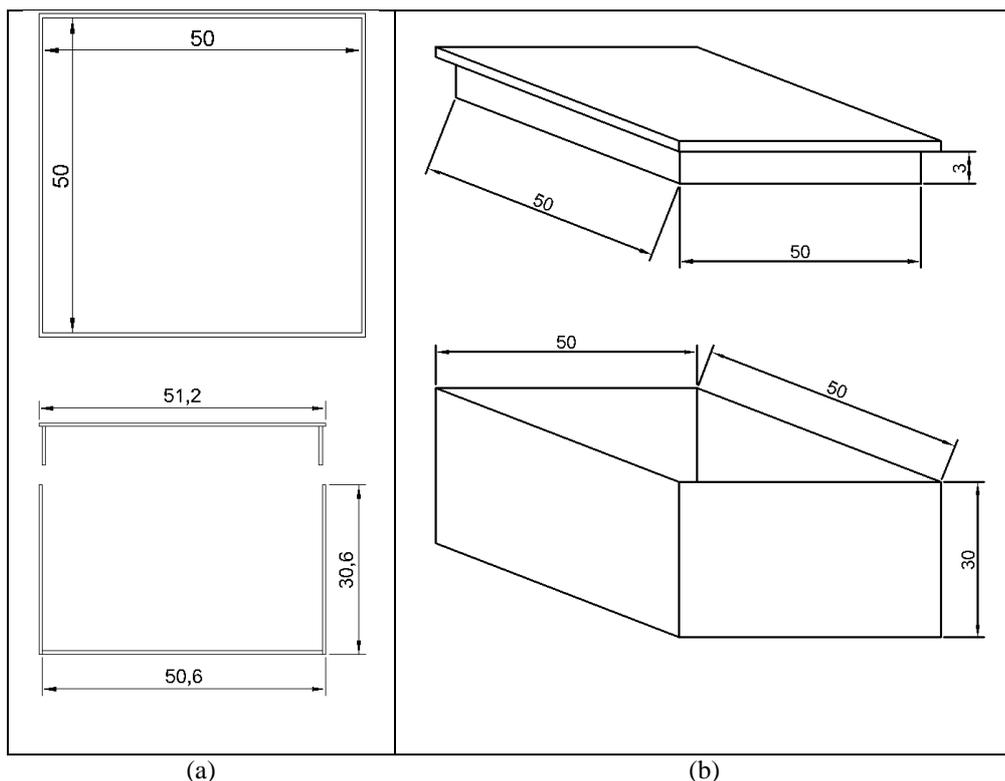


Figura 3.9 – Dimensões da caixa, (a) em planta e (b) em perspectiva

A caixa foi construída a partir de uma única placa de poliestireno rígido de dimensões 2,00 x 1,00 m que foi serrada em peças individuais para posterior montagem. Cada uma das faces da caixa foi unida a outra inicialmente com o uso de cola específica para poliestireno rígido.

Com as faces unidas, a caixa foi reforçada externamente com um esqueleto feito de perfis de alumínio fixados às placas por rebites. Cada rebite foi individualmente coberto com resina epóxi para evitar que houvesse perda de água para o meio externo.

Internamente, a caixa foi inteiramente coberta com uma camada fina de fibra de vidro e sua respectiva resina. Por fim, foi aplicada uma demão de impermeabilizante asfáltico interna e externamente para garantir que a perda de água fosse mínima. Nas arestas superiores da caixa foram colados perfis de borracha flexível para encaixar a tampa e ajudar na vedação.

A caixa era disposta sobre um sistema de roletes para pudesse ser movimentada quando necessário. Esse sistema era constituído por uma base de madeira que foi cortada, impermeabilizada e perfurada para que os parafusos pudessem ser instalados encaixando os perfis metálicos. A Figura 3.10 apresenta a caixa em diferentes estados de sua construção e uso.



(a)

(b)

Figura 3.10 – Caixa, em (a) com o esqueleto de alumínio e borrachas e (b) com os perfis de aço, tampa e impermeabilizante asfáltico preta.

A mistura era preparada previamente ao misturar o solo puro com 10% de sua massa em bentonita, ambos secos em estufa. Os mesmos eram misturados e homogeneizados em uma bandeja com a umidade ótima da mistura, obtido do ensaio de compactação. A mistura úmida era então transferida para uma embalagem plástica e levado para a câmara úmida.

A Figura 3.11 representa as partes da caixa onde a camada foi compactada e os materiais complementares usados na ordem.

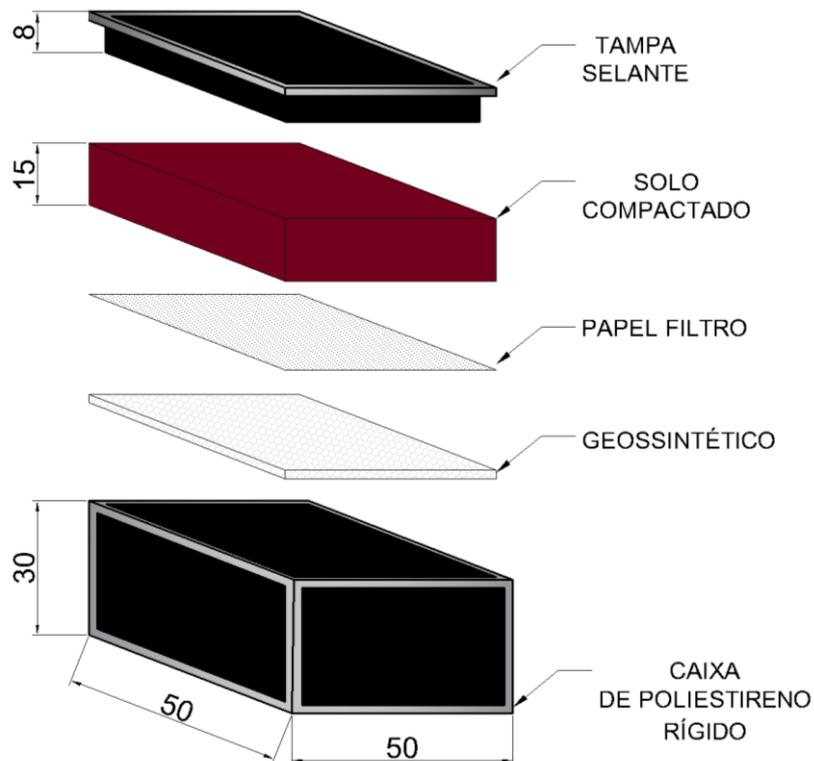


Figura 3.11 – Representação da caixa com o material a ser fissurado.

A NBR 7182 (ABNT, 2016) recomenda um período de homogeneização de 24 horas na câmara úmida. No entanto a mistura seca de solo e bentonita, quando umidificada tem uma tendência à formação de torrões macios, prejudicando a homogeneização. As amostras eram então retiradas após 6 horas e dentro da embalagem eram movimentadas para quebrar os maiores torrões. Após 24h, o material era retirado, os torrões eram quebrados, a umidade era tirada, e o material era retornado para a câmara úmida para mais 24h.

Quando o material estava pronto, o mesmo era transferido para a caixa onde era realizada a compactação do mesmo. Na caixa, eram dispostos o geossintético no fundo, sobre o mesmo, uma folha de papel filtro de dimensões 50x50 para evitar a colmatação de material no geossintético e por fim o solo na umidade ótima é distribuído sobre o papel para sua compactação.

A compactação foi feita com a energia normal e foi calculada a quantidade de golpes do soquete necessários para se atingir a densidade de energia de Proctor determinada. O soquete utilizado consistia em uma peça de concreto retangular de massa 6,35 kg que caía de uma altura de 50 cm. O soquete para a compactação está representado na Figura 3.12 em uma fotografia do mesmo e um diagrama com os dados relevantes para a compactação

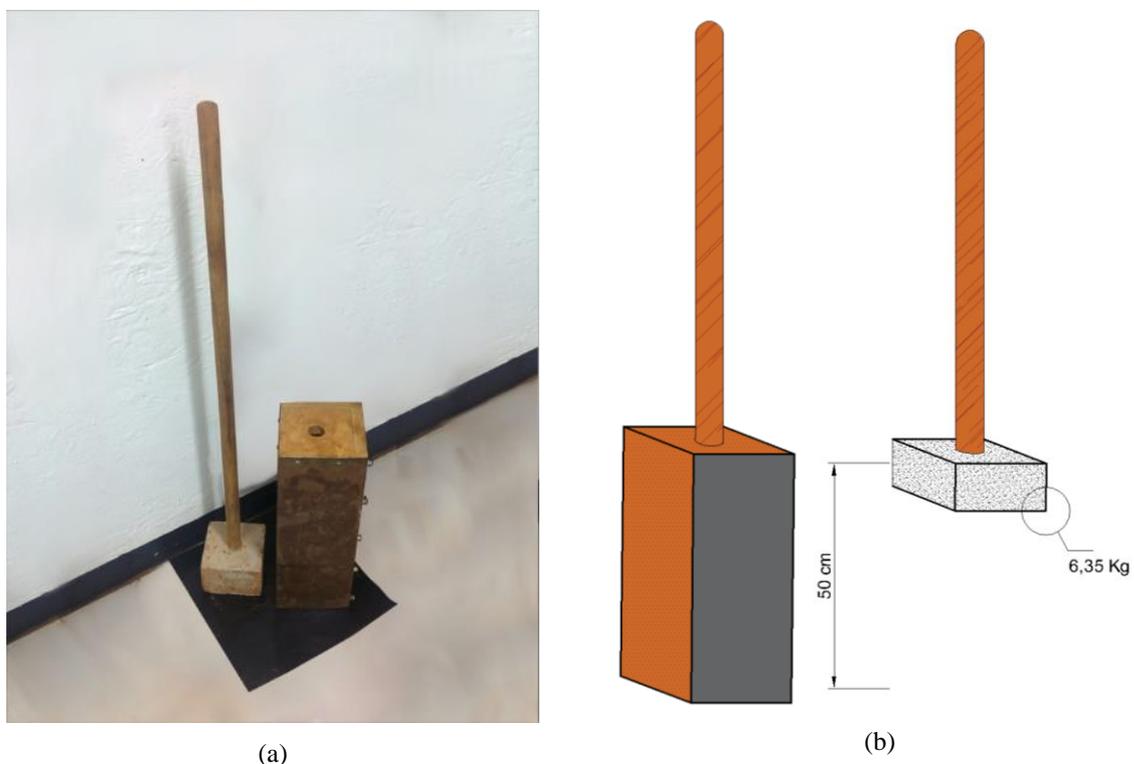


Figura 3.12 – Fotografia do soquete em (a) e em (b) os dados de altura de queda e massa do soquete e camisa.

A mistura foi compactada diretamente na caixa no caso da energia Proctor normal em três camadas de 5cm. Para esse número de camadas e com essas características do soquete, o número de golpes por camada era de 75. Esse valor teve de ser acrescido durante a compactação pelo fato das camadas não terem atingido a espessura esperada possivelmente pela absorção da energia pela caixa em si.

Ao final, a energia era Proctor normal, mas como as condições de compactação na caixa diferentes das normatizadas, foi usado junto da energia equivalente um controle da espessura da camada para verificar quanto da energia estava sendo transferida para o solo. A Figura a 3.13 representa a compactação das camadas na caixa em (a) executado no laboratório e (b) apresenta a superfície do solo já compactado.



(a)

(b)

Figura 3.13 – Execução da compactação do material na caixa em (a) e a superfície compactada em (b).

Após a primeira compactação, o solo sem sofrer o processo de saturação foi exposto ao conjunto de lâmpadas que transfere energia para a amostra na forma de calor e luz. O material foi exposto a essas lâmpadas por um período de 24 horas, calculados em acordo com a energia equivalente a um dia de insolação tropical, para que houvesse um ressecamento e fissuração inicial, conforme será descrito a seguir.

A posição da caixa em relação às lâmpadas de infravermelho foi determinada para que quantidade de energia recebida pela camada compactada em cada ciclo fosse a mesma. A Figura 3.14 representa três visualizações da etapa de ressecamento em perspectiva, vista lateral e uma amostra.

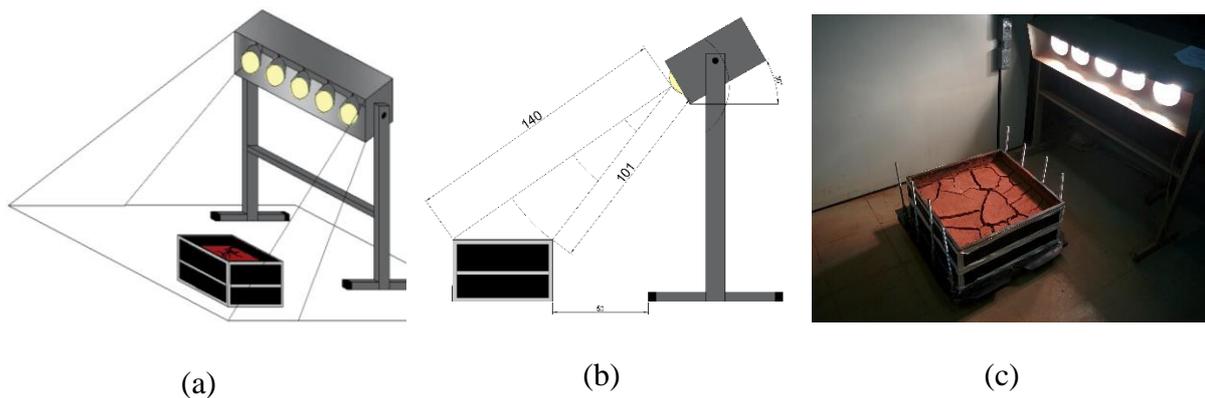
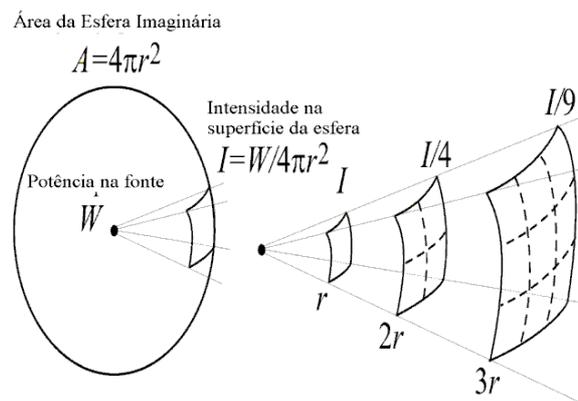


Figura 3.14 – Ressecamento do solo sob ação das lâmpadas, onde (a) é o diagrama em perspectiva, (b) o mesmo em vista lateral e (c) uma amostra após um ciclo de saturação exposto às lâmpadas.

A energia transferida das lâmpadas para a amostra na caixa depende da potência das lâmpadas, da quantidade das mesmas e da posição e dimensão da área que recebe a energia. Para estimar essa energia térmica recebida foi usada a lei do quadrado da distância, que ocorre por consequência da conservação de energia. A lei de conservação da energia determina que a potência tem que ser distribuída ao longo da superfície da frente de onda. A Figura 3.15 representa a lei do quadrado da distância para uma fonte de energia esférica, uma aproximação da energia emitida pela lâmpada.



Fonte: [https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Spherical\\_Waves\\_Point\\_Source.html](https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Spherical_Waves_Point_Source.html)  
 Figura 3.15 – Queda da intensidade ao longo da superfície esférica

Essa estimativa representa a quantidade de energia, na forma de radiação infravermelha que atinge a amostra. Para determinar a intensidade com a qual o infravermelho atinge a superfície do solo, determinou-se a distância entre cada lâmpada individual e os cantos da caixa. Esse valor de distância representa o resultado da hipotenusa entre a altura da lâmpada e a distância plana entre a projeção da mesma e cada canto da caixa.

A representação da medida da distância plana entre os cantos das caixas e a posição de cada lâmpada individual está representado na Figura 3.16

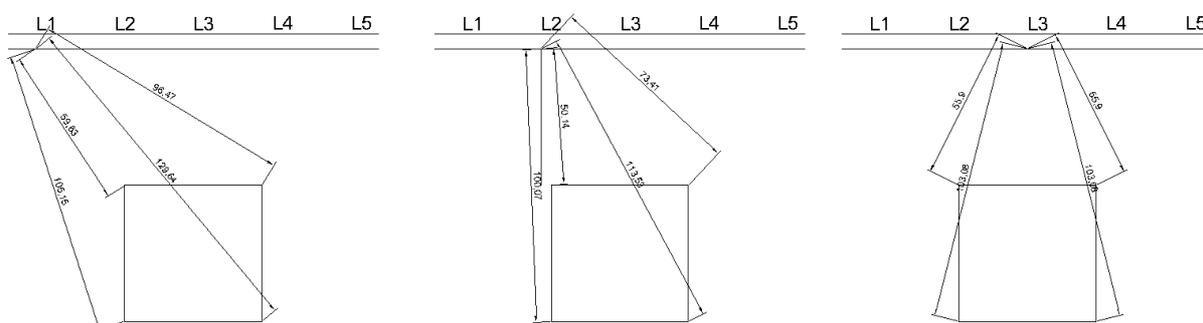


Figura 3.16 – Distâncias planas entre cada lâmpada e os cantos da caixa.

Com o valor da distância calculada em cada um dos quatro cantos, determinou-se o valor da intensidade de radiação que chegava em cada canto a partir da fonte. A estimativa da potência na área foi feita a partir da média dos valores da energia estimada em cada canto individualmente. A Tabela 3.2 representa as distâncias entre cada uma das lâmpadas e os cantos da caixa usada na compactação e a intensidade em cada um desses pontos junto com a média de energia recebida por metro quadrado por dia.

Tabela 3.2 – Valores da intensidade do infravermelho e energia total.

Id. Lâmpada	Canto da caixa	Altura Vertical (cm)	Diag. Horizontal (cm)	Diag. Esférica (cm)	Intensidade (w/m <sup>2</sup> )	Média (w)	Total (kWh/m <sup>2</sup> /dia)
L1	C1	130,0	59,6	143,0	7,8	1,5	2,9
	C2	130,0	96,5	161,9	6,1		
	C3	130,0	129,6	183,6	4,7		
	C4	130,0	105,2	167,2	5,7		
L2	C1	130,0	50,1	139,3	8,2	1,7	
	C2	130,0	73,4	149,3	7,1		
	C3	130,0	113,5	172,6	5,3		
	C4	130,0	100,7	164,4	5,9		
L3	C1	130,0	55,9	141,5	7,9	1,7	
	C2	130,0	55,9	141,5	7,9		
	C3	130,0	103,1	165,9	5,8		
	C4	130,0	103,1	165,9	5,8		
L4	C1	130,0	50,1	139,3	8,2	1,7	
	C2	130,0	73,4	149,3	7,1		
	C3	130,0	113,5	172,6	5,3		
	C4	130,0	100,7	164,4	5,9		
L5	C1	130,0	59,6	143,0	7,8	1,5	
	C2	130,0	96,5	161,9	6,1		
	C3	130,0	129,6	183,6	4,7		
	C4	130,0	105,2	167,2	5,7		

É importante comentar que o resultado de 2,9 kWh/m<sup>2</sup>/dia é um valor muito inferior aos encontrados nas regiões dos trópicos, onde os valores oscilam entre 5,0 a 7,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia, em acordo com os mapas produzidos por Solargis (2013).

O dia usado para essa avaliação de energia de insolação diária foi um dia com 12 horas de exposição, sendo que para atingir o valor natural, o solo foi então submetido a um período de 24 horas de exposição à luz, totalizando 5,8 kWh/m<sup>2</sup>/dia, valor mais próximo dos encontrados nos trópicos

A taxa com que o solo absorve o calor emitido pelas lâmpadas, dependerá do albedo da superfície e calor específico das amostras. Essas propriedades variam ao longo do ressecamento, devido à perda de água e fissuração do solo.

O solo compactado foi exposto às lâmpadas por 24 horas e sofreu o ressecamento ao longo desse período. Após esse primeiro ciclo de ressecamento o material foi submetido à primeira etapa de saturação. A água utilizada nesse processo foi a água destilada obtida a partir de um destilador localizado no próprio laboratório, *in loco*, foi adicionada à caixa em uma quantidade definida de 20 litros, para que a amostra fosse saturada.

Para que não houvesse a destruição ou erosão localizada do solo, a água foi inicialmente disposta sobre uma placa com furos, simulando gotas individuais que umedeciam o solo. Uma representação dessa placa em perspectiva está apresentada na Figura 3.17 junto com o seu funcionamento dentro da caixa de poliestireno.

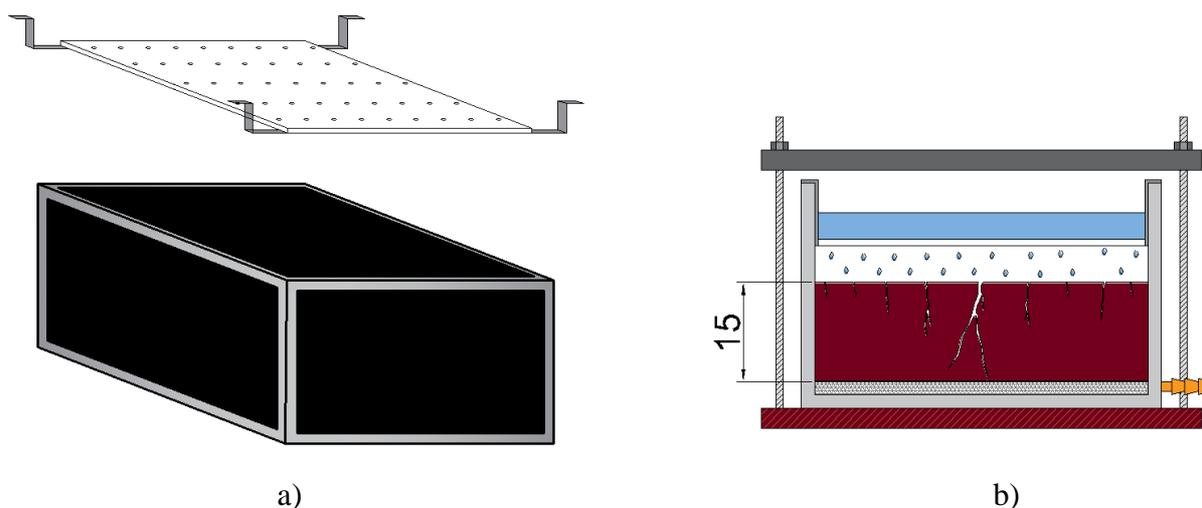


Figura 3.17 – Representação da placa perfurada em (a) e o processo de molhagem por gotejamento da água sobre a camada compactada em (b).

Quando toda a água foi transferida para o sistema, uma tampa selante com borrachas nas bordas foi usada para vedar a caixa. Essa tampa é presa à caixa por uma estrutura externa composta por uma base que se prende ao conjunto com oito parafusos que são presos a quatro perfis de aço, travando com um sistema de roscas a tampa em sua posição.

De forma análoga ao ensaio de permeabilidade realizado nos corpos de prova, o material foi considerado saturado quando houve vazão de água no espigão inferior, consequência de haver passagem de água através da camada compactada. Durante o primeiro ciclo de saturação, foram necessários 4 dias para que houvesse a aparente saturação da amostra ressecada. A Figura 3.18 representa o solo saturado, com uma lâmina de água sobre a amostra e as fissuras com o efeito o acúmulo da bentonita nas mesmas.

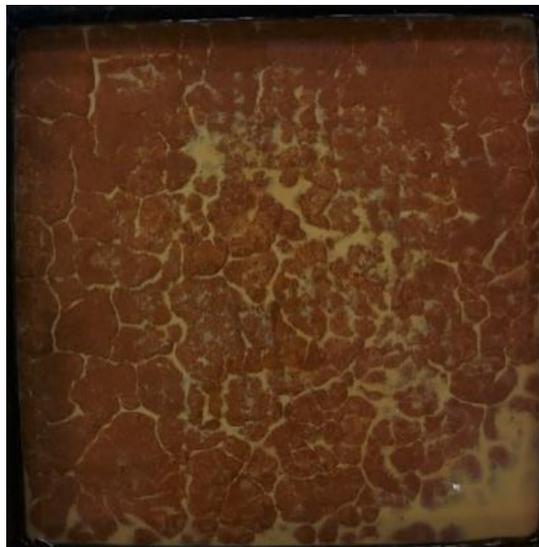


Figura 3.18 – Mistura fissurada após a saturação, com o efeito da suspensão das partículas de bentonita.

Com o solo saturado, a caixa foi transferida novamente para sua posição sob as lâmpadas para que houvesse o segundo ciclo de ressecamento e formação das fissuras. Na situação em que havia uma lâmina d'água sobre a superfície do solo saturado, a mesma era removida com cuidado não perturbar e induzir fissuras que não fossem associadas à perda de água do material compactado pelo ressecamento.

O processo de saturação e ressecamento foi repetido por três vezes até que houvesse a condição de estabilidade das fissuras, de forma análoga ao descrito por Costa (2015). Após o solo ter atingido essa estabilidade de fissuras, as profundidades foram estimadas usando uma haste esbelta de aço até que o mesmo atingisse a matriz de solo não fissurada, processo detalhado no capítulo referente à moldagem.

Após essa medição final era iniciado o ensaio de infiltração. Na caixa contendo a camada de solo fissurado foi adicionada uma quantidade de água definida de 20 l. Ressalta-se a importância do controle da quantidade de água adicionada ao sistema, para que não houvesse a perda de água para o ambiente.

Com a conservação da quantidade de água no sistema, mediu-se o volume que infiltrou através do solo fissurado em intervalos definidos. Após cada intervalo o volume percolado não fazia mais parte do volume interno da lâmina de água, que por consequência estava mais baixa. Com a redução do nível de água interno, reduzia-se também o gradiente hidráulico que por sua vez alterava o volume percolado na próxima iteração da medida.

A condição de contínua mudança da lâmina de água foi a base da simulação usada para comparar os dados experimentais com algumas correlações de modelos. A Figura 3.19 representa como a conservação da quantidade de água no sistema foi usada para avaliar a infiltração.

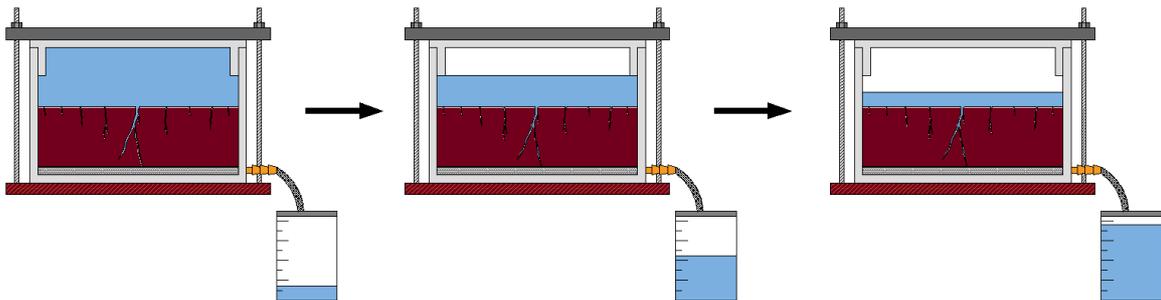


Figura 3.19 – Continuidade do volume de água no sistema.

### 3.5 MODELAGEM DA FISSURAS

Para comparar os resultados das relações de Chertkov (1998) e as profundidades do solo fissurado foi feita uma modelagem das fissuras em uma amostra que foi avaliada na etapa de percolação. Foram feitos por dois processos: aferição direta ou manual e moldagem das fissuras.

As duas técnicas diferentes, uma de medição das profundidades nas aberturas com uma haste de aço e outra com a moldagem das fissuras por uma “extrusão negativa” tinham o propósito de extrair a

A profundidade das fissuras foi determinada ao final do quarto ciclo com uma pequena haste de aço. A Figura 3.20 representa a posição das aferições e como elas foram feitas.

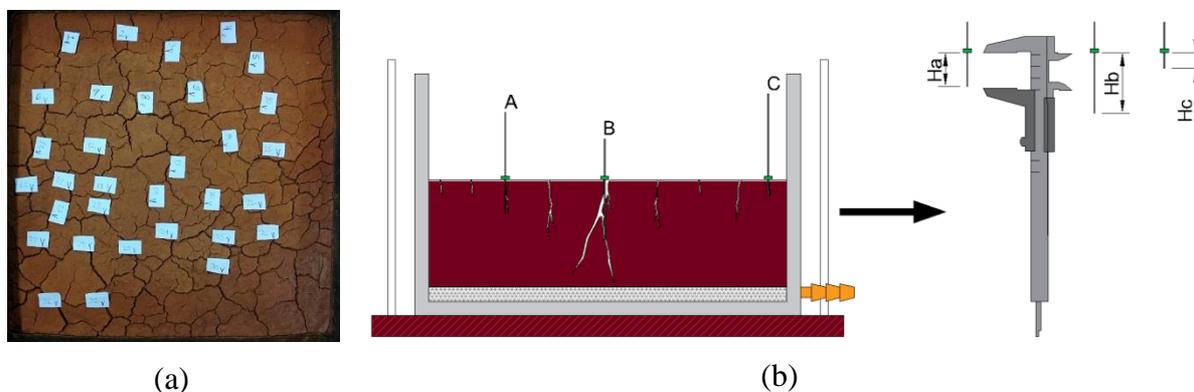


Figura 3.20 – Em (a) as posições na qual os fios de aço foram usados e (b) como as medidas das profundidades foram tomadas.

Esse método de medição manual não gera bons resultados pois existem uma série de dificuldades para a medição de profundidade de forma direta:

- ❖ O solo é perturbado pela passagem do fio de aço e o material erodido pode acumular-se no fundo abertura, reduzindo sua profundidade;
- ❖ Quanto maior a tortuosidade interna da fissura, menor vai ser a precisão da medição da profundidade
- ❖ A disposição de um fio fino de aço bem no centro da fissura é uma tarefa imprecisa e pouco confiável.

O segundo processo para a produção das fissuras era a partir de um molde tridimensional feito com um material cimentício ou uma resina despejada nas fissuras. Entretanto este procedimento apresentou uma série de dificuldades, entre as quais a seleção do material mais adequado para a então reprodução das fissuras.

Foram considerados e avaliados muitos materiais em pequena escala, para então selecionar qual seria usado nas fissuras da caixa. A técnica original baseou-se nos procedimentos de modelagem de colônias de formigas, onde as mesmas são moldadas ao preencher a colônia com alumínio líquido que solidificasse gerando um modelo tridimensional.

A primeira dificuldade encontrada no processo de moldagem das fissuras em um material que tenha argila expansiva é a seleção do material empregado na reprodução das formas das fissuras.

O material precisa ter baixa viscosidade para penetrar todas as fissuras, precisa ter cura rápida ou uma hidratação que não usasse água para evitar a troca com a mistura compactada e subsequente hidratação do solo.

Para avaliar qual deveria ser o material usado, foram compactados vários corpos de prova, com a mistura em pequena escala (5 cm de diâmetro) e foram ressecados em estufa, gerando fissuras bastante expressivas. Os diferentes materiais sugeridas para a formação dos moldes foram então testados nestes tipos de amostras.

A primeira proposta de moldagens usava materiais cujo processo de hidratação e subsequente cura dependiam de água. As combinações avaliadas nesse grupo de materiais eram dois traços de SikaGrout® e um de gesso-cola. O graute auto adensável, com pega rápida, já vinha de fábrica com aditivos fluidificantes e tinha uma razão graute-água recomendada de 3:1, que foi avaliada. Para o mesmo graute foi também usado um traço de 4:1, menos hidratado, e para o gesso-cola somente foi usado o valor recomendado de 2:1 do gesso em relação à água.

Essas soluções foram todas problemáticas, pois devido à pega relativamente lenta do graute (4:1), o mesmo trocou água do solo circundante, reduzindo as fissuras e perdendo detalhes da geometria. O graute mais fluido com traço de 3:1 penetrou nas fissuras e nos maiores poros do solo, grudando o molde ao próprio solo, impedindo a retirada do molde. O gesso-cola produziu um ótimo molde, detalhando até as partes mais esbeltas das fissuras, mas extremamente frágil e suscetível à umidade do ambiente.

A segunda solução proposta foi o uso de uma resina poliéster transparente, que usava MEKP (*Methyl ethyl ketone peroxide*) como catalisador. Como o polímero usado não dependia da água para sua reação, tornou-se um material ideal para evitar a hidratação do solo em torno das fissuras. No entanto, em todas as amostras ocorreu o mesmo problema, a resina penetrava nos poros do solo e embora não deformasse as fissuras de forma sensível, sua cura acontecia grudando o solo ao molde das fissuras, anulando os resultados. Embora tenha sido levantado

como um material ideal, a resina, de baixa viscosidade e tempo de cura de 1 hora não foi capaz de produzir moldes resistentes ou representativos.

Sabendo que os poros do solo estavam sendo preenchido com o material e a matriz de solo estava sendo hidratada deformando as fissuras com ação da água foi usada uma outra técnica na terceira iteração. Repetiu-se os traços usados na primeira iteração, mas “afogando” as amostras em um óleo que possivelmente entraria nos macro poros impedindo a troca de água. Esse mesmo óleo seria expulso das fissuras quando a mistura de graute fluido, de maior densidade fosse despejada. Esse procedimento baseou-se no usado para o concreto em estacas ou tubulões que são mantidos estáveis com lama bentonítica. Todas as amostras obtidas eram bem frágeis e nenhuma sequer manteve as fissuras.

A quarta iteração usava a nata de graute, pois a areia fina havia sido peneirada sobrando somente o aditivo fluidificante e cimento em si. Para superar o problema de entrada nos poros e troca de água foi adicionado um aditivo de pega super rápida (Sika<sup>®</sup> 2), em valores de 10% e 5% da água de hidratação. Todos os traços produziram bons moldes, detalhados e que permitiram que o solo fosse lavado.

A quinta iteração usava a nata de graute nos traços usados na quarta iteração, com a adição de 10% de acelerador de pega, mas dessa vez adicionando 1% ou 2% de laponita<sup>®</sup> em massa na água de hidratação. A laponita<sup>®</sup> é uma argila sintética com uma natureza tixotrópica muito clara, retornando a um estado de gel em pouco tempo após a sua dissolução em água, em concentrações baixas.

Supunha-se que a adição dessa argila sintética ajudaria a manter a forma da fissura quando essa substância entrasse nas fissuras. A mesma demonstrou o comportamento esperado, mantendo a forma das fissuras, mas esse fenômeno impactou negativamente a moldagem, pois a mistura de graute não escoou através de toda profundidade fissurada, tamanha era tendência de a mesma retornar ao estado de gel após a mistura. Os moldes tridimensionais produzidos com esse material mostraram-se imprecisos, ainda que superficialmente tenha sido similar às fissuras, representando somente as fissuras de maior abertura.

Cada uma das misturas das diferentes substâncias usadas para a moldagem está representada na Figura 3.20. Como complemento à Figura 3.20 a Tabela 3.3 identifica individualmente todas as amostras usadas para avaliar o preenchimento das fissuras.

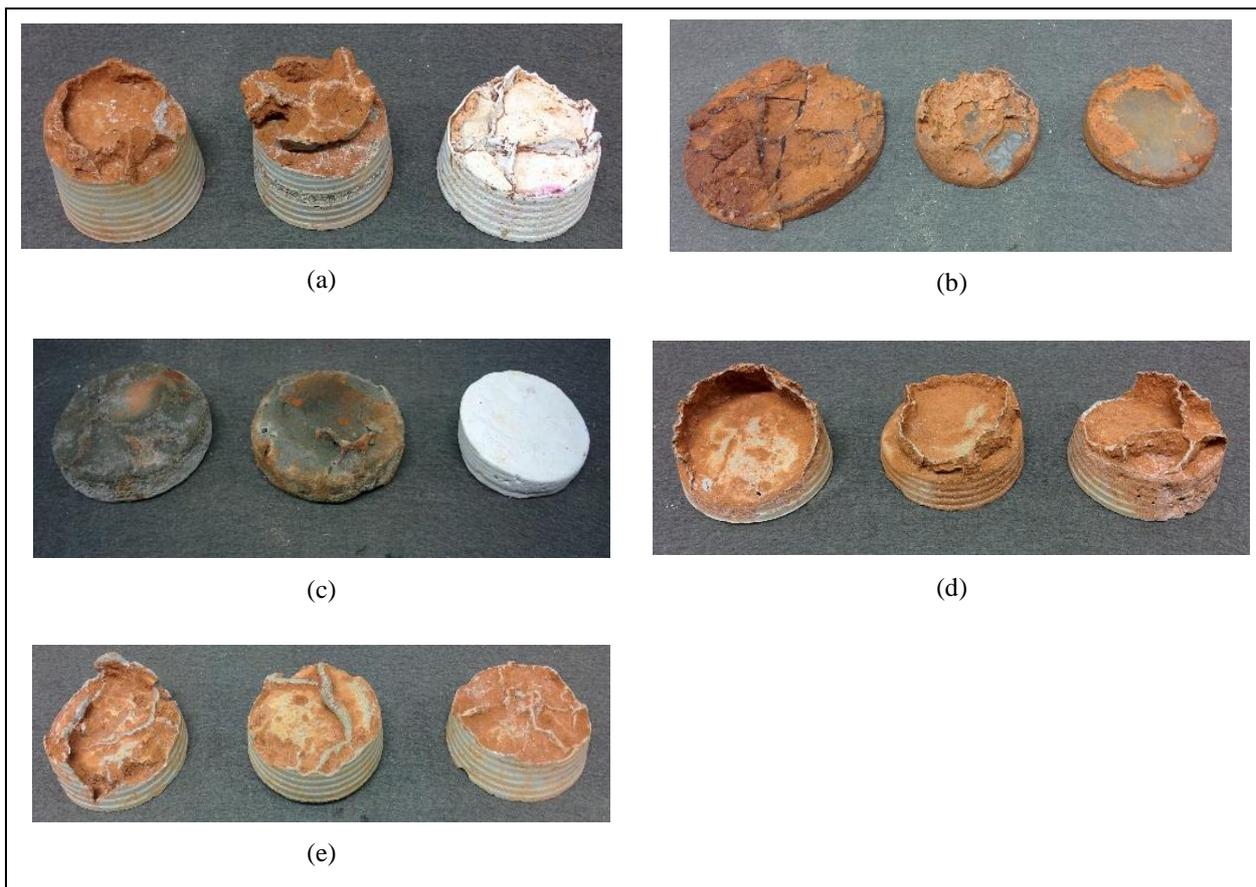


Figura 3.21 – Todos os corpos de prova para as diferentes misturas, sendo em (a) o grupo de materiais hidratados com água em (b) grupo de resinas, (c) grupo de técnica mista, (d) traços diferentes e aditivo e (e) adição de argila sintética.

Tabela 3.3 – Identificação das misturas.

Iteração	Identificação das amostras individuais, da esquerda à direita
(a)	Graute (4:1), Graute (3:1) e gesso (2:1)
(b)	Resinas de poliéster: 1% de MEKP, 2% de MEKP e 2% de MEKP e acetona a 10% da massa.
(c)	Com preenchimento prévio do solo com óleo de baixa viscosidade: Graute (4:1), Graute (3:1) e gesso (2:1)
(d)	Natas de Graute: (4:1) com 10% de aditivo, (3:1) com 5% de aditivo e (3:1) com 10% de aditivo.
(e)	Natas de Graute (4:1) com 10 % de aditivo e 1% de laponita <sup>®</sup> , Graute (3:1) com 10 % de aditivo e 1% de laponita <sup>®</sup> , Graute (3:1) com 10 % de aditivo e 2% de laponita <sup>®</sup> .

Para a moldagem em maior escala foi então selecionada a solução que usava a nata do graute em um traço de (3:1) de nata-água e à água usada na hidratação foi adicionado 10% de aditivo de pega super rápida.

Com a mistura detalhada anteriormente, foi feito uma moldagem das fissuras na placa de Petri, conforme representado na Figura 3.22.



Figura 3.22 – Detalhe do molde produzido com nata de graute e aditivo de pega super rápida.

### 3.6 ANÁLISE DAS IMAGENS

O processo de análise das imagens teve como objetivo transformar imagens capturadas por um dispositivo em uma geometria plana representativa da fissura. Essa geometria é correlacionada com modelos de abertura com calibração de profundidades por Chertkov (1998) e modelos empíricos feitos com as amostras dos ensaios.

A Figura 3.23 representa todas as etapas computacionais desse trabalho, estruturado na forma de um fluxograma lógico

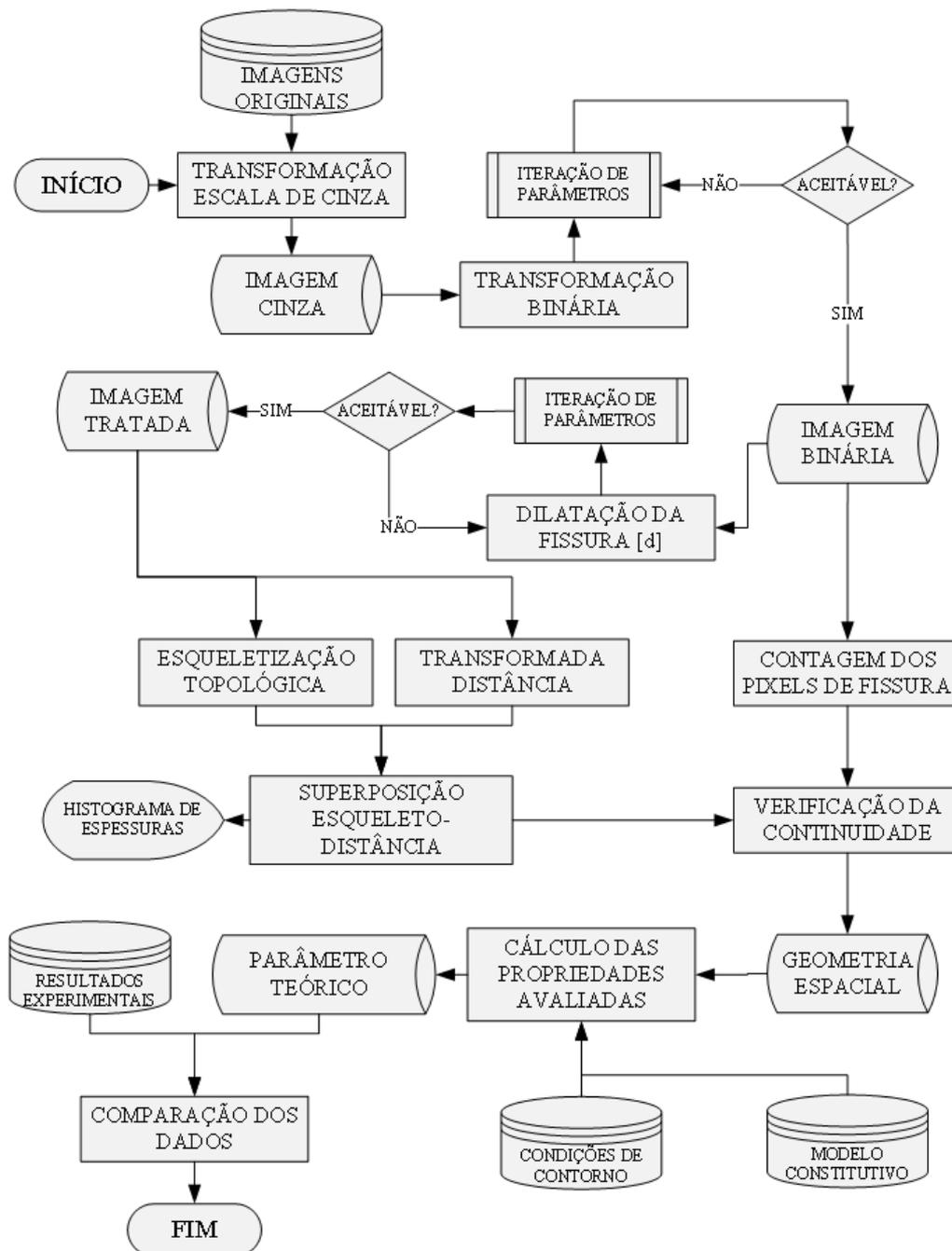


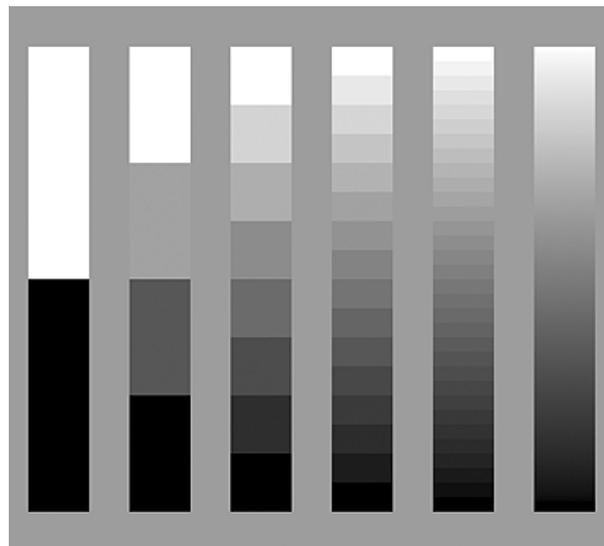
Figura 3.23 – Representação total da etapa computacional.

### 3.6.1 TRANSFORMAÇÃO PARA ESCALA DE CINZA

As imagens originais são capturadas por um sensor IMX179, um módulo produzido pela empresa *mems | cam™*, em resolução original de 3264x2488 *pixels*. As mesmas imagens são transferidas com suas identificações para o computador onde são processadas e analisadas.

Após a importação da imagem colorida para o programa, inicia-se o tratamento da mesma. A primeira etapa é a transformação dos dados em um espaço de cor sRGB para *pixels* em um a escala de cinza.

Uma escala de cinza, ou *grayscale*, é aquela em que cada *pixel* é dado por um único valor extraído da amostragem da figura. A maior parte das escalas de cinza é representada por um canal de 8-bits ou seja, existem  $2^8$  ou 256 tons individuais de cinza. De forma análoga à representação dos canais RGB, o valor de cada pixel na escala de cinza é inteiro, de 0 a 255 ou reais e definidos como um ponto flutuante entre 0 e 1, dentro do programa. A representação da escala de cinza para diferentes número de canais está referido na Figura 3.24.



Fonte: <http://www.theasc.com/magazine/april05/conundrum2/image11.html>

Figura 3.24 – Representação da escala de cinza com diferentes números de canais 1 ,2, 3, 4, 5, e 8 bits

A transformação para uma escala de cinza se dá por duas razões principais: a redução da dimensão do vetor de matrizes que simplifica as operações sobre os dados e a definição do valor do pixel por um único valor que permite a transformação da imagem em uma matriz binária por meio de uma simples aplicação de um limiar ou *threshold* discreto.

A redução da dimensão da matriz implica diretamente em uma perda de dados que não podem ser recuperados sem a imposição de condições de contorno. É, portanto, importante escolher a transformação que preserve os dados relevantes ou de maior interesse para a aplicação da imagem.

Existem várias relações para transformação de imagens coloridas para uma escala de cinza. Para cada espaço de cor vai haver também uma equação que melhor preserve os aspectos relevantes representados implicitamente nos dados das cores.

A transformação para a escala de cinza mantém os dados de luminância que conserva intensidade do brilho da cor refletida. As três cores componentes básicas são transformadas no canal Y de um espaço de cor YUV, especificamente, para o uso dentro do programa.

A comissão internacional em iluminação (CIE, 1926) define luminância, denominada Y (gama), como “a intensidade por unidade de área, pesado ou moderado por uma função de sensibilidade espectral que é característica da visão”. Essa é uma definição técnica que pode ser simplificada por uma analogia simples: luminância pode ser interpretada de como a “intensidade do brilho” da luz, como apresentado por Kerr (2010).

A luminância irá carregar as informações da geometria representada dentro das imagens, por meio de uma graduação dos 256 tons de cinza, sendo que nas fissuras em si, os mesmos serão mais escuros. A transformada de cor para uma escala de cinza baseada em luminância “Y” é descrita por Poynton (1998) e está representada na equação a seguir:

$$Y = 0,2989 \cdot R + 0,5870 \cdot G + 0,1140 \cdot B \quad 3.1$$

Na equação 3.1 os valores de cada uma das matrizes, com as cores componentes vermelho (R), verde (G) e azul (B), são transformadas em um único valor numérico. Esse valor é transferido para uma nova matriz, cujas dimensões são iguais à resolução da imagem original, mas com uma única entrada discreta entre os valores máximos e mínimos da escala de cinza.

Com a imagem transformada em uma matriz de uma única entrada, é possível usar procedimento lógicos para tornar a mesma binária. Uma matriz binária permite uma série de operações sobre a mesma que extraem informações relevantes para o uso dentro do programa.

### 3.6.2 TRANSFORMAÇÃO BINÁRIA

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

A Figura 3.25 representa uma distribuição de valores de pixels em escala de cinza e a disposição de um valor de limite. Abaixo do mesmo, todos os valores serão transformados em preto (0) e acima do mesmo, todos serão transformados em branco (1).

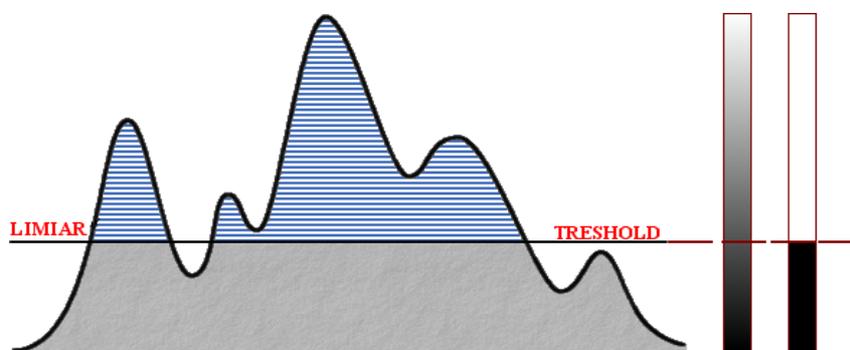


Figura 3.25 – Representação de como um limite separa logicamente um sinal em duas categorias discretas. Adaptado de Scientific Volume Imaging (2016).

Em uma imagem em que haja uma distribuição não-binária ou contínua de tons de cinza o valor do limite pode modificar bastante o resultado da imagem tratada. A Figura 3.26 representa os diferentes resultados de diferentes limiares sobre uma mesma imagem.

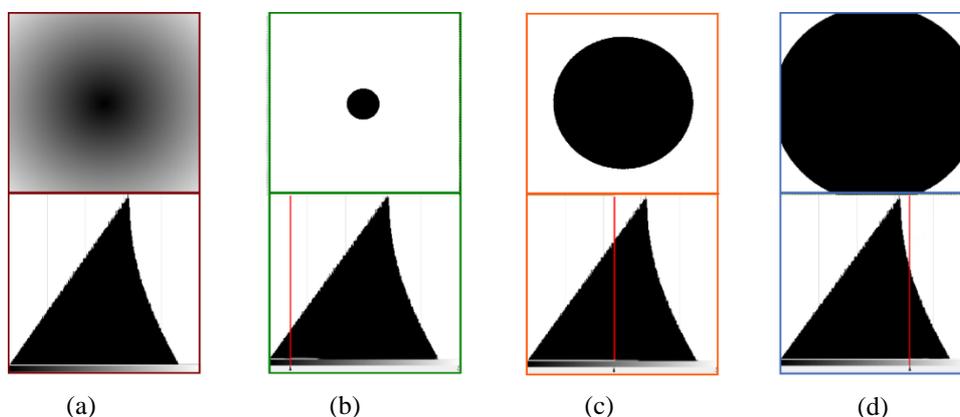


Figura 3.26 – Representação de diferentes valores de *threshold* aplicados a uma mesma imagem (a) sendo que (b) a (d) representam, em ordem crescente, a aplicação de um *threshold* à imagem (a), representado no histograma como uma linha vermelha.

O valor do limite deve ser tal que a geometria representada na figura seja minimamente afetada e ao mesmo tempo, outras propriedades não sejam representadas. É, portanto, melhor que haja um resíduo na imagem que não represente as fissuras do que perder as mesmas. Com essa condição definida é importante que seja descrito então um método que permita que o máximo

O método de *Otsu* pode ser descrito logicamente como um processo que minimiza a variância entre classes dentro de um histograma para maximizar a variância entre classes dessa mesma distribuição. Cada classe possui suas próprias características, ou seja, sua média e desvio-padrão (GAZZIRO, 2013).

Para uma imagem digital  $I$  em uma resolução  $M \times N$  separada em  $L$  tons de cinza pode-se calcular o histograma  $p$  por meio da equação 3.2.

$$p_i = \frac{n_i}{M \cdot N} \quad 3.2$$

Onde  $n_i$  é a quantidade de *pixels* da imagem que possuem a intensidade  $i$ , para um intervalo fechado  $i = 0, 1, \dots, L - 1$ . Por essa condição pode-se afirmar que o total de *pixels* terá de ser igual à soma do número de entradas em cada um dos *bins* do histograma. Essa afirmação pode ser descrita como um somatório dos percentuais totalizando 1, representada na equação 3.3.

$$\sum_{i=0}^{L-1} p_i = 1, \quad p_i \geq 0 \quad 3.3$$

Seja  $k$  o limiar, ou *threshold*, de cinza que particiona o histograma da imagem em duas classes  $C_1$  e  $C_2$ , pode-se afirmar que a primeira e a segunda classes compreendem os pixels cujos níveis de cinza pertencem ao intervalo  $[0, k]$  e  $[k + 1, L - 1]$ , as probabilidades estão representadas nas equações 3.4 e 3.5 onde  $P_1(k)$  é a probabilidade do nível de cinza que ser da classe  $C_1$  e  $P_2(k)$  é a probabilidade do nível de cinza que ser da classe  $C_2$

$$P_1(k) = \sum_{i=0}^k p_i \quad 3.4$$

$$P_2(k) = \sum_{i=k+1}^{L-1} p_i \quad 3.5$$

O Histograma é então aproximado por uma função gaussiana como representado na equação 3.6

$$m_1(k) = \sum_{i=0}^k iP(i|C_1) \quad 3.6$$

À distribuição de dados anterior, representada na equação 3.7 aplica-se a regra de Bayes, cujo resultado está apresentado na equação 3.7.

$$m_1(k) = \sum_{i=0}^k i \frac{P(C_1|i)P(i)}{P(C_1)} \quad 3.7$$

$P(C1) = P1(k)$ ,  $P(i)$  é o próprio  $p_i$  e  $P(C1/i)$  é sempre 1, uma vez que  $i$  está no intervalo de cinza da própria classe  $C1$ . A partir dessa relação pode-se escrever as equações 3.8 e 3.9 para  $m_1$  e  $m_2$  respectivamente.

$$m_1(k) = \frac{1}{P_1(k)} \sum_{i=0}^k ip_i \quad 3.8$$

$$m_2(k) = \frac{1}{P_2(k)} \sum_{i=k+1}^{L-1} ip_i \quad 3.9$$

A variância de cada distribuição está representada nas equações 3.10 e 3.11

$$\sigma_1^2(k) = \frac{1}{P_1(k)} \sum_{i=0}^k (m_1(k) - p_i)^2 \quad 3.10$$

$$\sigma_2^2(k) = \frac{1}{P_2(k)} \sum_{i=k+1}^{L-1} (m_2(k) - p_i)^2 \quad 3.11$$

Com as variâncias definidas, pode-se determinar a variância intra-classes pela relação apresentada na equação 3.12.

$$\sigma_c^2(k) = \sigma_1^2(k)P_1(k) + \sigma_2^2(k)P_2(k) \quad 3.12$$

Após calcular a variância, determina-se o limiar ótimo  $k^*$  de acordo com relação apresentada na equação 3.13.

$$k^* = \min_{0 \leq k \leq L-1} \sigma_c^2(k) \quad 3.13$$

Esse limiar  $k^*$  minimiza a perda de informação ao impor o limiar que entra em um do conjunto de cinzas bem definidos. O método de Otsu é especialmente bom para imagens que sejam primariamente bimodais, com duas distribuições de tons de cinzas em torno de médias definidas. Para as figuras de fissuras, em que existem 2 principais conjuntos (solo não fissurado e fissuras) o método deveria ser razoável.

A aplicação do método de Otsu permite que não seja necessário um operador humano para a determinação do limiar. A partir do limiar a imagem sofre o processo de binarização em que as fissuras são separadas do solo não fissurado. Esse método foi usado também para comparar os resultados de um programa somente com Otsu em relação a um programa com o operador. O operador é um ser humano que no programa, altera manualmente o valor do limiar de forma que se consiga o máximo de informações sobre as fissuras com o d mínimo de ruído.

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

### 3.6.3 DETERMINAÇÃO DA DILATAÇÃO

A dilatação é uma técnica de análise de imagens que garante que ramificações de um mesmo tronco de fissura sejam conectadas para propósitos de contagem de pixels e de composição de um meio equivalente.

O procedimento em si pode ser definido como um processo iterativo que usa um argumento de razão mínima local para justificar um valor, em pixels, da dilatação. Um valor inicial de dilatação foi imposto e à medida que as iterações ocorriam, esse valor era aumentado.

A Figura 3.27 representa o fluxograma com a rotina de determinação do valor da dilatação.

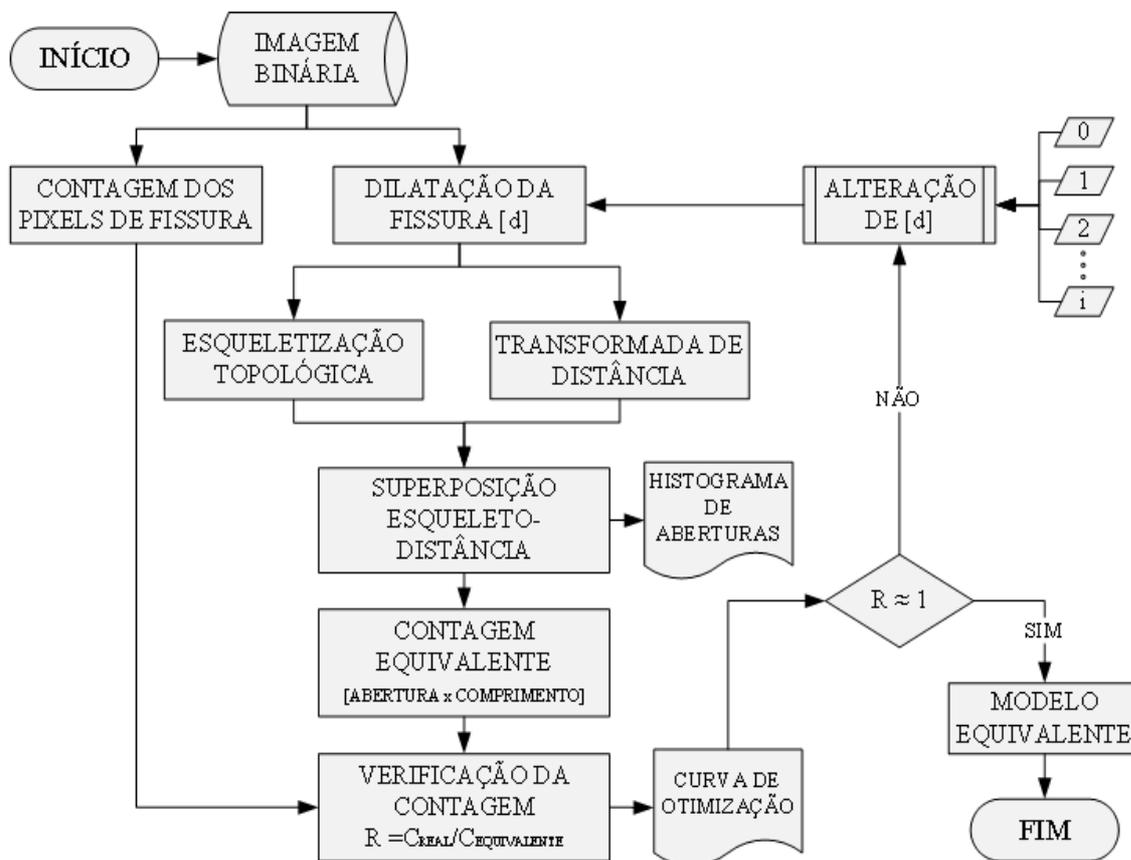


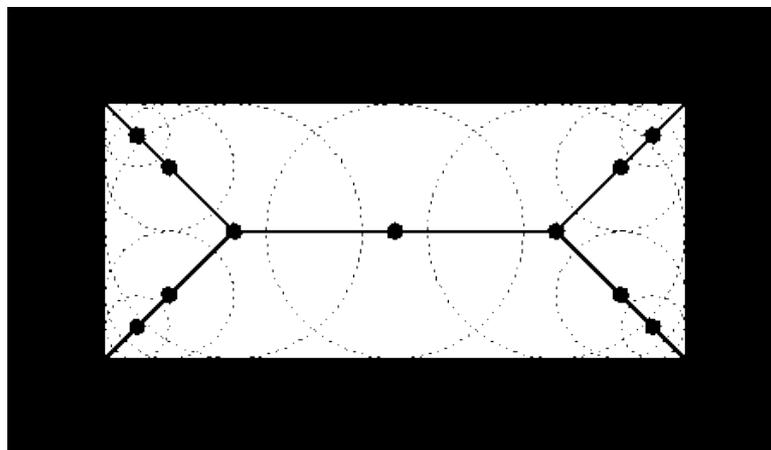
Figura 3.27 – Representação do processo lógico de determinação da dilatação

É importante comentar que o processo de dilatação usado nesse algoritmo é avaliado a partir de uma razão entre contagem equivalente e contagem real ao final do algoritmo completo. Essa representação da etapa, inclui procedimentos ou sub-rotinas que serão descritos com maior profundidade em outras etapas.

Existem outros procedimentos mais complexos para conectar as fissuras, que durante o processo transformação binária são perdidos, mas não foram usados nessa primeira versão do programa.

### 3.6.4 ESQUELETIZAÇÃO TOPOLÓGICA

O processo de esqueletização topológica traça ao longo de uma forma binária uma linha de espessura unitária que conecta os centroides de círculos circunscritos dentro da forma. Uma representação dos círculos e dos centroides conectados como apresentado na Figura 3.28.

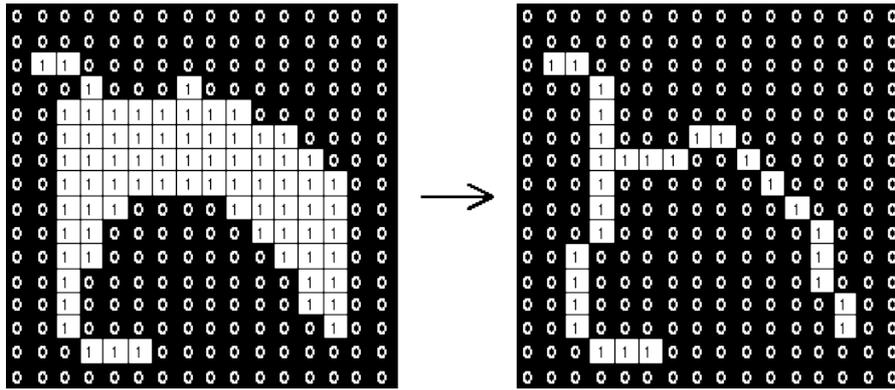


Fonte: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/figs/bitmed.gif>

Figura 3.28 – Posição do esqueleto dentro ao longo dos centróides.

O processo de esqueletização permite condensar informações sobre a topologia de uma forma compacta, e é usada muitas vezes usadas para esse propósito. Dentro do algoritmo desenvolvido, o esqueleto foi usado como um marcador espacial da posição do centróide da fissura dentro da matriz binária. Com essa posição definida e com a transformada de distância feita sobre a matriz binária, foi possível extrair de forma simples os valores das aberturas das fissuras em cada um dos pontos da forma.

Em termos de valores matriciais, os dados da operação de esqueletização são binários como a matriz geradora do mesmo. Uma representação dos valores resultantes de uma esqueletização topológica estão expostos na Figura 3.29.



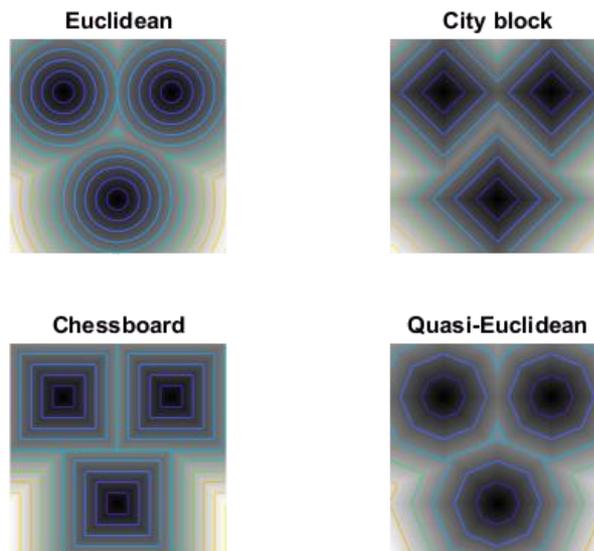
Fonte <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/thin.htm>

Figura 3.29 – Representação dos valores de um esqueleto e de vizinhança.

### 3.6.5 TRANSFORMADA DE DISTÂNCIA E SUPERPOSIÇÃO COM ESQUELETO

De forma simples, a transformada de distância indica a distância de cada pixel nulo para a o pixel não nulo mais próximo. Com essa informação tem-se a distância de cada pixel individual para o próximo não nulo.

O resultado da transformada de distância aplicada a uma forma é uma matriz com as diferentes distâncias calculadas. Esse resultado depende de qual métrica ou função distância será utilizada. Dentre as várias métricas destacam-se: a métrica euclidiana, a *chessboard*, *city block* e *quasi-euclidean*. A Figura 3.30 representa os resultados das diferentes transformadas de distâncias quando aplicadas a uma Figura plana que contém apenas 3 pixels não nulos.



Fonte: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwdist.html?requestedDomain=www.mathworks.com>

Figura 3.30 – Diferentes métricas transformadas de distância.

A transformação que foi empregada foi a métrica euclidiana que calcula a distância em um plano por uma reta. Essa transformação é usada pelo fato do seu valor representar uma grandeza real e contínua, nesse caso, o raio da abertura da fissura.

O pixel exatamente no centróide da fissura irá indicar o valor da abertura da mesma, tornando-se necessário descobrir qual a posição desse. O esqueleto da forma, produzido em etapas anteriores, tem essas posições bem definidas. Portanto, o processo de superposição apenas extraia o valor da transformada de distância na posição em que há dados no esqueleto.

### 3.6.6 CALIBRAÇÃO

Para verificar a precisão do programa, foram criadas imagens geométricas com controle sobre todo os parâmetros avaliados pelo programa. Essas imagens eram produzidas artificialmente impondo áreas e aberturas conhecidas e por fim alimentando as mesmas ao programa e comparando os resultados. Essas imagens geométricas, estão representadas na Figura 3.31.

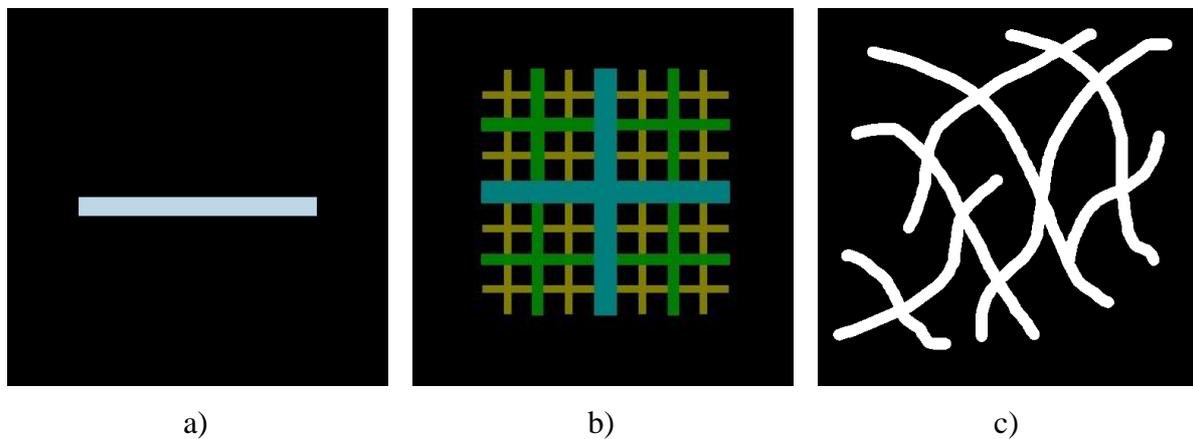


Figura 3.31 – Imagens geradas para avaliar a precisão dos parâmetros sendo a), uma única abertura e 4% da área, b) diferentes valores de abertura, ocupando 28% da área com cruces de e c) 21% coberto com uma forma genérica de mesma abertura

Em a), o programa determinou a área ocupada pela tarja, análogo à fissura como 3,98%, para b) o resultado foi de 28,6% e c) 21,1%. Os resultados foram bem próximos aos impostos na produção de tais imagens, sendo que o valor que mais destoou (b) está associado a arestas retas que podem impor pequenas curvaturas no processo de esquelização.

Os valores das aberturas das imagens representadas em 3.31 foram avaliados e suas respectivas distribuições estão representadas na Figura 3.32.

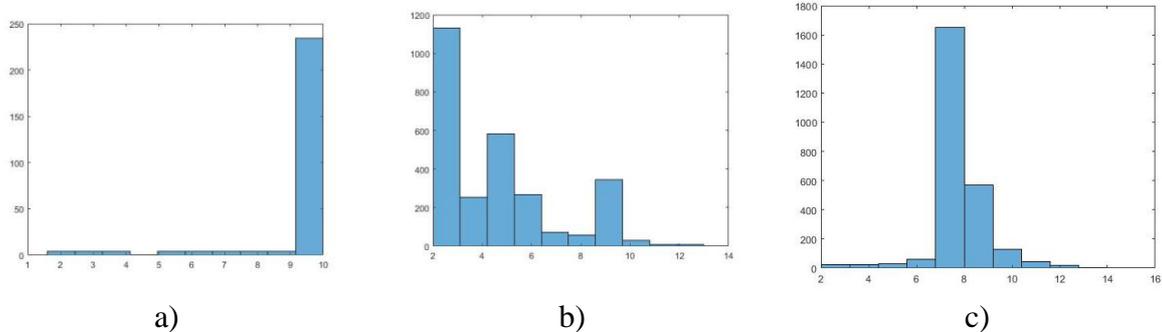


Figura 3.32 – Distribuição das aberturas a), uma única abertura e 4% da área, b) diferentes valores de abertura, ocupando 28% da área com cruces de e c) 21% coberto com uma forma genérica de mesma abertura

Como esperado, a primeira imagem gerada, a), obteve apenas um pico de valores, em torno de 10 pixels, como ela de fato foi feita. A imagem b) apresentou os três diâmetros usados nas cruces de diferentes proporções e cores, mas também considerou a abertura média, na diagonal em cada um dos pontos onde as retas das cruces se tocavam. A imagem c), embora tenha sido produzida unicamente com uma única abertura, apresentou um pico primário, na abertura imposta e valores secundários, maiores, provavelmente nas intersecções entre ramificações desenhadas.

Ao final, os resultados foram satisfatórios, ainda que tenha demonstrado certa sensibilidade a pontos de mudança de geometria.

### 3.6.7 SIMULAÇÃO DE INFILTRAÇÃO

Se o sistema está fechado em relação à perda de água, todo volume percolado irá reduzir a lâmina de água acima da camada compactada de forma proporcional à quantidade percolada. Com essa condição, calculou-se um volume percolado sob uma carga, reduzindo-se da lâmina do volume que por sua vez permitia recalculá-la.

Esse processo iterativo é uma simplificação numérica similar a um tanque, onde uma quantidade finita de água dentro de um volume é afetada pelo valor que sai desse sistema fechado. O algoritmo que estrutura o processo logicamente está representado na Figura 3.31.

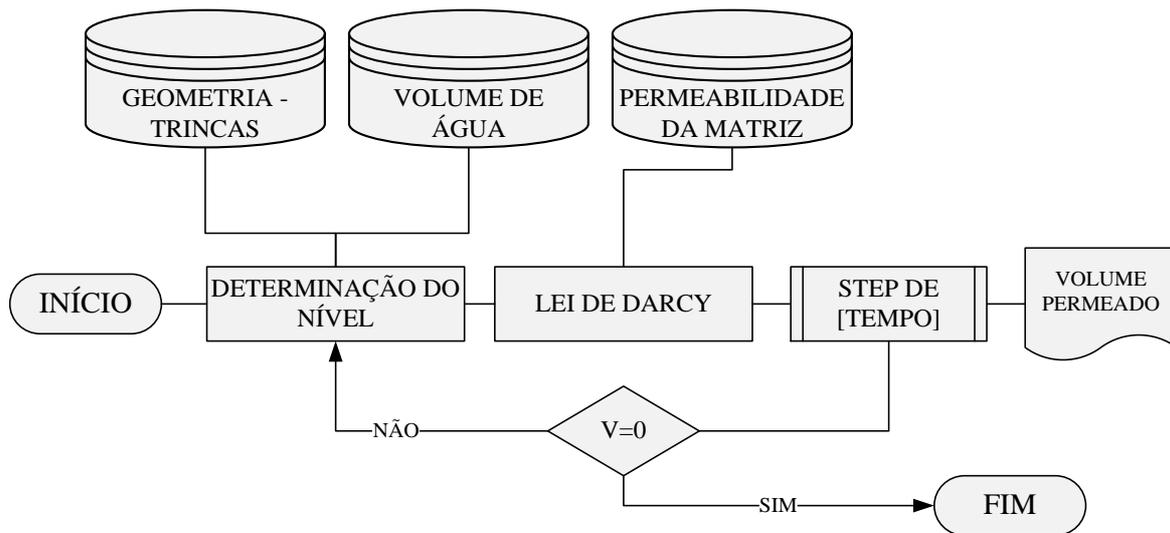


Figura 3.33 – Fluxograma da etapa de simulação de infiltração.

Após a saturação do solo fissurado, a válvula da base era aberta, permitindo o fluxo da água através do meio fissurado. O volume infiltrado após certo tempo é então removido da lâmina de água acima da camada compactada e um novo gradiente é calculado para cada pixel da matriz do solo. A Figura 3.32 representa fisicamente o processo descrito no fluxograma da Figura 3.31.

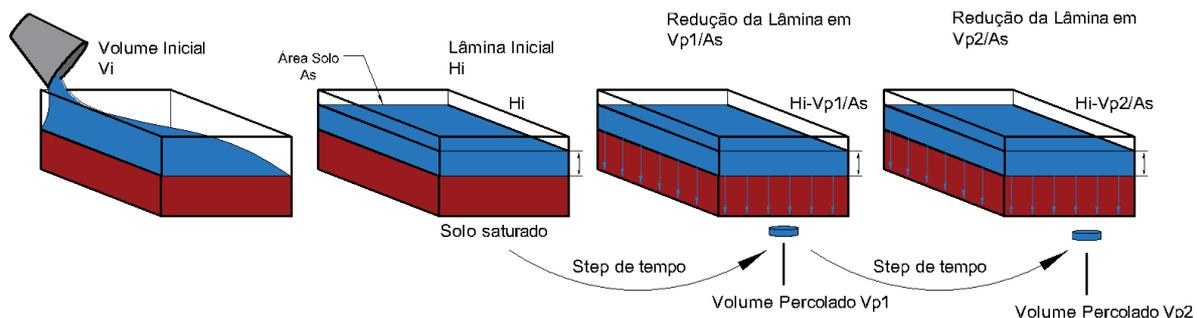


Figura 3.34 – Etapas da simulação da infiltração

Embora o foco central seja em fissuras geradas por um mecanismo de ressecamento de um material sensível a essa condição, as técnicas de análise de imagem e simulação de fluxo propostas nesse trabalho poderiam ser aplicadas a outros materiais fissurados.

## 4 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados, descritos e analisados os resultados das diferentes etapas executadas. Algumas das análises de dados foram estruturadas em cada tópico individual e as peculiaridades de cada ensaio e seus resultados também foram descritos individualmente.

### 4.1 FISSURAÇÃO EM PEQUENA ESCALA

Como descrito no terceiro capítulo, as amostras de diferentes misturas e solos foram compactadas em uma placa de Petri e submetido a ciclos de ressecamento e molhagem. Entre cada etapa desse ensaio somente um dos parâmetros foi modificado.

Esse conjunto de ensaios foi feito antes da decisão da escolha do material e foi importante para a seleção e controle das condições a serem usadas na etapa utilizando a simulação das fissuras em maior escala. Em todas as condições avaliadas, a energia de compactação foi a mesma excetuando a etapa em que o efeito da própria energia de compactação foi avaliado.

Um ensaio foi executado após a seleção do material, e essa avaliação do efeito da energia de compactação foi feita com a própria mistura já selecionada. Nessa etapa, os resultados da compactação já eram conhecidos e, portanto, pode-se calcular de forma acurada a energia utilizada e quantidade de material para cada camada na placa de Petri.

A Figura 4.1 representa as duas etapas de um ciclo de ressecamento na placa de Petri e o soquete simplificado usado na etapa de compactação em pequena escala.

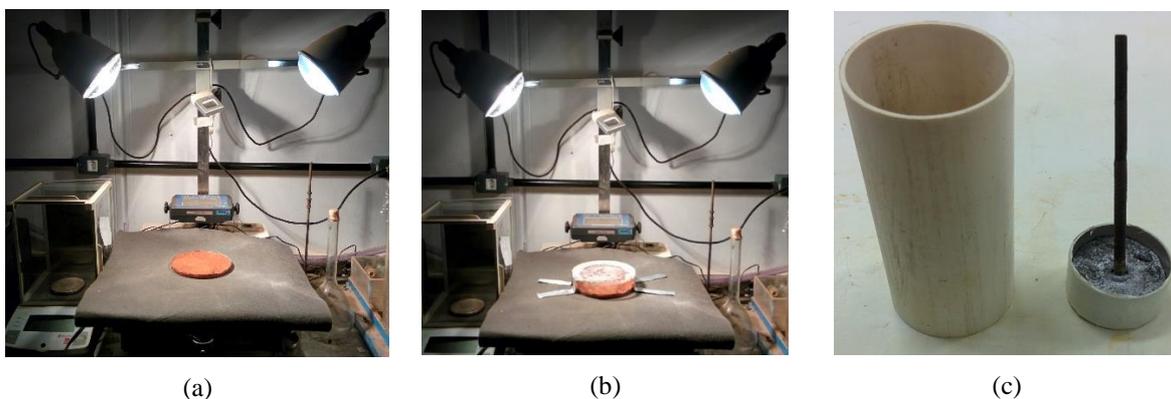


Figura 4.1– Uso do aparato-piloto, sendo o ressecamento da amostra em (a) molhagem da camada compactada com uma placa gotejadora em (b) e em (c), o soquete simplificado e o molde usado para a compactação nessa escala.

#### 4.1.1 SOLO NATURAL, VARIANDO SUA PROFUNDIDADE

O solo extraído do campo experimental a diferentes profundidades foi compactado nas placas de Petri e exposto aos ciclos de molhagem e ressecamento. As imagens de cada etapa relativas a cada amostra obtidas nas respectivas profundidades estão representadas na Figura 4.2. Ressalta-se que o eixo horizontal representa as diferentes profundidades de coleta e o eixo vertical representa os diferentes ciclos

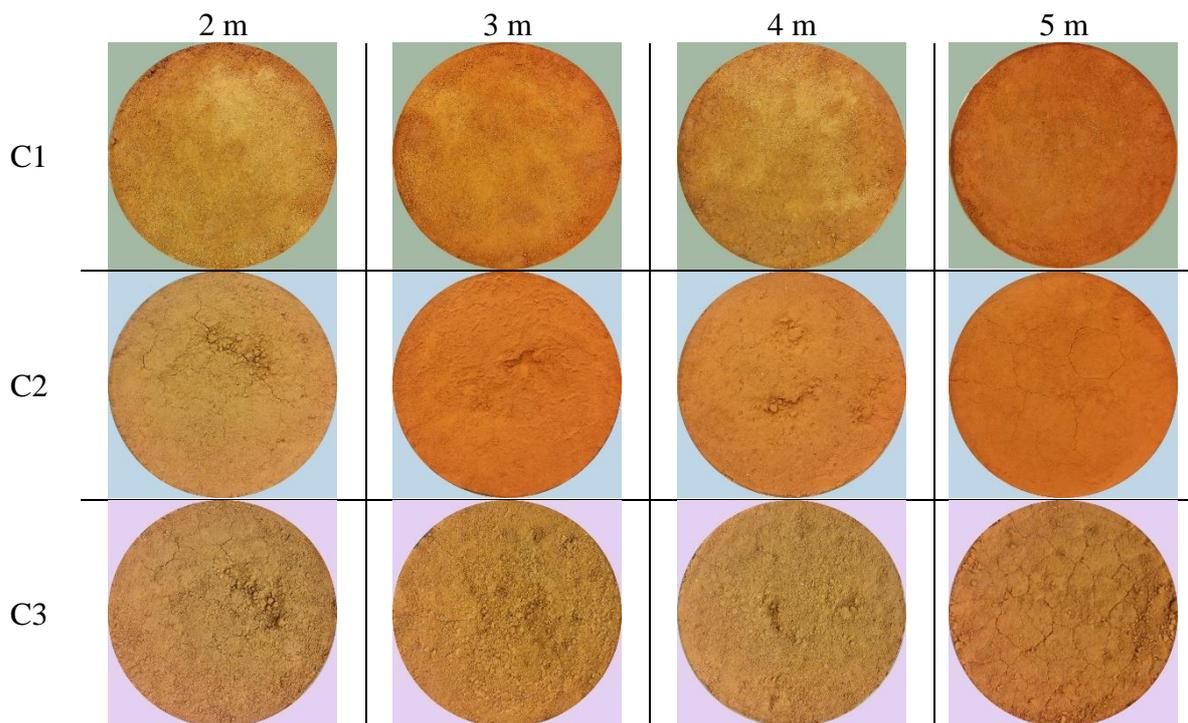


Figura 4.2– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, variando a profundidade do solo extraído em campo, , onde C1 representa o primeiro ciclo, C2 o segundo e C3 o terceiro.

Como descrito anteriormente as imagens são tratadas e analisadas de forma a produzir matrizes binárias das quais se pode extrair uma geometria plana. Os parâmetros extraídos foram as aberturas das fissuras e quanto a área originalmente representada encontrava-se fissurada, isto é o CIF. Foram feitas as distribuições de aberturas por dois métodos, um que envolve um operador humano, que determina os valores de *threshold* a partir da sua visualização da imagem e outro feito inteiramente pelo programa, de forma automática, usando unicamente *Otsu* para determinar o limiar.

As análises das aberturas foram feitas comparando diferentes amostras em diferentes condições em um mesmo número ciclos, visando avaliar o impacto da amostra sobre os resultados dentro dos ciclos. Foram feitos também histogramas comparando uma única amostra evoluindo ao longo dos diferentes ciclos de molhagem e ressecamento.

Na Figura 4.3 estão representadas as distribuições de aberturas das fissuras obtidas pela contagem das mesmas. O eixo vertical representa a contagem de pixels, ou elementos de matriz que estão dentro dos *bins* representados nos eixos horizontais. Os valores dos *bins* são as aberturas, em *pixels*. A Figura 4.4 representa os mesmos dados, mas obtido pelo método automático, ou unicamente com Otsu. Em ambas as Figuras 4.3 e 4.4 estão representadas as aberturas após cada ciclo.

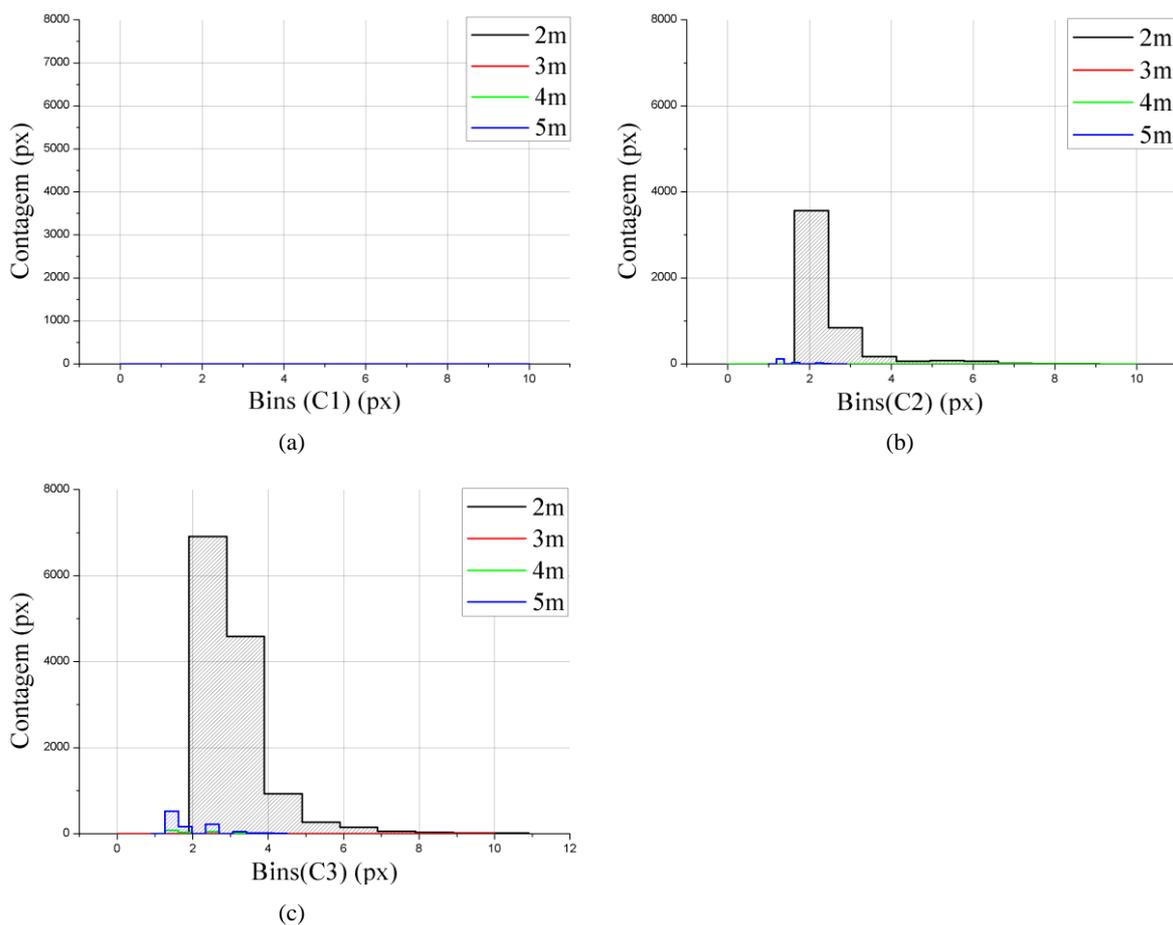


Figura 4.3– Distribuição das aberturas, variando a profundidade do solo puro, obtidas pelo método do operador, sendo (a) as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro ciclo.

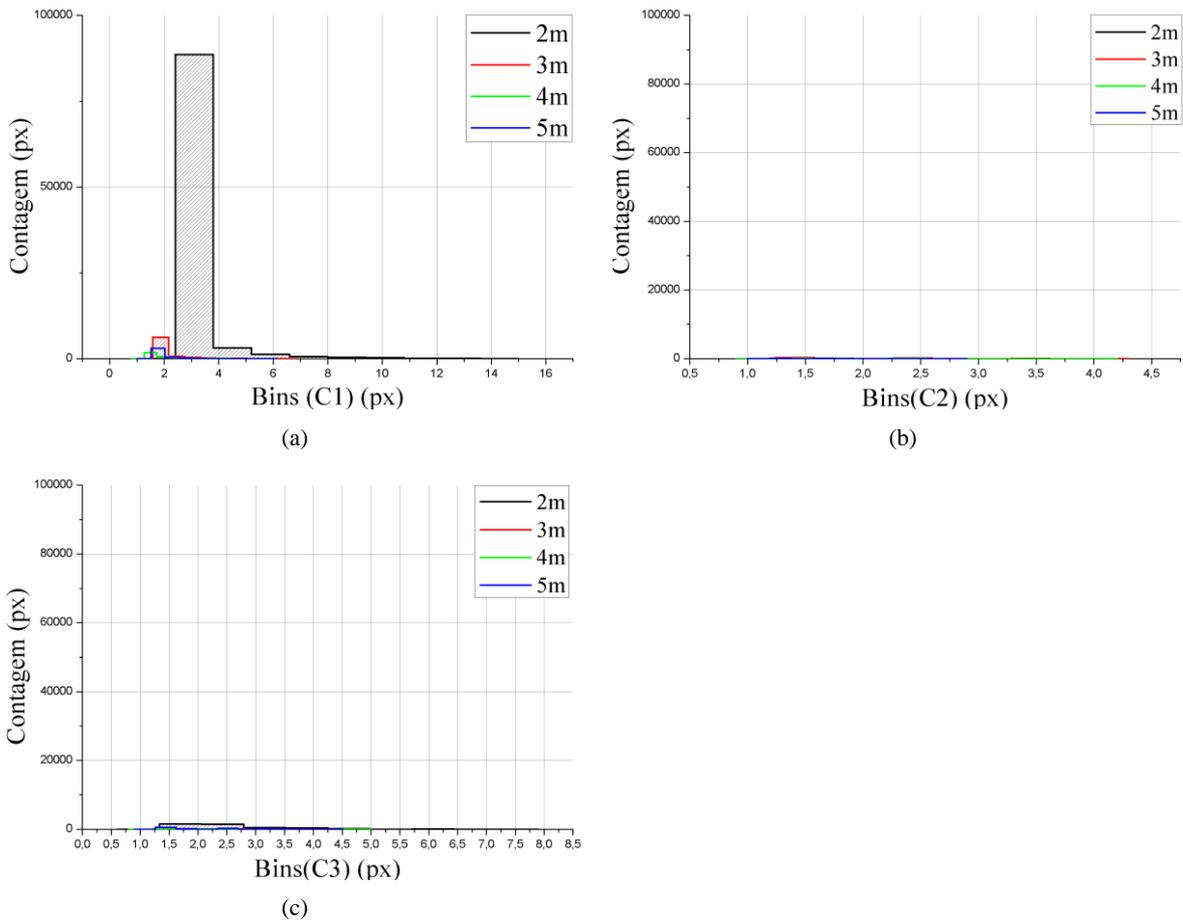


Figura 4.4 – Distribuição das aberturas, variando a profundidade do solo puro, obtidas por Otsu, (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro ciclo.

Os histogramas representaram de forma consistente o comportamento geral da área fissurada, havendo um acréscimo da fissura ao longo dos ciclos. Os resultados por meio de Otsu apresentaram inconsistências ao longo dos ciclos, no qual houve um decréscimo na área fissurada do primeiro para o segundo ciclo em algumas amostras.

Há também uma discrepância nos valores de abertura obtidas entre as técnicas, prioritariamente devido à sensibilidade do meio automático em relação a ruído. Considerando que as imagens trabalhadas são círculos circunscritos em retângulos de dimensões 1000x1000, em um total de  $10^6$  pixels.

Nas Figuras 4.5 e 4.6 estão representadas as a distribuições de aberturas das fissuras nas amostras ao longo dos ciclos, para uma mesma amostra individual, aplicando as duas técnicas descritas anteriormente. Os histogramas dessas aberturas se referem ao solo extraído de diferentes profundidades e como os mesmos fissuram em função dos ciclos de ressecamento.

O comportamento das aberturas foi também avaliado para cada uma das profundidades, ao longo dos ciclos, ao contrário dos histogramas das figuras 4.3 e 4.4 que avaliava a abertura ao longo dos ciclos.

Em ambas as Figuras 4.5 e 4.6 são representados os valores das aberturas calculados pelos métodos do operador e Otsu.

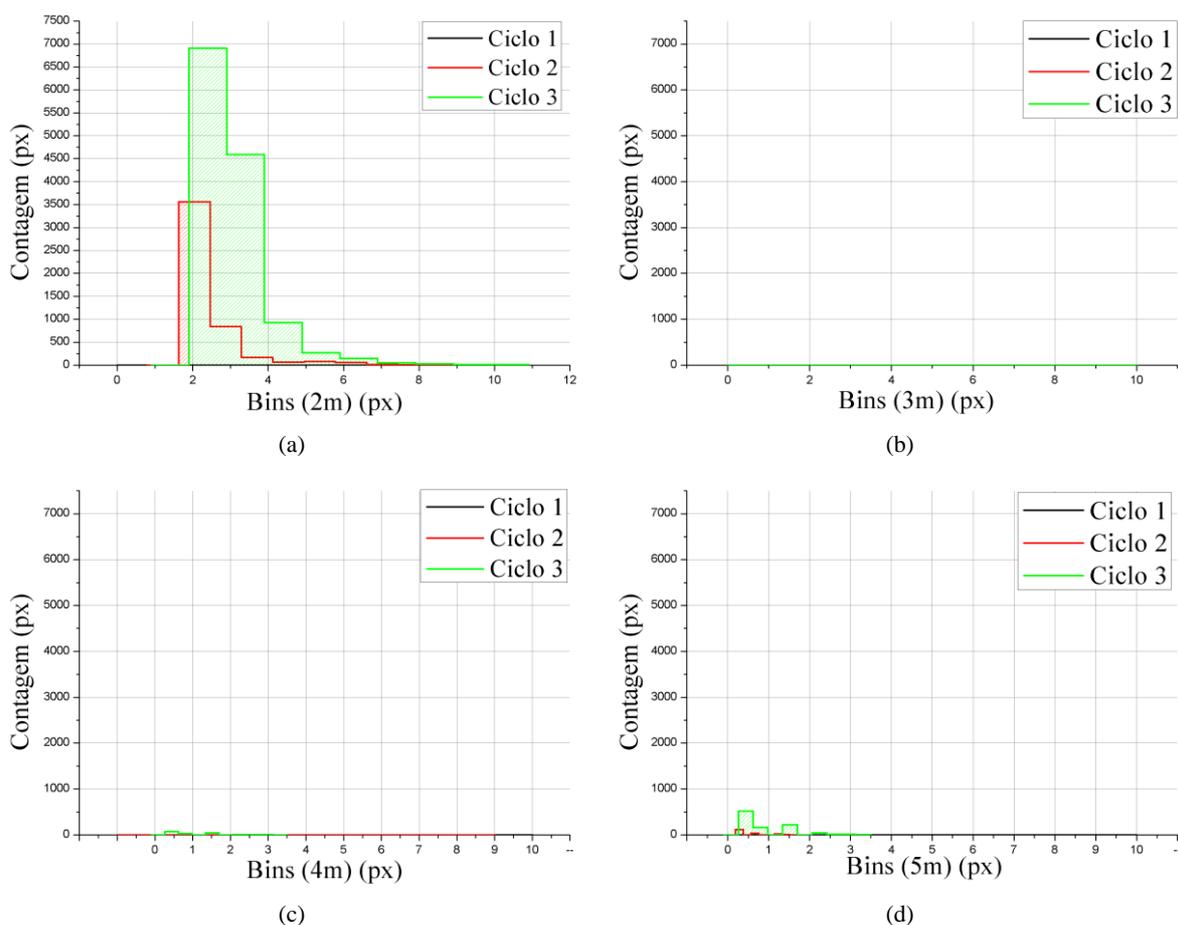


Figura 4.5– Distribuição das aberturas, em vários ciclos, pelo método do Operador, sendo (a) o solo extraído de 2m de profundidade, (b) de 3m, (c) de 4m e (d) de 5m.

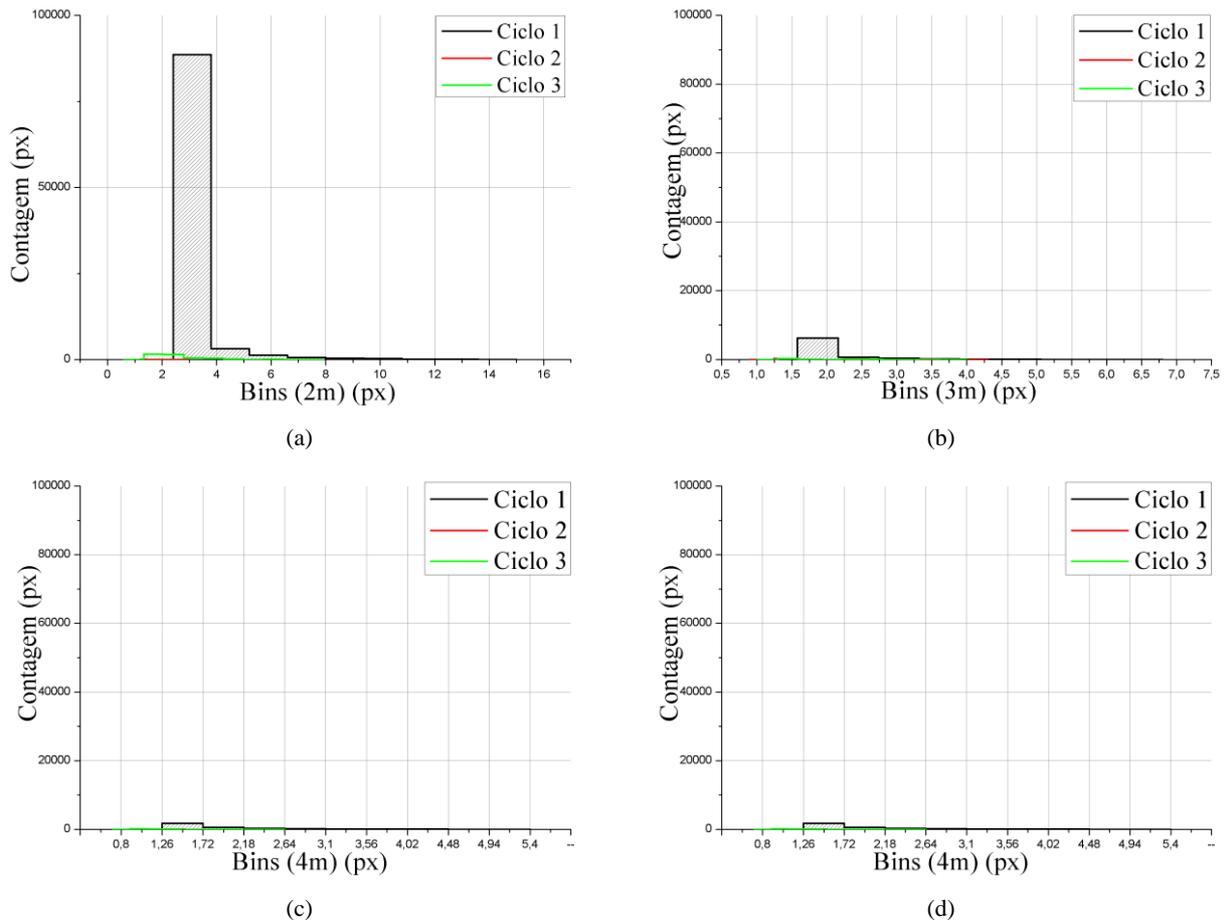


Figura 4.6– Distribuição das aberturas, em vários ciclos, pelo método de Otsu (a) o solo extraído de 2m de profundidade, (b) de 3m, (c) de 4m e (d) de 5m.

Os resultados indicaram que o solo mais próximo da superfície tinha o maior potencial para fissuração. Ambas as técnicas calcularam pixels fissurados nas amostras, mas os resultados com uso do operador foram mais próximos do que se poderia assumir como fissuração visível. Os valores de Otsu foram bastantes destoantes do esperado para o comportamento do solo, acusando a máxima fissuração do solo no primeiro ciclo, para todas as profundidades. Com esse argumento de máxima fissuração, o solo da profundidade de 2m foi selecionado como o material a ser avaliado para a etapa de mistura.

Por fim foram avaliados parâmetros pontuais que representavam o percentual da área fissurada (CIF), as aberturas médias e como as distribuições de aberturas se relacionavam com a média, por meio de uma análise dos desvios estão os dados calculados a partir dos resultados do método do operador e em (b) automaticamente pelo método de Otsu. Padrão ao longo dos ciclos.

A Figura 4.7 representa então o percentual da área fissurada em cada um dos ciclos, para cada uma das amostras avaliados para cada um dos métodos.

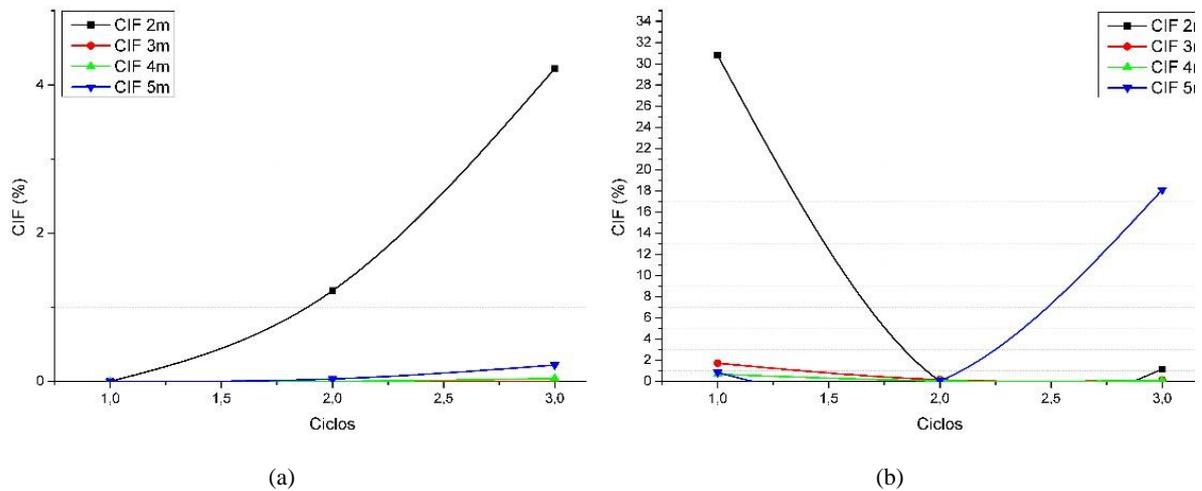


Figura 4.7– CIF em relação aos ciclos sendo (a) calculados a partir dos resultados do método do operador e em (b) automaticamente pelo método de Otsu.

Sem o uso do operador, os resultados foram inconsistentes com o observado nas amostras. Somente com a determinação automática do limiar, o programa detectou muito ruído, ou talvez tenha considerado a aspereza superficial da amostra e contou os pixels da mesma forma como fissurados.

Os resultados a partir do primeiro gráfico corroboram os dados dos histogramas anteriores, indicando que o solo mais próximo da superfície apresentou a maior fissuração. Esse máximo valor aconteceu após o último ciclo de ressecamento e molhagem e teve um valor 4,3% da área original. Um valor relativamente alto para um solo puro que não aparenta ter argilominerais expansivos para essa profundidade.

A Figura 4.8 representa os valores da abertura média das fissuras em relação aos ciclos. Os valores foram calculados em valores percentuais do diâmetro da amostra. Em (a) estão os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas a partir do limiar de Otsu.

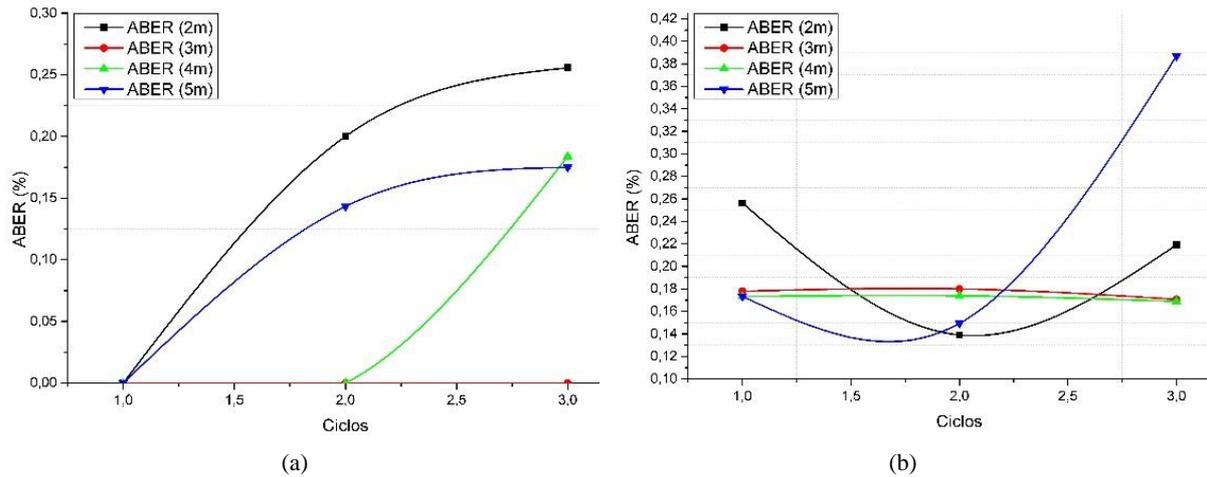


Figura 4.8– Abertura média em relação aos ciclos, pelos métodos: (a) do Operador e (b) Otsu

Novamente, em um solo pouco fissurado, somente com Otsu, os resultados foram bastante discrepantes e com um comportamento inconsistente com o observado nas amostras. Nos resultados do operador observou-se que mesmo com diferentes valores de CIF, os solos apresentaram valores de abertura média similares. Um segundo ponto importante, é que as amostras que manifestaram fissuras tinham curvas com uma inflexão e tendem a indicar uma estabilização das aberturas após múltiplos ciclos.

A Figura 4.9 representa os valores do desvio padrão das aberturas das fissuras em relação à média dos valores, representado ao longo dos ciclos. Os valores foram calculados em valores percentuais. Em (a) estão os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas a partir do limiar de Otsu.

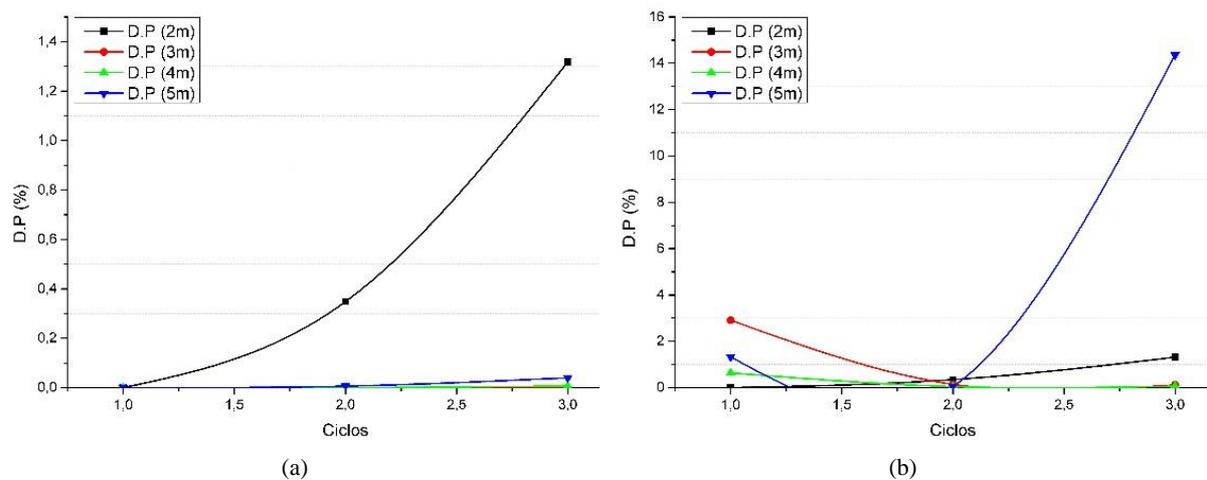


Figura 4.9 – Desvio padrão das aberturas em relação aos ciclos, pelos métodos: (a) do Operador e (b) Otsu

Os valores do desvio padrão em relação aos ciclos apresentou um acréscimo em cada um dos ciclos para ambos os métodos. Embora a média de abertura das fissuras tenha se modificado com uma menor taxa no último ciclo para as amostras, tanto os valores de CIF e desvio-padrão das aberturas mudaram com taxas similares, visível na Figura 4.10 (a). Essa mesma relação que não se verifica entre o CIF e a abertura média, como visível na Figura 4.10 (b).

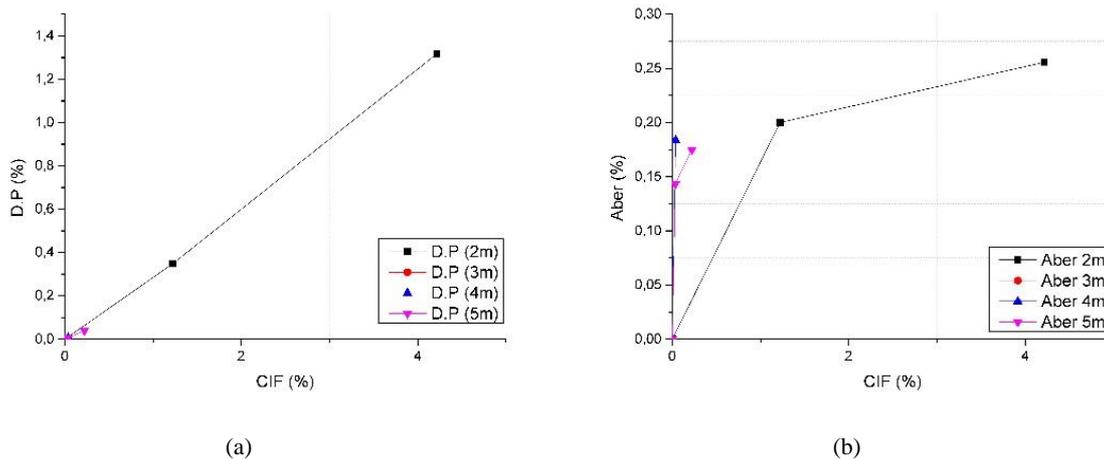


Figura 4.10– Relações entre propriedades das aberturas e CIF sendo (a) a relação o desvio padrão da abertura e o CIF e (b) a relação entre a abertura média e o CIF

O aumento simultâneo do desvio padrão dos valores de abertura em relação aos valores de CIF indica que para essas amostras há uma diversificação no espectro de aberturas, podendo assumir que, nessa condição, houve um aumento na quantidade de valores individuais de abertura diretamente associado ao aumento da área fissurada.

Embora a relação linear entre abertura e CIF seja um resultado interessante, não se pode assumir uma confiabilidade alta ao mesmo pois há uma discrepância, ou um erro inerente ao cálculo de desvio padrão a partir de *bins* de um histograma. Existem técnicas para a correção desses valores, como a correção de Shepperd, mas optou-se por não alterar os dados brutos, e apresentá-los como calculados dentro do programa.

#### 4.1.2 SOLO NATURAL, VARIANDO O CONTEÚDO DE BENTONITA ADICIONADA

O solo extraído do campo experimental da profundidade de 2m foi misturado a diferentes percentuais de bentonita, compactado nas placas de Petri e exposto aos ciclos de molhagem e ressecamento.

As imagens de cada etapa e de cada profundidade podem ser visualizadas na Figura 4.11, no qual o eixo horizontal representa as diferentes proporções de bentonita adicionadas ao solo natural e o eixo vertical representa os diferentes ciclos.

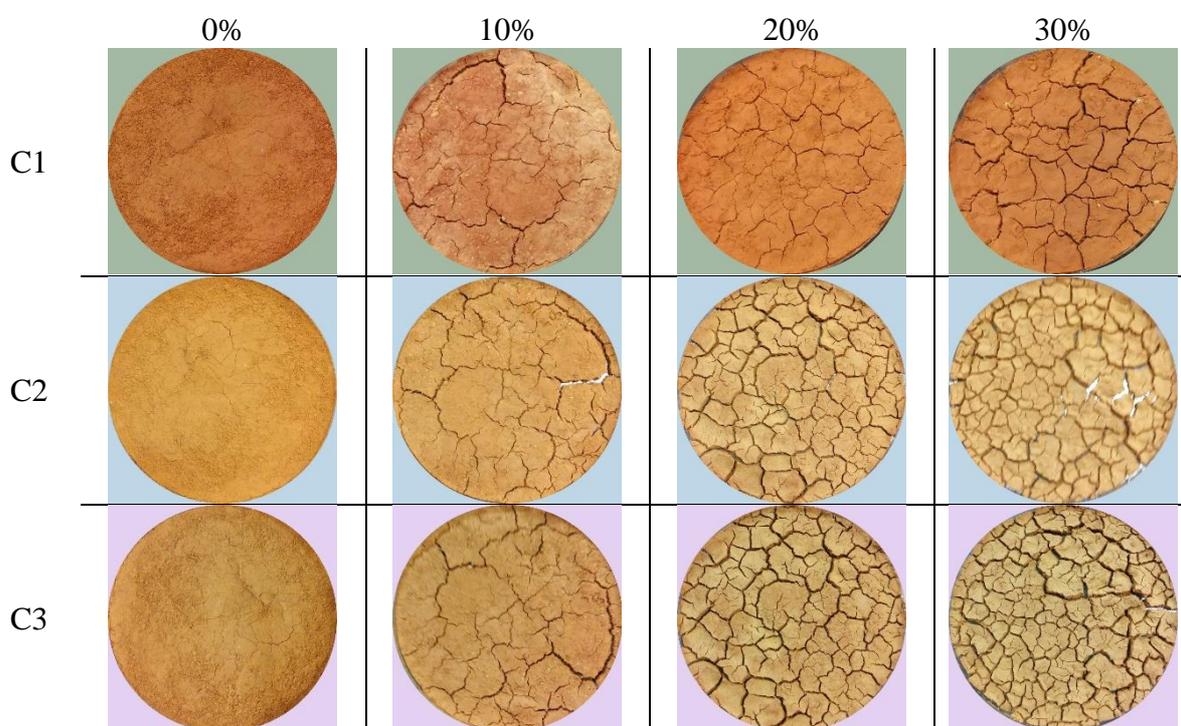


Figura 4.11– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, variando o percentual de bentonita adicionado ao solo, onde C1 representa o primeiro ciclo, C2 o segundo e C3 o terceiro.

Os valores das aberturas ao longo de todo o comprimento da fissura foram calculadas e apresentadas por meio de histogramas que representam as aberturas de cada amostra, com diferentes percentuais de bentonita para um mesmo ciclo e as 4 amostras ou uma amostra e seu resultado individual ao longo dos ciclos.

Na representação da distribuição, o eixo vertical representa a contagem de pixels, ou elementos de matriz que estejam dentro dos *bins* representados nos eixos horizontais. Os valores dos *bins* representam os valores das aberturas das fissuras, em *pixels*.

Na Figura 4.12 estão representadas as a distribuições de aberturas das feitas pelo método do Operador. A Figura 4.13 representa os mesmos dados, mas feito pelo método automático, ou unicamente com Otsu.

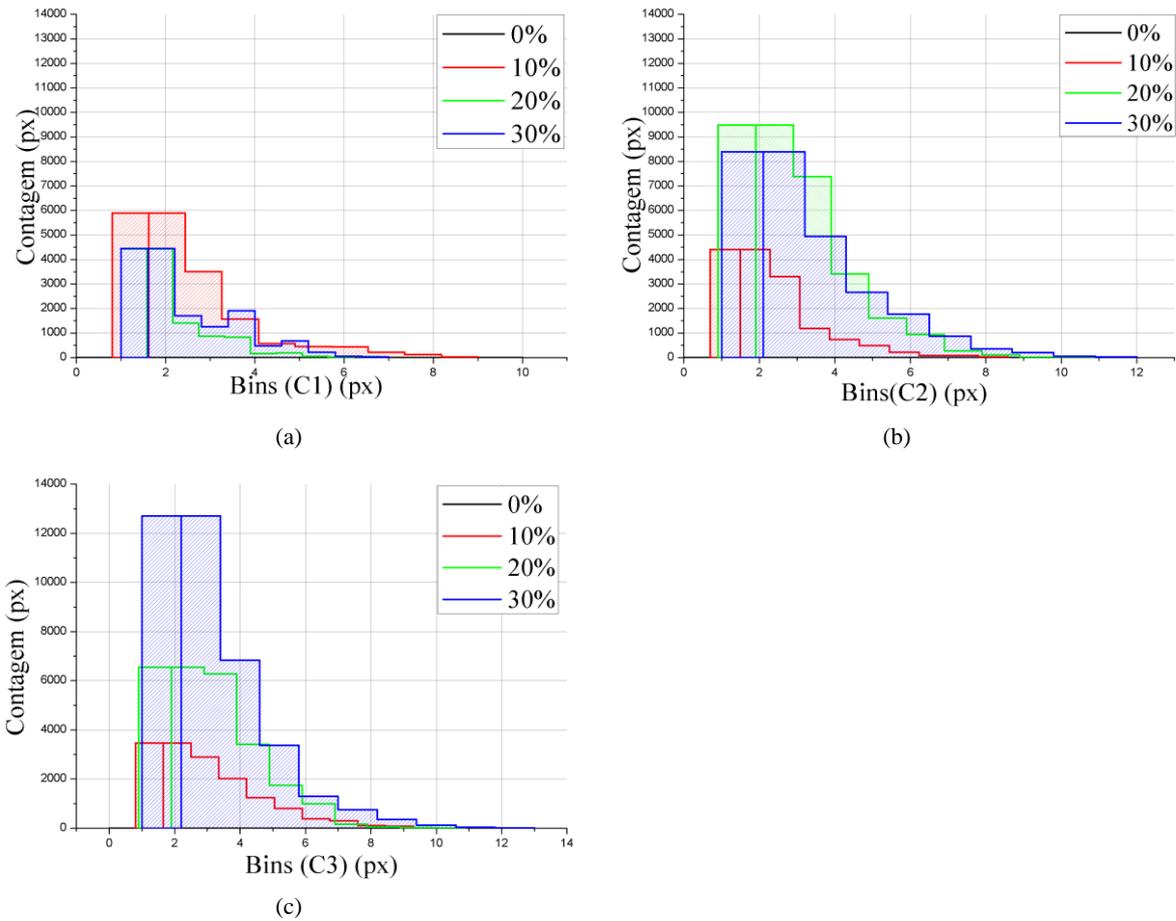


Figura 4.12– Distribuição das aberturas, variando o percentual de bentonita pelo método do operador, onde (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro ciclo do ressecamento.

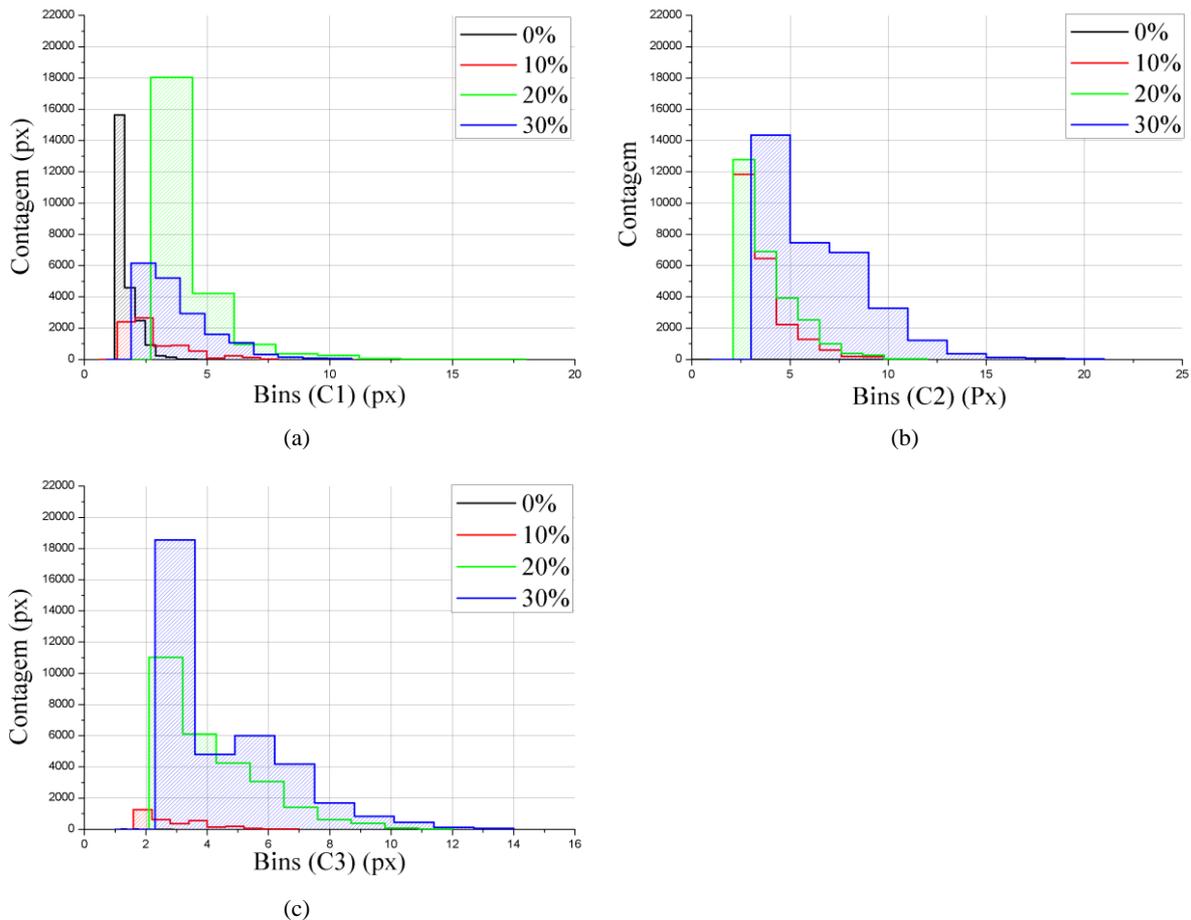


Figura 4.13– Distribuição das aberturas, variando o percentual de bentonita, por Otsu, onde (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro ciclo do ressecamento.

Os histogramas obtidos por meio dos dois métodos apresentaram para esse material diferenças menores, indicando que o método de Otsu seja mais confiável à medida que o próprio material se torna mais fissurado. Um segundo ponto a comentar em relação à diferença nos resultados obtidos nas duas técnicas refere-se à ordem de magnitude dos valores calculados pelos dois métodos, que se tornaram próximos ao longo da evolução dos ciclos.

De forma esperada, o solo que sofreu o maior acréscimo de bentonita apresentou a maior fissuração ao final do último ciclo de ressecamento e molhagem, para as duas técnicas. É importante notar que em ambas as técnicas o material com menor quantidade de bentonita fissurou mais do que os outros no primeiro ciclo de ressecamento.

Nas Figuras 4.14 e 4.15 estão representadas as a distribuições de aberturas das fissuras nas amostras ao longo dos ciclos, para uma mesma amostra individual, aplicando as duas técnicas descritas anteriormente. Os histogramas dessas aberturas se referem aos resultados das amostras individuais compostas com o solo extraído de 2m de profundidade acrescido de diferentes teores de bentonita.

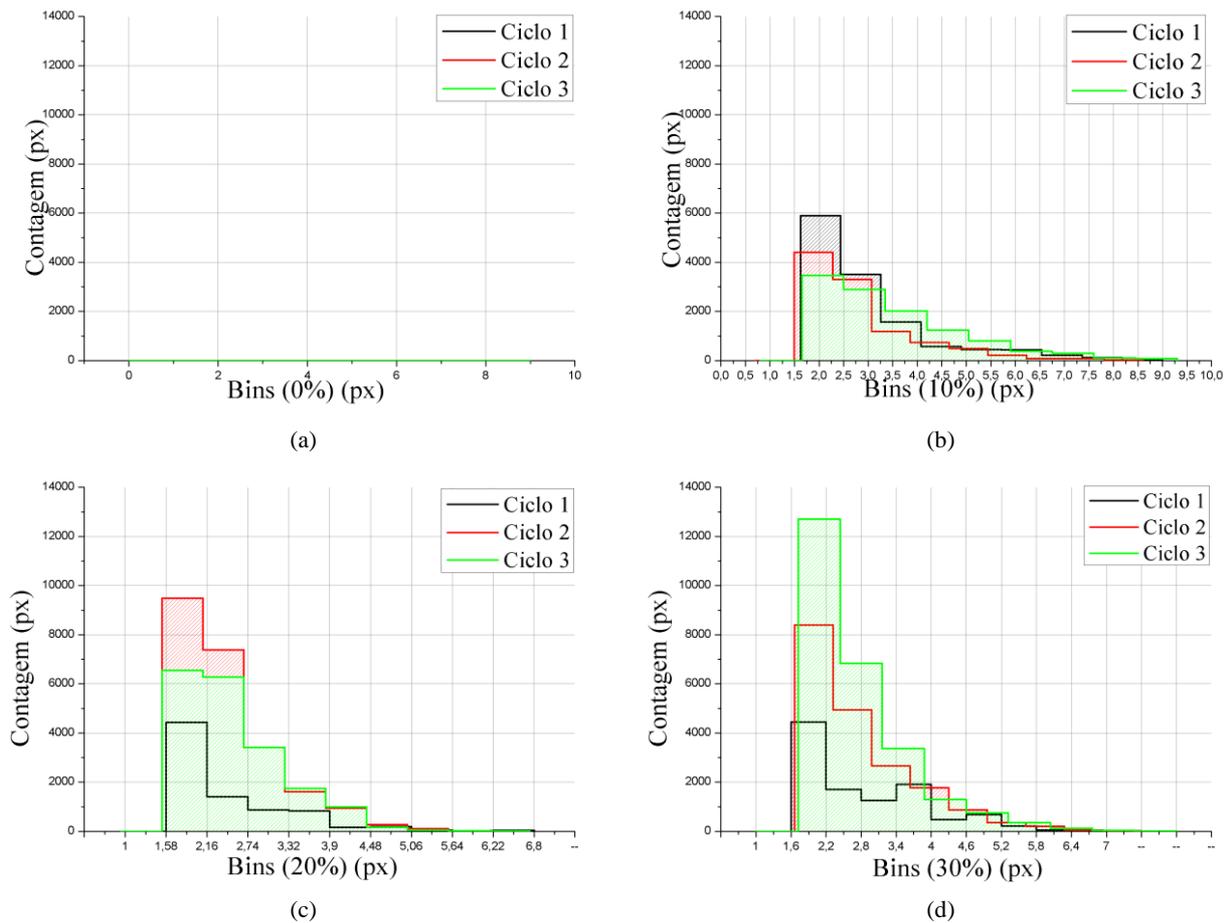


Figura 4.14– Distribuição das aberturas, para uma mistura de solo e bentonita, em vários ciclos, pelo método do Operador sendo que (a) representa os resultados da amostra com 0% de bentonita para todos os ciclos, (b) da amostra com 10% de bentonita e (c) amostra com 20% de bentonita e (d) a amostra com 30% de bentonita.

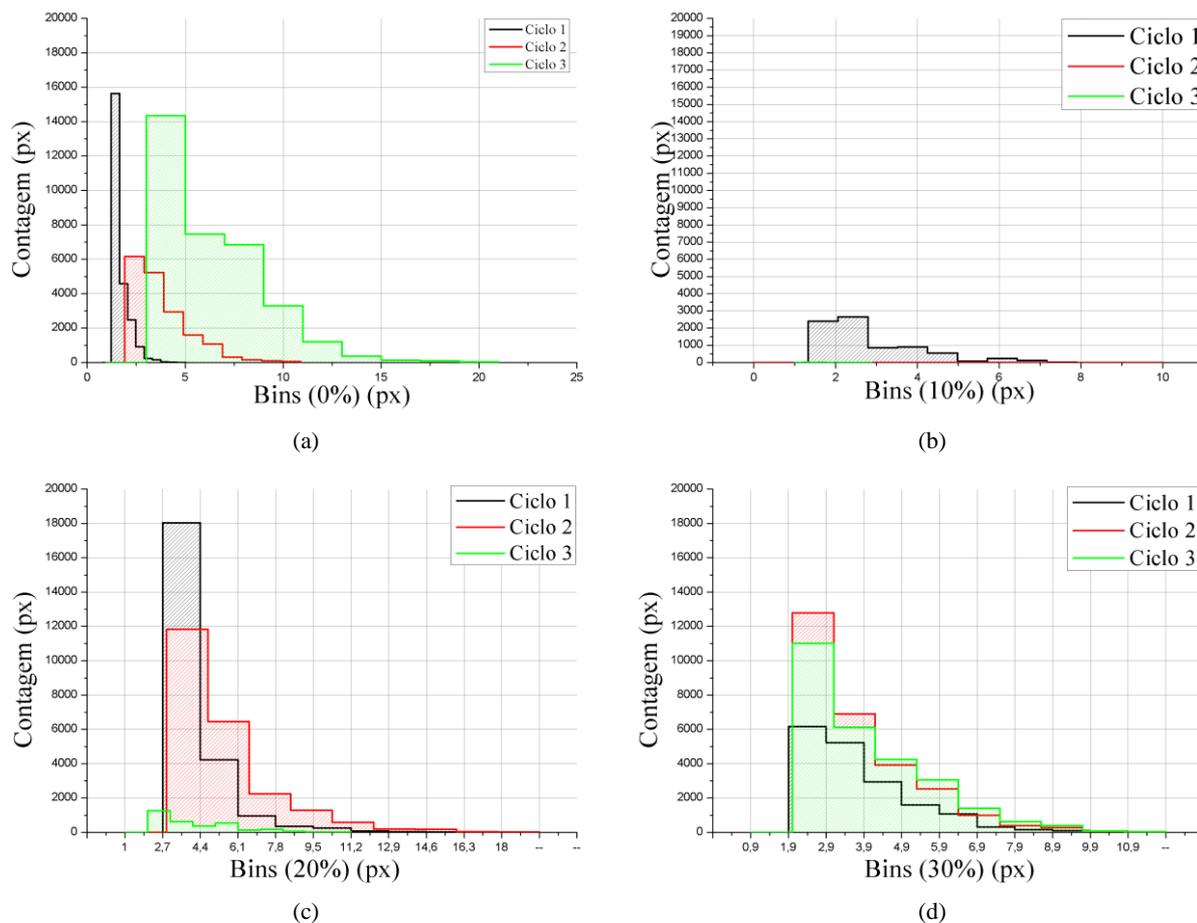


Figura 4.15– Distribuição das aberturas, para uma mistura de solo e bentonita, em vários ciclos, pelo método de Otsu sendo que (a) representa os resultados da amostra com 0% de bentonita para todos os ciclos, (b) da amostra com 10% de bentonita e (c) amostra com 20% de bentonita e (d) a amostra com 30% de bentonita.

Ao analisar individualmente as amostras em cada um dos ciclos percebe-se que o método de Otsu continua pouco confiável para condições em que não haja fissuras bem definidas. O solo puro não apresentou fissuras ao analisar as imagens alimentadas ao programa, e ainda assim, o método de Otsu indicou uma fissuração presente.

No entanto, assim que as amostras começaram a manifestar fissuras expressivas, ambos métodos se aproximaram em alguns comportamentos e valores. Em ambos os histogramas, para uma mesma dosagem de bentonita, os solos apresentaram uma fissuração com valores mais concentrados nos dois primeiros ciclos.

Outro ponto a se comentar é que os valores foram de abertura foram se diversificando à medida que os ciclos ocorriam nas amostras. Durante o primeiro ciclo de ressecamento, o material avaliado tinha aberturas mais concentradas ao longo de um ponto, para todas as amostras, essa tendência se alterava à medida que o material era submetido aos ciclos.

Por fim foram avaliados parâmetros pontuais que representam o percentual da área fissurada (CIF), as aberturas médias e como as distribuições de aberturas se relacionavam com a média, por meio de uma análise dos desvios-padrão ao longo dos ciclos.

A Figura 4.16 representa o percentual da área fissurada em cada um dos ciclos, para cada uma das amostras. Em (a) estão os dados calculados a partir dos resultados do método do operador e em (b) automaticamente pelo método de Otsu.

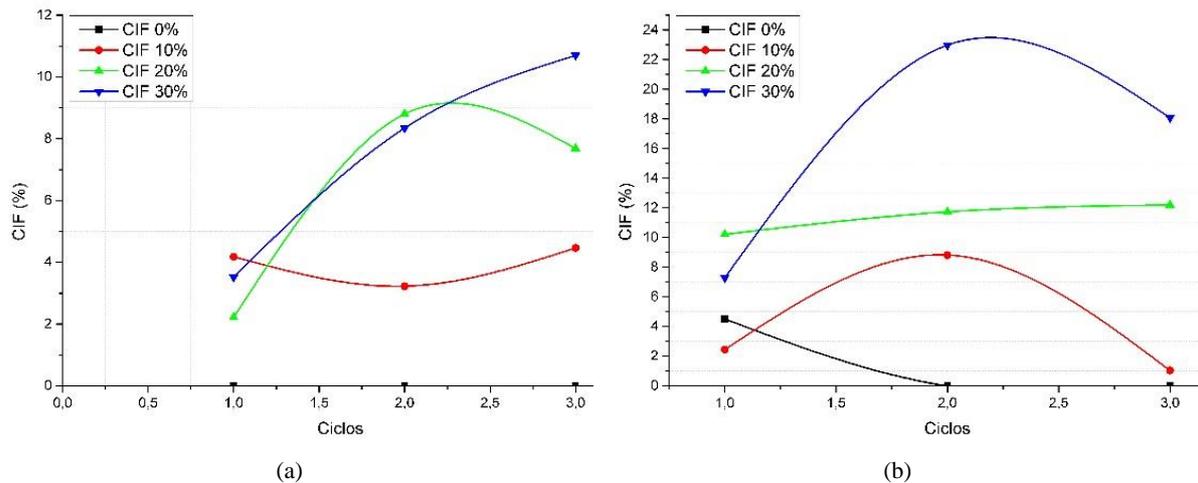
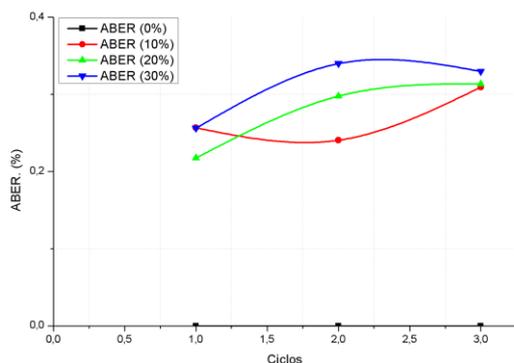


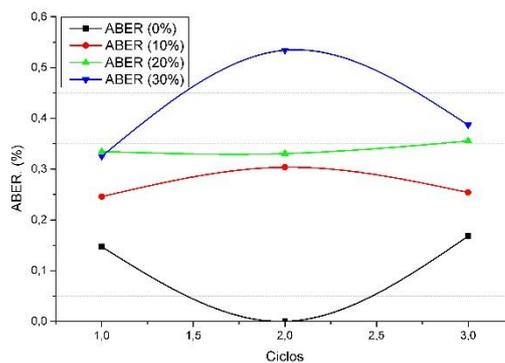
Figura 4.16– CIF em relação aos ciclos, para a mistura de solo com bentonita, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b)

Novamente, Otsu apresenta resultados diferentes dos valores obtidos pelo operador. Nos resultados do operador, observou-se que mesmo com diferentes valores de CIF, os solos apresentaram valores de abertura média similares. Ressalta-se também que as amostras que manifestaram fissuras tinham curvas com uma inflexão indicando uma tendência à estabilização das aberturas após os múltiplos ciclos.

A Figura 4.17 representa os valores das aberturas fissuras nos diferentes ciclos em relação à média dos valores. Esses valores foram calculados com base em valores percentuais. Considerando a Figura 4.17, em (a) são mostrados os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas obtidas a partir do método de Otsu.



(a)

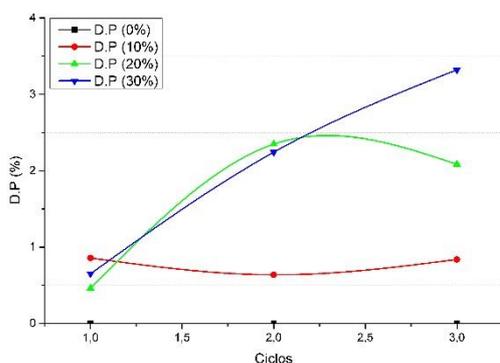


(b)

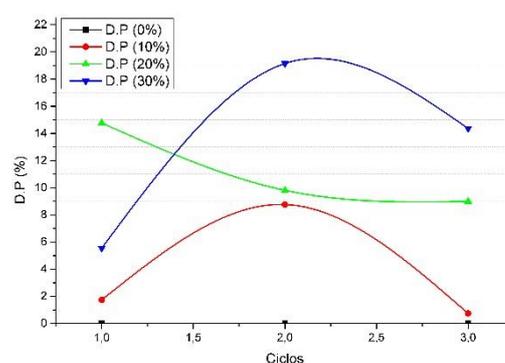
Figura 4.17– Abertura em relação aos ciclos, para a mistura de solo com bentonita, pelos métodos (a) do Operador e (b) Otsu

Novamente, nota-se uma razoável oscilação nos valores definidos unicamente por Otsu, e observa-se uma convergência dos valores médios calculados por meio do operador. Uma indicação interessante é que as aberturas se aproximam de um valor convergente, em torno de 0,35% da dimensão máxima.

A Figura 4.18 representa os valores das aberturas fissuras formadas durante os ciclos em relação à média dos valores. Os valores foram calculados com base em valores percentuais. Na Figura 4.18 (a) estão os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas a partir do limiar de Otsu.



(a)



(b)

Figura 4.18– Abertura em relação aos ciclos, para a mistura de solo com bentonita, pelos métodos do Operador e Otsu

Nas amostras com maior conteúdo de bentonita houve uma maior diversificação dos valores das aberturas, e de forma análoga ao solo puro, o material de maior CIF apresentou também a maior diversidade de valores de aberturas.

### 4.1.3 AREIA ADICIONADA DE DIFERENTES PERCENTUAIS DE BENTONITA.

Das diferentes misturas de solo natural com a bentonita extraíram-se vários dados sobre o comportamento de um solo de argila pouco expansível quando o mesmo é adicionado uma parcela de argila muito expansiva. Para avaliar o impacto da bentonita sobre a matriz de um outro solo que não apresenta nenhuma característica expansiva, a mesma foi adicionada em diferentes percentuais à areia padrão e submetido aos mesmos ciclos de ressecamento do material produzido com solo natural.

As imagens de cada etapa e de cada profundidade. Estão apresentadas na Figura 4.19. O eixo horizontal representa as diferentes proporções de bentonita e o eixo vertical representa os diferentes ciclos.

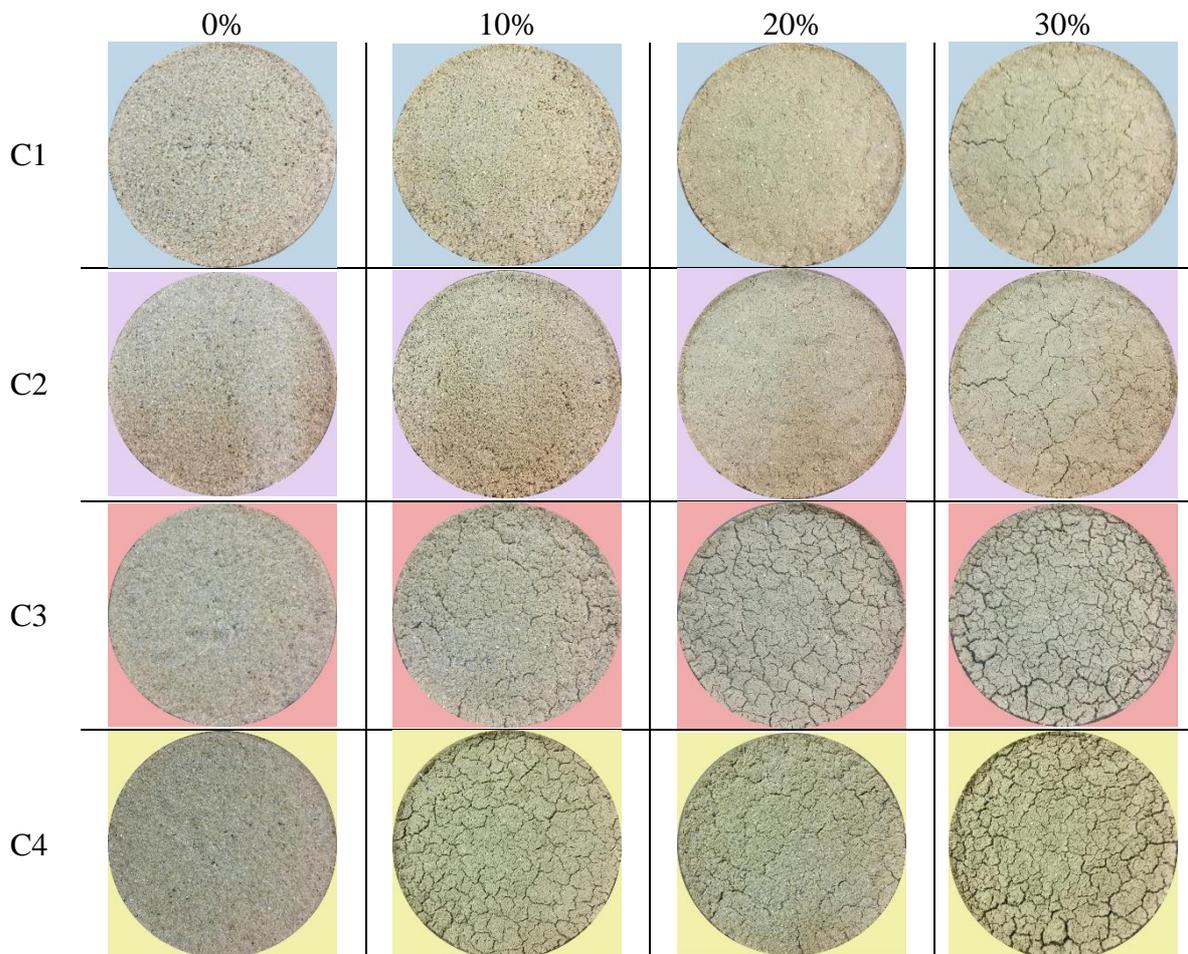


Figura 4.19– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, variando o percentual de bentonita adicionado à areia padrão, onde C1 representa o primeiro ciclo, C2 o segundo, C3 o terceiro e C4 o quarto.

Os valores das aberturas ao longo de todo o comprimento da fissura foram calculadas e apresentadas por meio de um histograma. Na representação dessa distribuição, o eixo vertical apresenta a contagem de pixels, ou elementos de matriz que estejam dentro dos bins representados nos eixos horizontais. Os valores dos bins representam os valores das aberturas das fissuras, em pixels.

Na Figura 4.20 estão representadas as distribuições de aberturas das fissuras em cada ciclo para as diferentes amostras. A Figura 4.21 representa os mesmos dados, mas obtido pelo método automático, ou unicamente com Otsu.

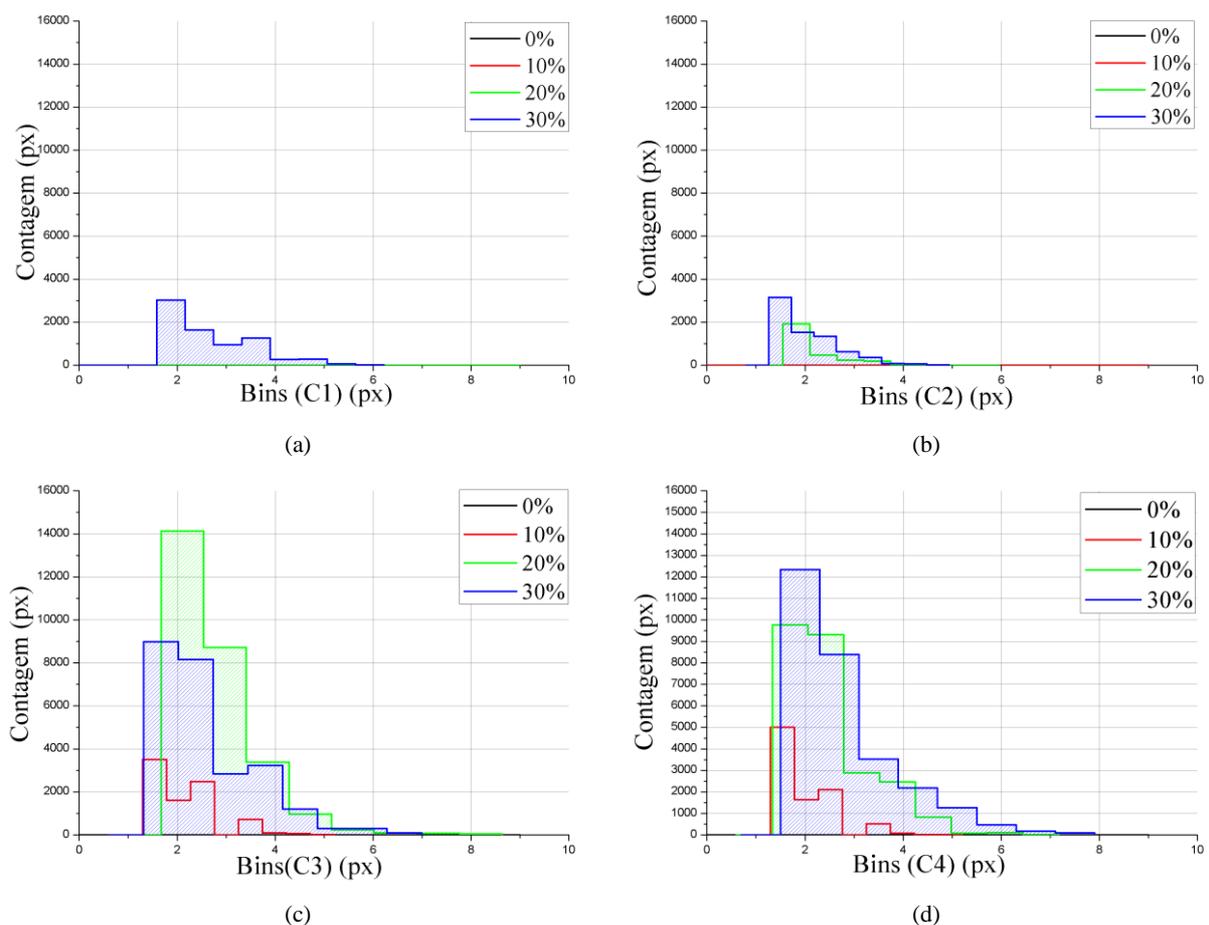


Figura 4.20 – Distribuição das aberturas, variando o percentual de bentonita adicionada à areia, pelo método do operador, onde (a) após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro e (d) após o quarto ressecamento, para as diferentes amostras.

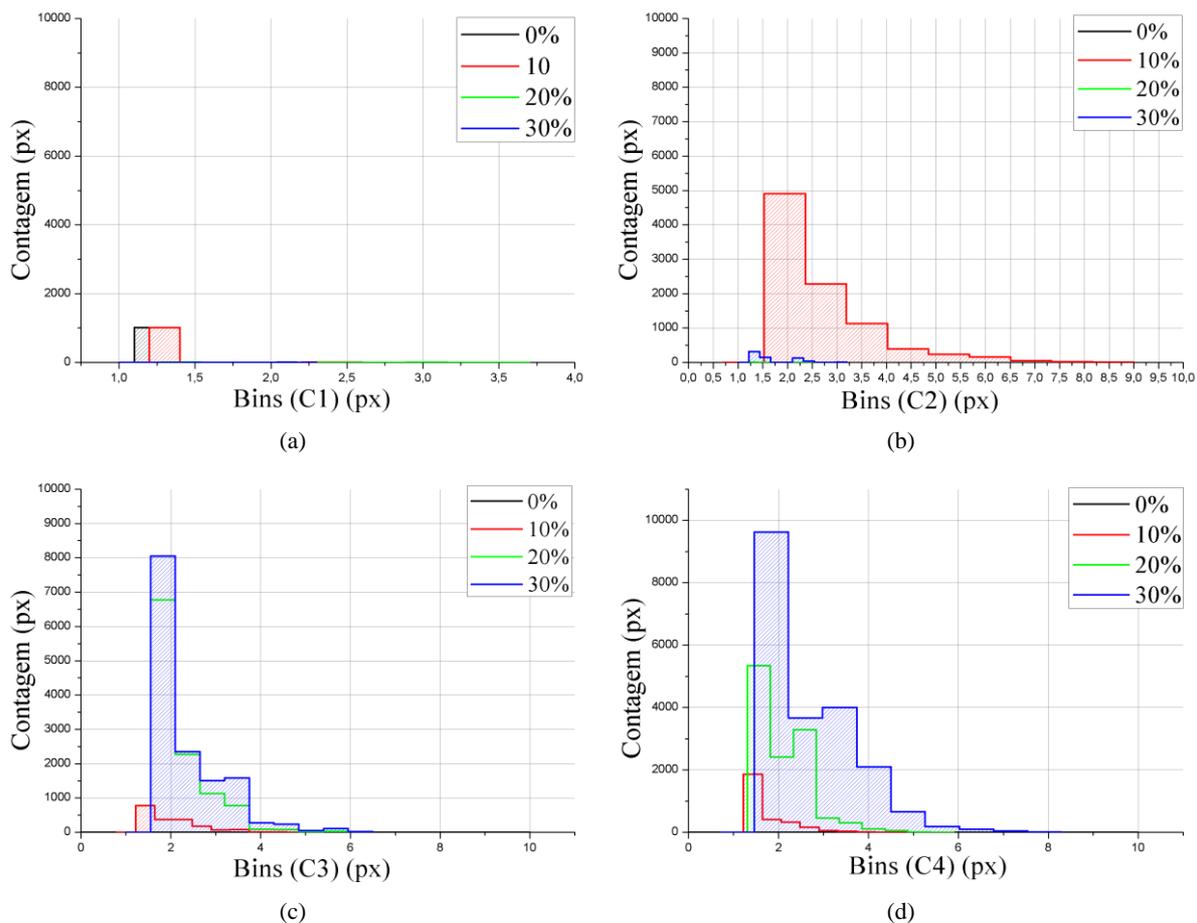


Figura 4.21– Distribuição das aberturas, variando o percentual de bentonita adicionada à areia, pelo método de Otsu onde (a) após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro e (d) após o quarto ressecamento

Nos resultados extraídos de ambas as técnicas, as misturas com menos de 30% de adição de bentonita tiveram maior fissuração em alguns ciclos específicos. Independente da técnica utilizada também pode-se notar que houve um incremento no valor do CIF seguido de uma estabilização ou redução para todos os materiais avaliados, com exceção do solo puro.

Nas Figuras 4.22 e 4.23 estão representadas as distribuições de aberturas das fissuras os histogramas representados nessas figuras apresentam os dados das aberturas referentes a cada amostra individual ao longo dos 4 ciclos de ressecamento.

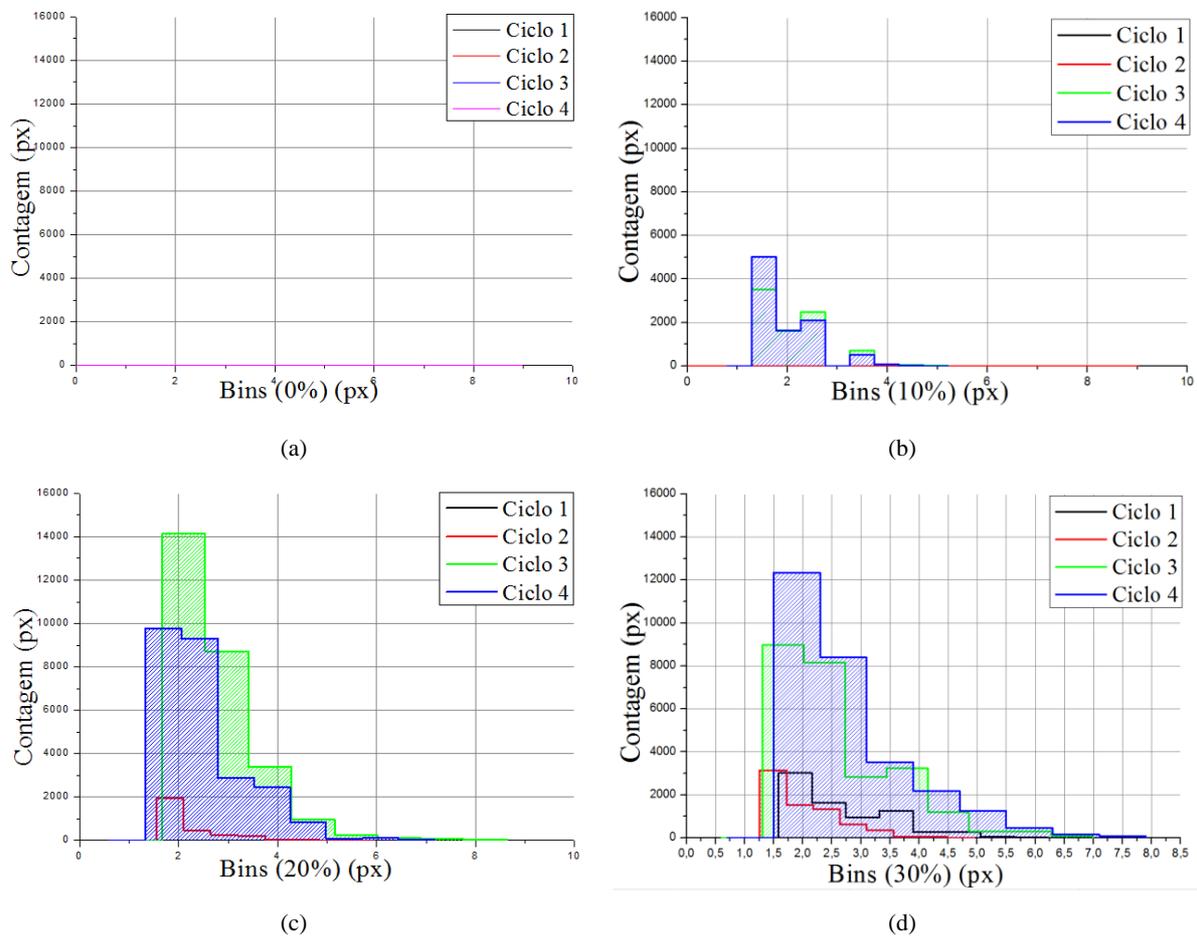


Figura 4.22– Distribuição das aberturas para areia com bentonita, pelo método do Operador sendo que (a) representa a areia adicionada de 0% de bentonita, (b) adição de 10% de bentonita, (c) de 20% de bentonita e (d) de 30% de bentonita.

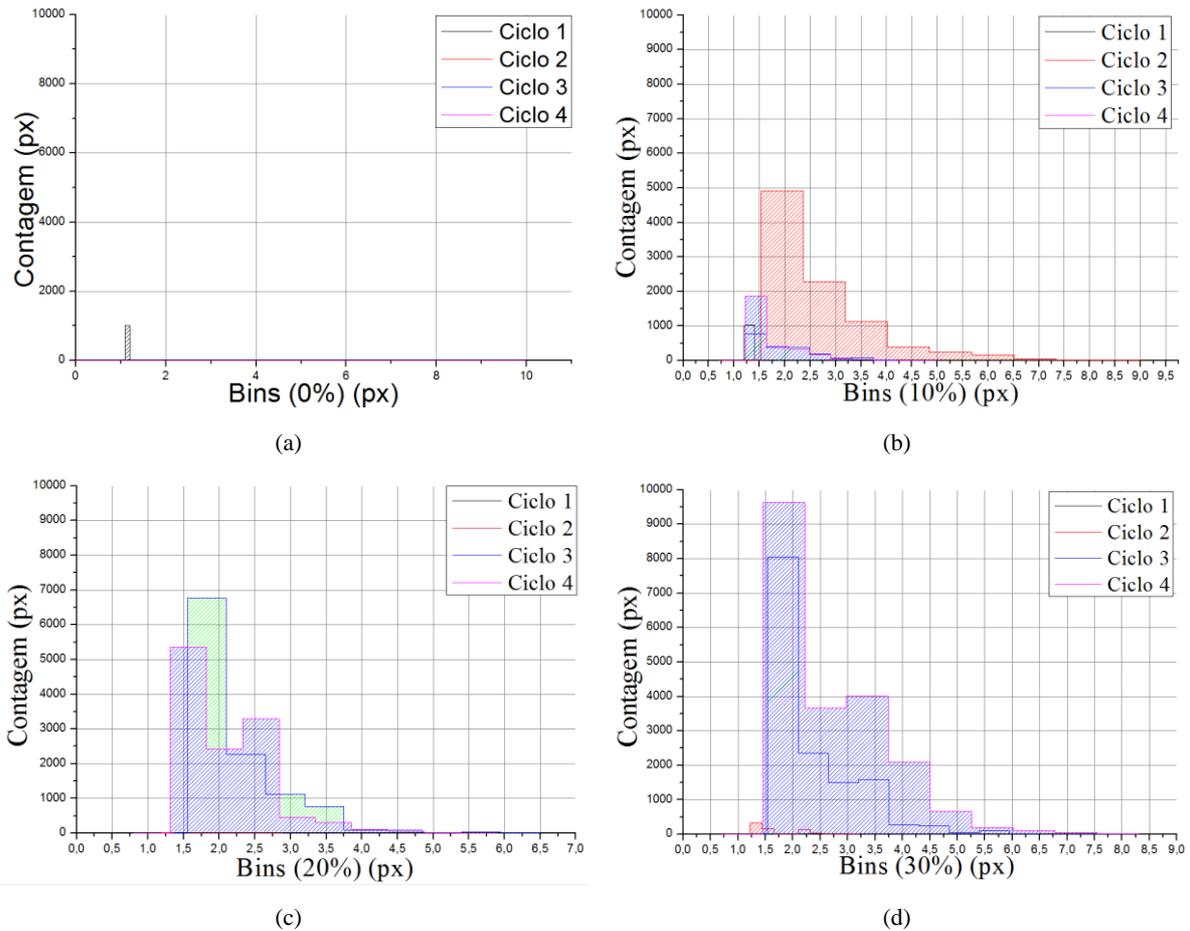


Figura 4.23– Distribuição das aberturas para areia com bentonita, pelo método de Otsu sendo que (a) representa o solo adicionado de 0% de bentonita, (b) adição de 10% de bentonita, (c) de 20% de bentonita e (d) de 30% de bentonita.

Nota-se que os solos com um percentual de bentonita menor que 30% apresentaram as maiores fissuras nos segundos e terceiros ciclos para suas respectivas misturas. Ambos métodos indicaram uma fissuração maior da amostra com 30%, ocorrendo ao final do quarto ciclo. Um comportamento diferente das outras amostras que atingiram seus valores máximos de área fissurada no terceiro ciclo.

A Figura 4.24 representa o percentual da área fissurada em cada um dos ciclos, para cada uma das amostras. Em (a) estão os dados calculados a partir dos resultados do método do operador e em (b) automaticamente pelo método de Otsu.

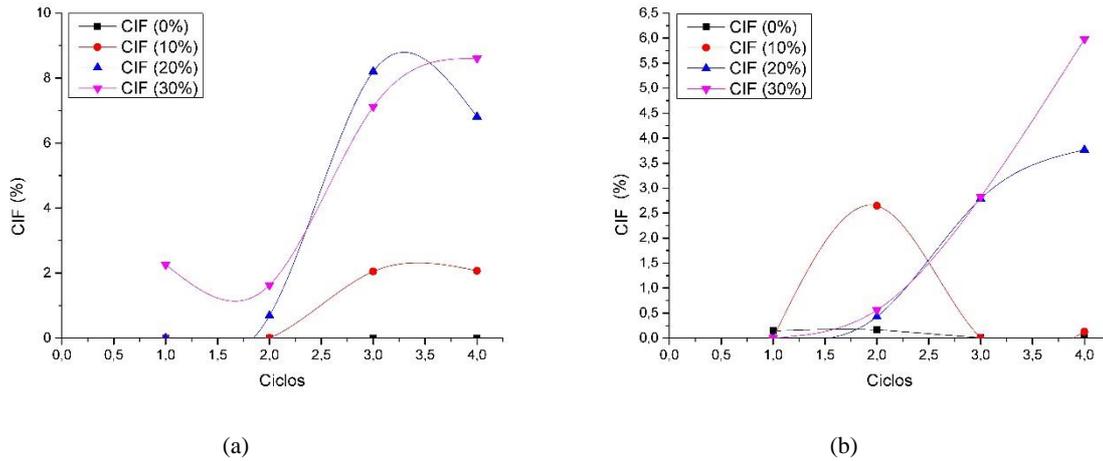


Figura 4.24– CIF em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b)

Os mesmos resultados visualizados nas distribuições se refletem de forma análoga nos valores de CIF. Os materiais com teor menor de 30% atingiram um máximo no segundo e terceiro ciclo, e depois tendem a reduzir em valor a área fissurada. O material com 30% de bentonita atingiu seu provável máximo ao fim do quarto ciclo, com mudança da inflexão na curva.

A Figura 4.25 representa os valores da abertura média das fissuras em relação aos ciclos. Os valores foram calculados em valores percentuais do diâmetro da amostra. Em (a) estão os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas a partir do limiar de Otsu.

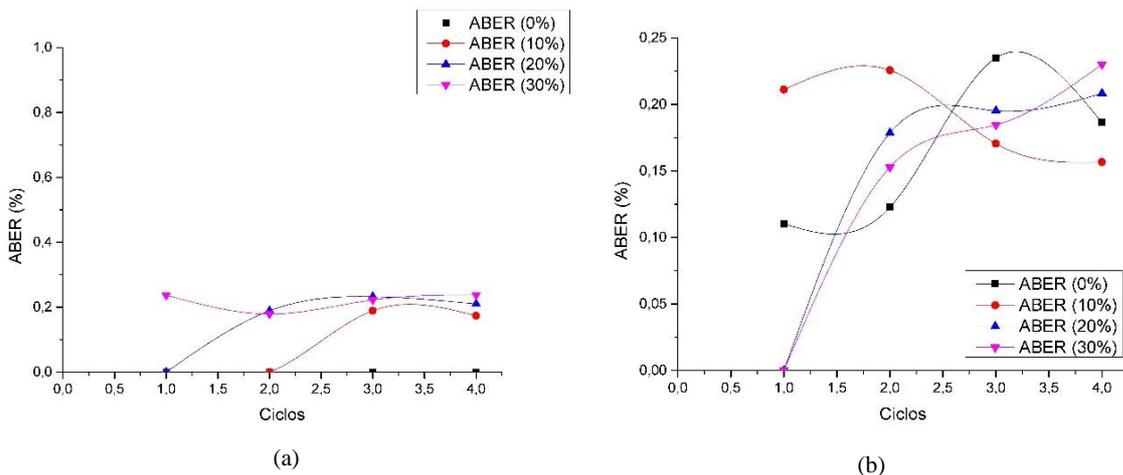


Figura 4.25– Abertura média em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b).

Pode-se perceber que a abertura se inicia em valores diferentes e então converge para um valor médio ao final do quarto ciclo. É importante reiterar que o mesmo fenômeno de convergência de abertura foi observado nas outras amostras.

A Figura 4.26 representa os valores do desvio padrão das aberturas fissuras em relação à média dos valores, representado ao longo dos ciclos. Os valores foram calculados em valores percentuais. Em (a) estão os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas a partir do limiar de Otsu.

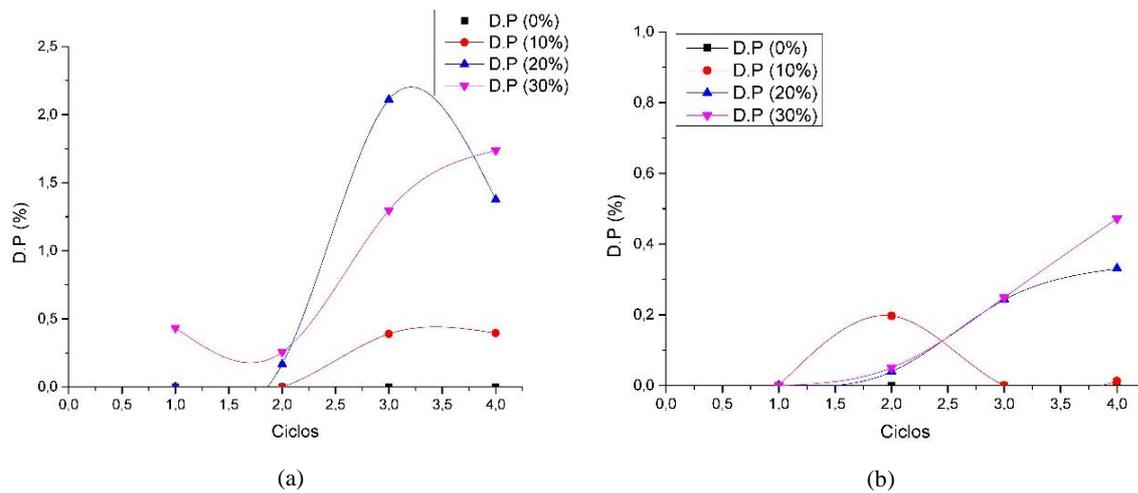


Figura 4.26– Desvio padrão das aberturas em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b)

A variação no desvio padrão em relação à média de abertura segue o mesmo padrão das outras fissuras. Há uma diversificação dos valores com o aumento da área fissurada, mas com uma taxa menor que a convergência dos mesmo a uma média.

#### 4.1.4 MISTURA DE SOLO E BENTONITA UMEDECIDO COM SOLUÇÃO SALINA

O solo de profundidade de 2m foi misturado a 10% de bentonita e compactado nas placas de Petri e exposto aos ciclos de molhagem e ressecamento. Os solos compactados nas placas foram homogeneizados e umedecidos com soluções de sais dissolvidos a uma concentração de 2 g/L de água.

As imagens de cada ciclo de ressecamento e com cada sal dissolvido estão representadas na Figura 4.27 no qual o eixo horizontal representa as diferentes soluções e o eixo vertical representa os diferentes ciclos.

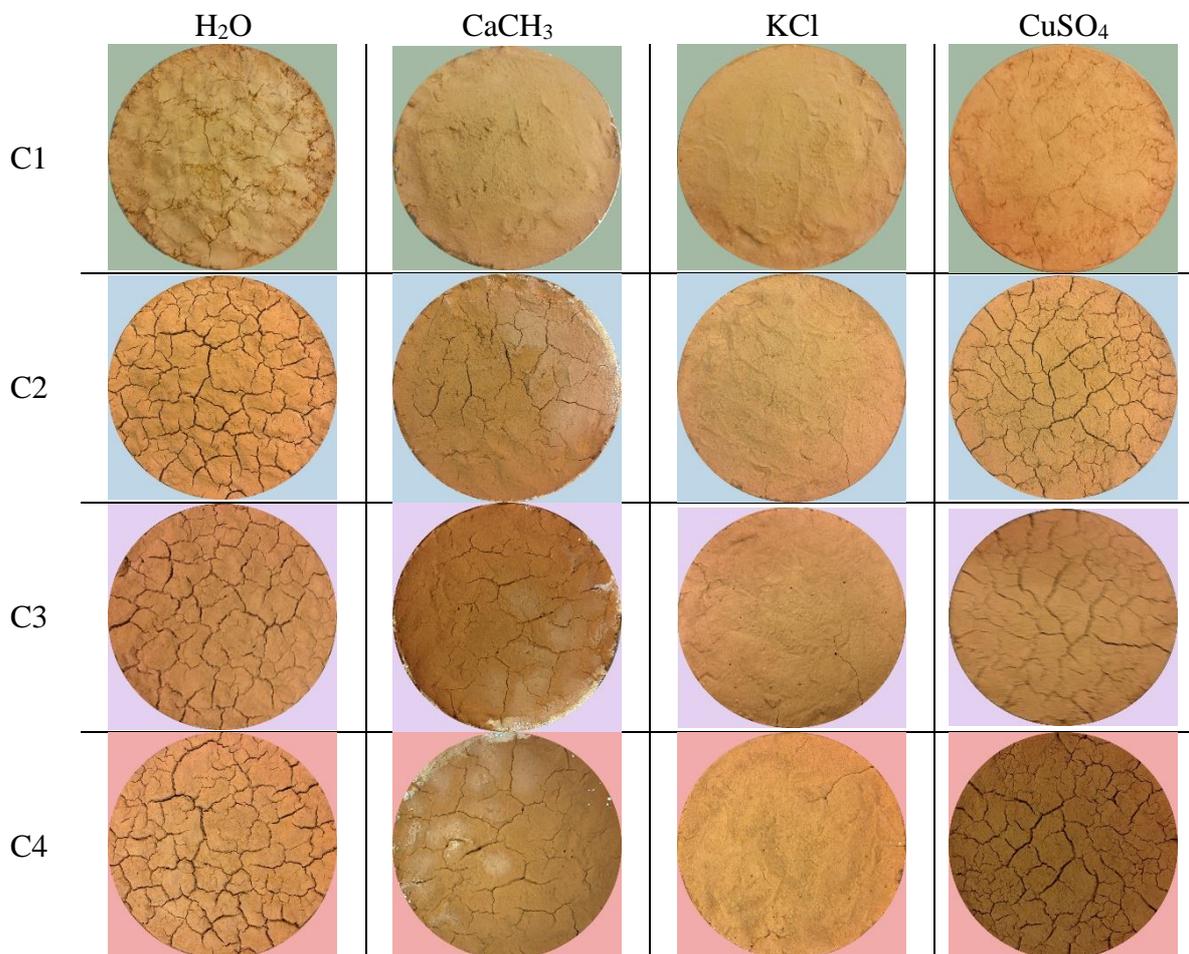


Figura 4.27– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, variando o íon adicionado à mistura com 10% de bentonita.

Os valores das aberturas ao longo de todo o comprimento da fissura foram calculadas e apresentadas por meio de um histograma. Na representação dessa distribuição, o eixo vertical apresenta a contagem de pixels, ou elementos de matriz que estejam dentro dos bins representados nos eixos horizontais. Os valores dos bins representam os valores das aberturas das fissuras, em pixels.

Na Figura 4.28 estão representadas as distribuições de aberturas das fissuras em cada ciclo para as diferentes amostras. A Figura 4.29 representa os mesmos dados, mas obtido pelo método automático, ou unicamente com Otsu.

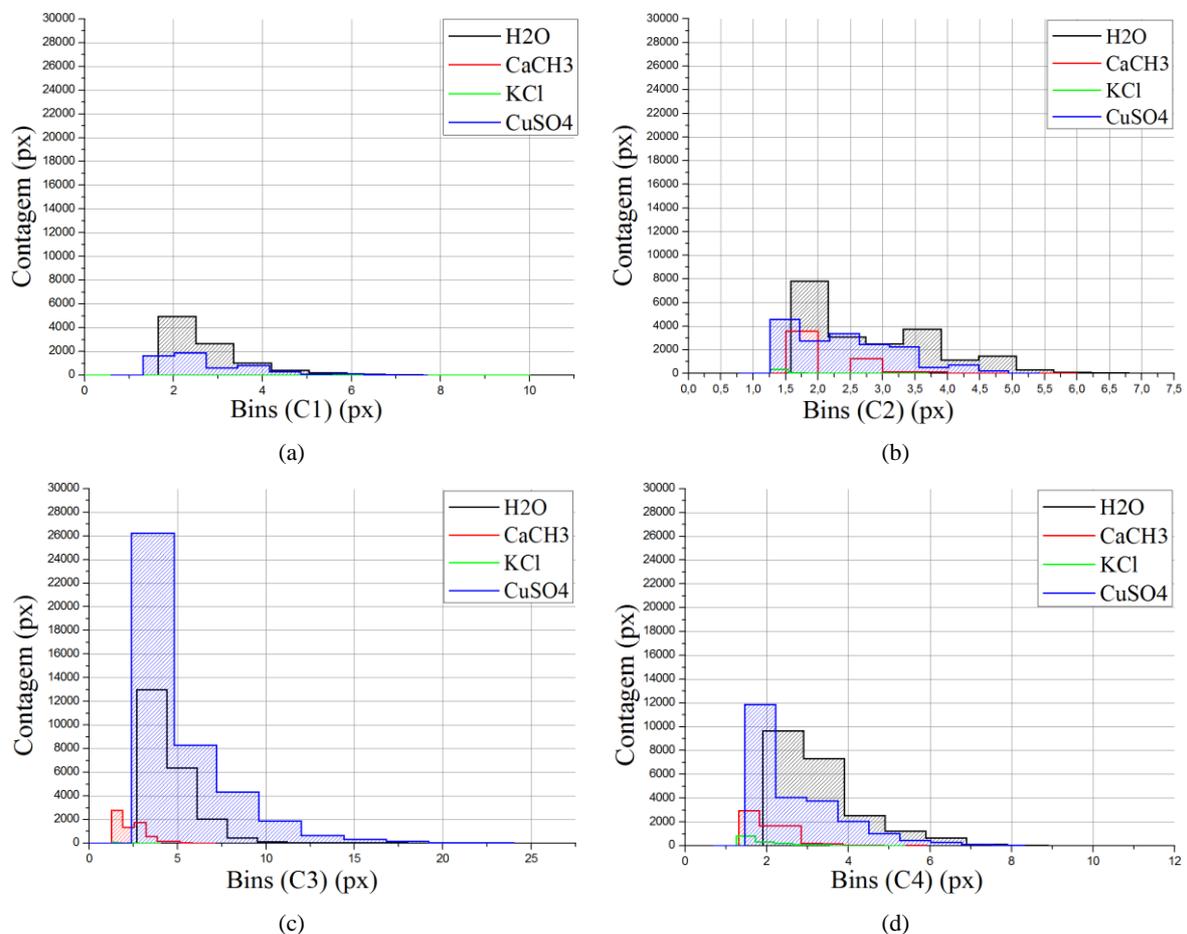


Figura 4.28– Distribuição das aberturas, variando o íon adicionado à mistura com 10% de bentonita, pelo método do operador sendo (a) após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo ciclo e (c) após o terceiro ciclo e (d) após o quarto ciclo do ressecamento.

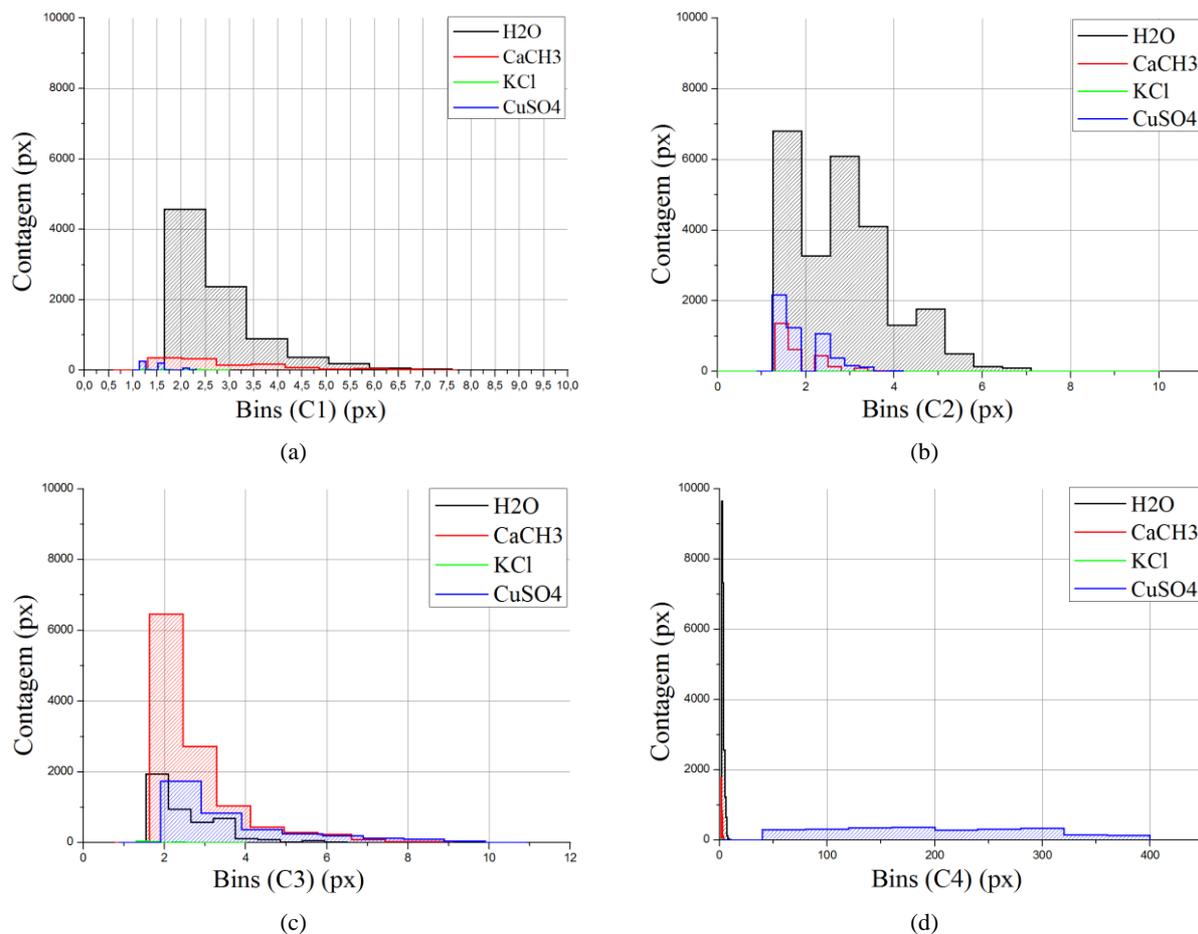


Figura 4.29– Distribuição das aberturas, variando o íon adicionado à mistura com 10% de bentonita, pelo método do Otsu, sendo (a) após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo ciclo e (c) após o terceiro ciclo e (d) após o quarto ciclo do ressecamento.

Observa-se que as maiores aberturas ocorreram nas misturas em que houve a adição de sulfato de cobre II ( $\text{CuSO}_4$ ) e naquela em que não houve adição de nenhuma solução, apenas água destilada. As misturas em que foram adicionadas as soluções de acetato de cálcio e cloreto de potássio manifestaram poucas a nenhuma fissuração.

Nas Figuras 4.30 e 4.31 estão representadas as a distribuições de aberturas das fissuras para cada uma das amostras com sua respectiva solução iônica ao longo dos ciclos. Portanto, mantêm-se a amostra e os histogramas para cada um dos ciclos de ressecamento são representados.

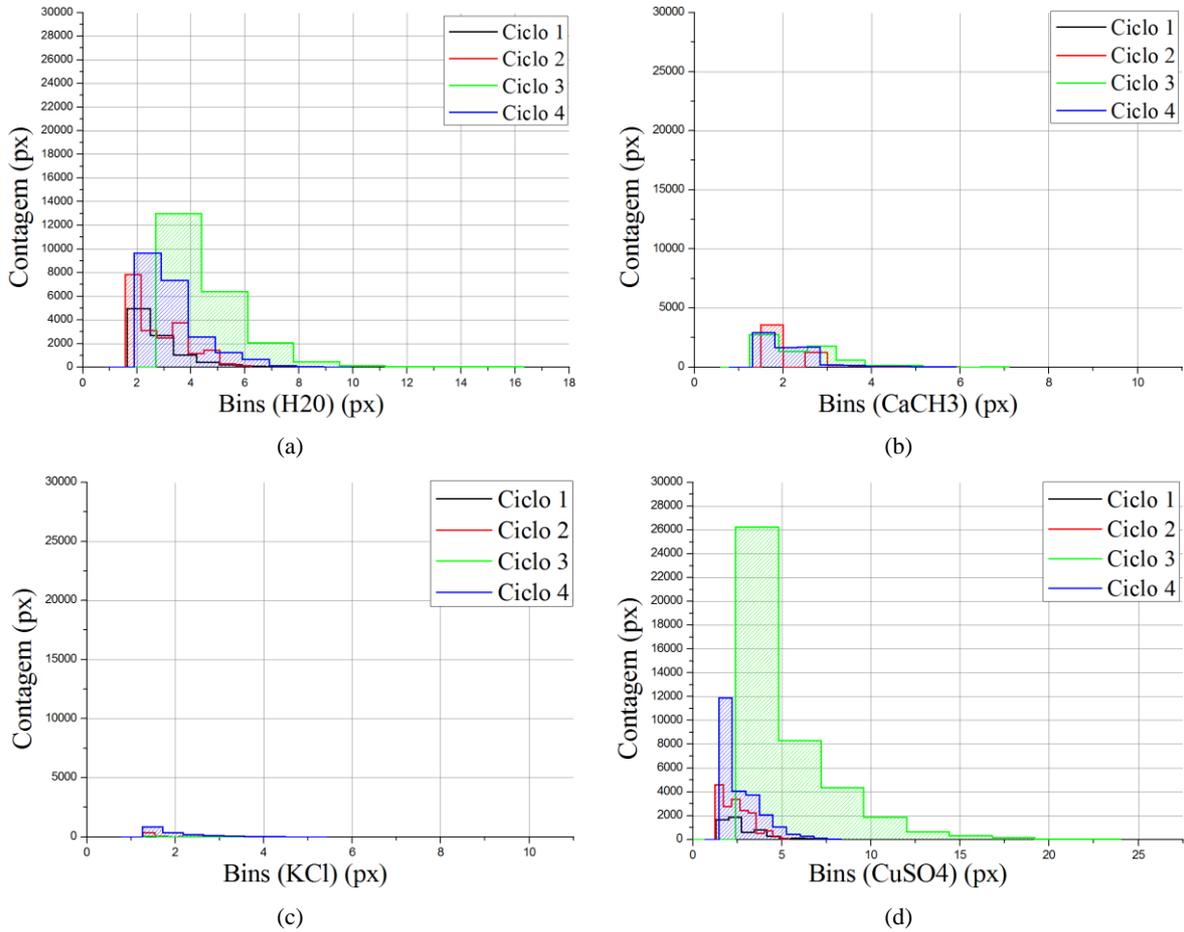


Figura 4.30– Distribuição das aberturas, com uso de solução, pelo método do Operador, sendo que (a) refere-se à mistura umedecida com água destilada, (b) a mistura umedecida com solução de CaCH<sub>3</sub>, (c) a mistura umedecida com solução de KCl e (d) a mistura umedecida com a solução de CuSO<sub>4</sub>.

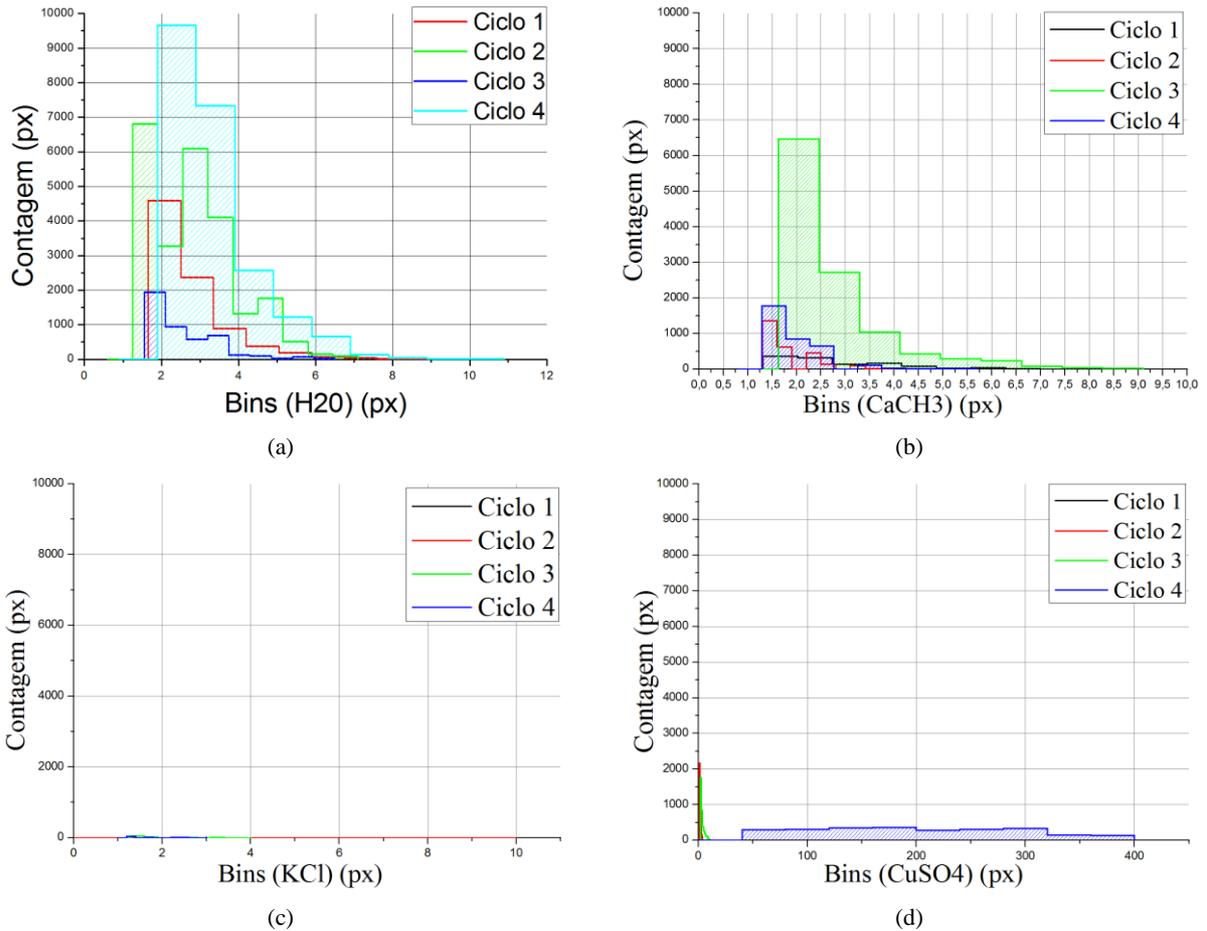


Figura 4.31– Distribuição das aberturas, com uso de solução, pelo método de Otsu, sendo que (a) refere-se à mistura umedecida com água destilada, (b) a mistura umedecida com solução de CaCH<sub>3</sub>, (c) a mistura umedecida com solução de KCl e (d) a mistura umedecida com a solução de CuSO<sub>4</sub>

Verificou-se que todas as amostras, indiferente à solução adicionada, apresentaram sua máxima fissuração em ciclos diferentes do último, indicando novamente a mesma tendência à estabilização verificada em outras análises em outros tipos de amostras. Os resultados obtidos por Otsu ainda são mais distantes do esperado para as imagens individuais.

A Figura 4.32 representa então o percentual da área fissurada em cada um dos ciclos, para cada uma das amostras, calculados (a) a partir dos resultados do método do operador e (b) obtidos automaticamente pelo método de Otsu.

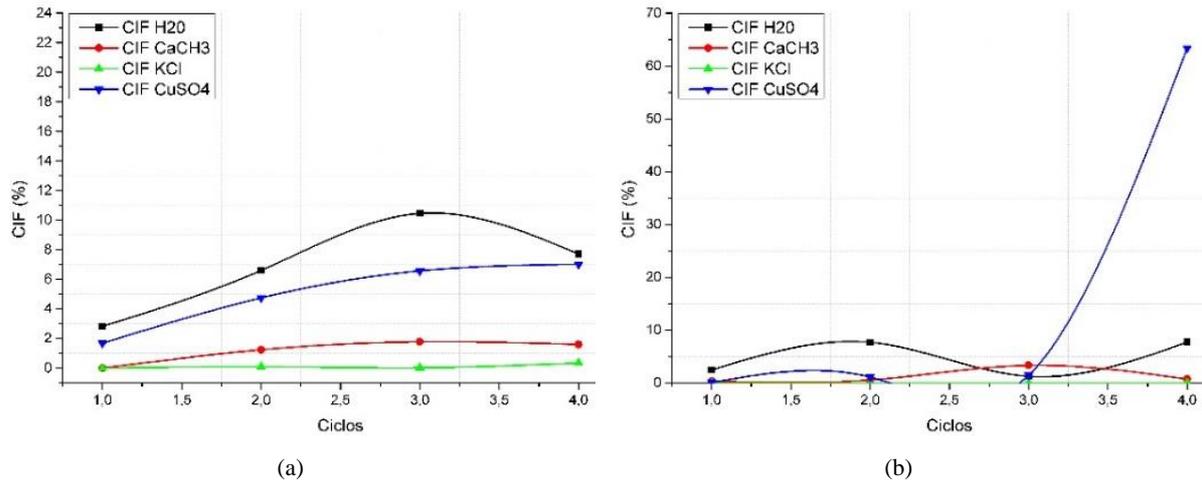


Figura 4.32– CIF em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b).

Percebe-se que a tendência à estabilização referida anteriormente se reflete nos valores de CIF obtidos e pode-se observar que os valores atingem um máximo ao final do terceiro ciclo e tendem a se estabilizar. É importante comentar que o material com a água pura sofreu a maior fissuração em todas as etapas, seguido da amostra com  $\text{CuSO}_4$ . O método de Otsu, no entanto, apresentou um erro grosseiro para a amostra com sulfato de cobre, mas em seus outros pontos foi consistente.

A Figura 4.33 representa os valores da abertura média das fissuras em relação aos ciclos. Os valores foram calculados em valores percentuais do diâmetro da amostra. Em (a) estão os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas a partir do limiar de Otsu.

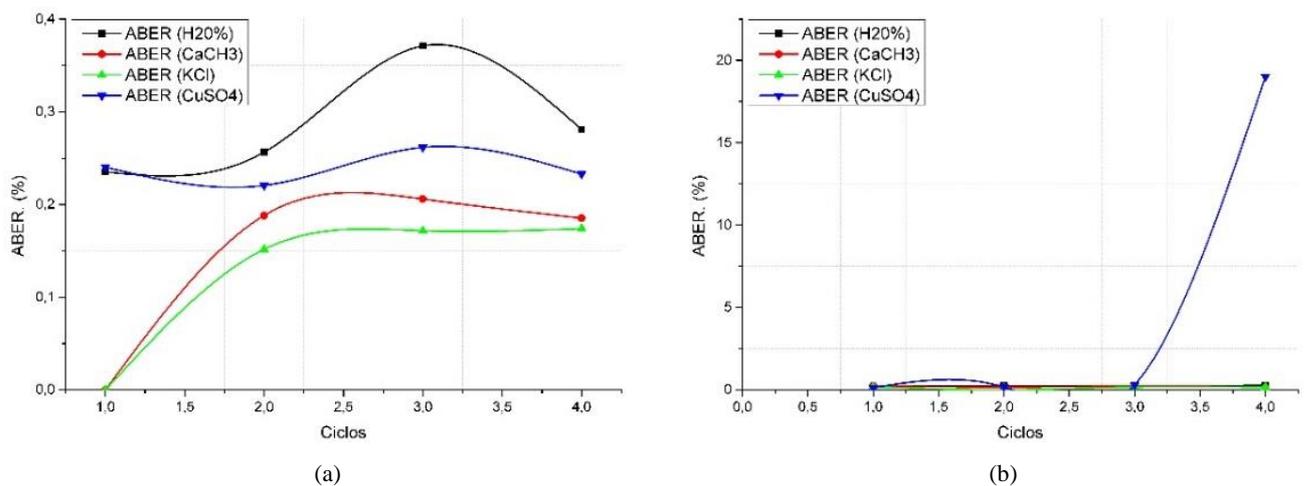


Figura 4.33– Abertura média em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em

(b)

A mesma tendência à forma abertura de fissuras se manifesta nessas amostras: uma convergência de valores de abertura para um valor que gravita em torno de 0,20% da máxima dimensão da placa de Petri.

A Figura 4.34 representa os valores do desvio padrão das aberturas fissuras em relação à média dos valores, representado ao longo dos ciclos. Os valores foram calculados em valores percentuais. Em (a) estão os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas a partir do limiar de Otsu.

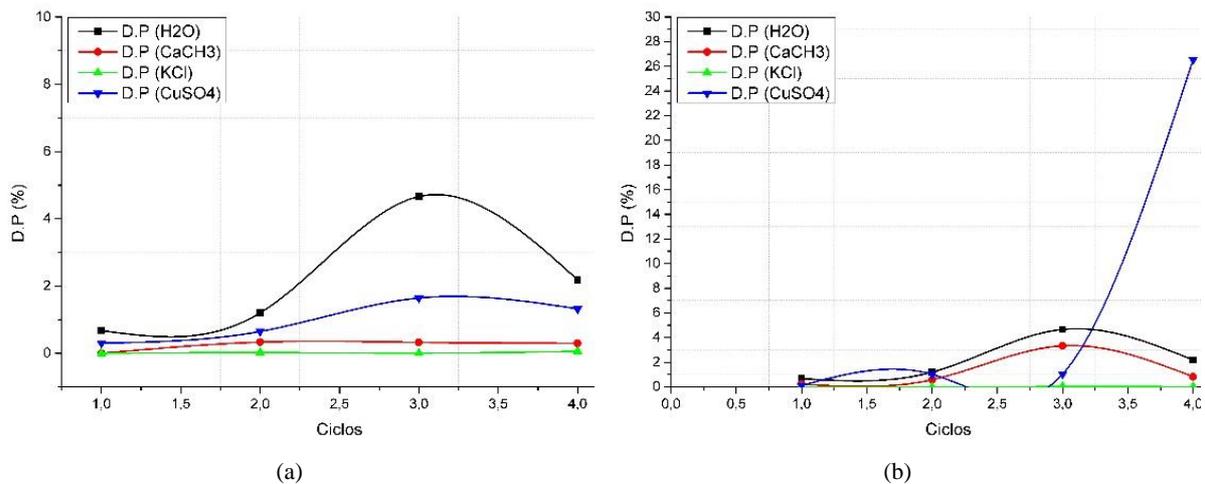


Figura 4.34– Desvio padrão das aberturas em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b)

De forma similar às anteriores, os valores do desvio padrão indicam a diversificação das aberturas ao longo do aumento do CIF. Os valores dessas duas variáveis apresentam uma relação direta, mas não necessariamente causal ou linear.

#### 4.1.5 MISTURA DE AREIA E BENTONITA UMEDECIDA COM SOLUÇÃO SALINA

A areia padrão foi misturada a 20% de bentonita, seca em massa e compactada nas placas de Petri para então serem expostas aos ciclos de molhagem e ressecamento. Os solos foram umedecidos com soluções de sais dissolvidos a uma concentração de 2 g/L de água.

As imagens de cada etapa e com cada sal estão representadas na Figura 4.35, no qual o eixo horizontal representa as diferentes soluções e o eixo vertical representa os diferentes ciclos.

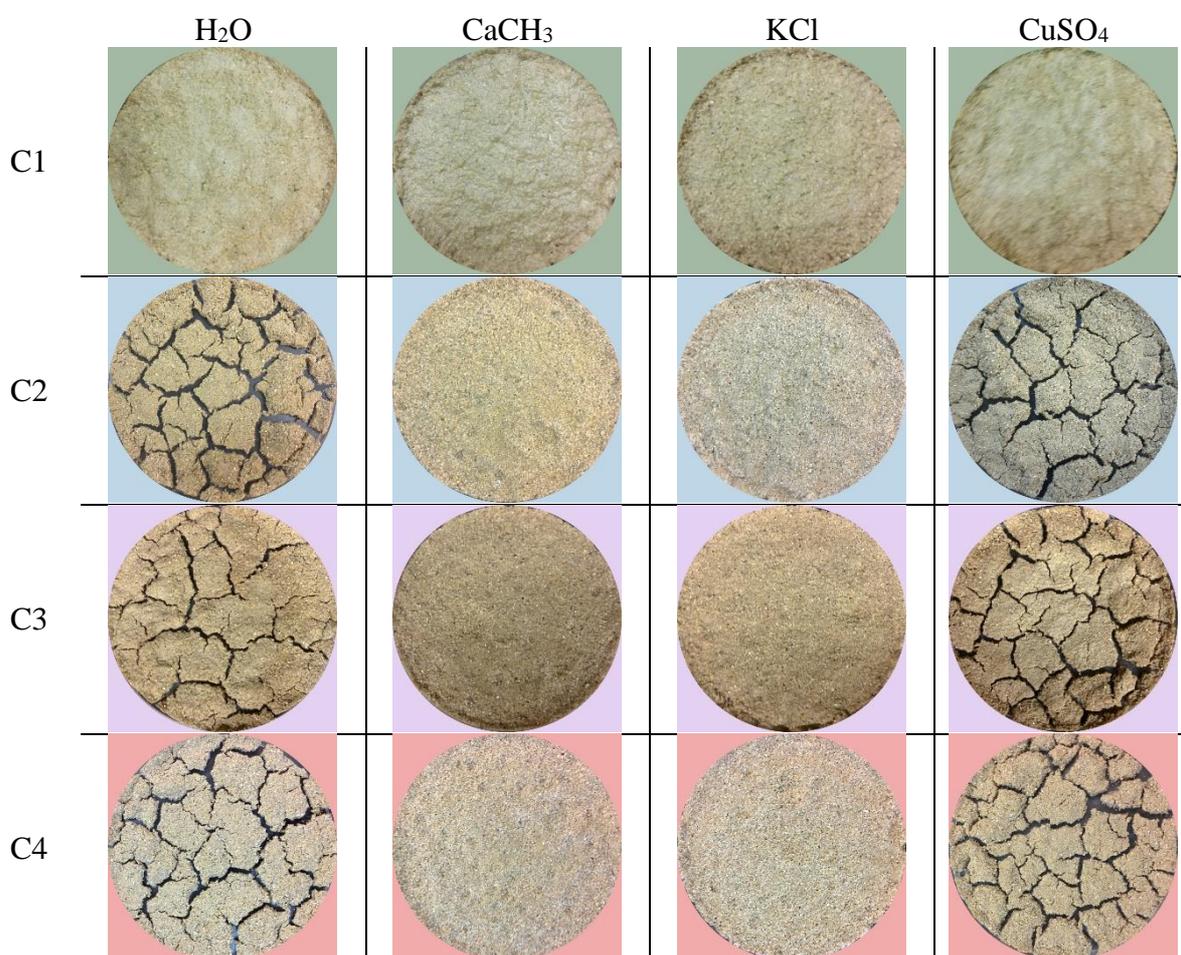


Figura 4.35– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, o íon adicionado à mistura de areia padrão com bentonita a 20% da massa seca, onde C1 representa o primeiro ciclo, C2 o segundo, C3 o terceiro e C4 o quarto.

Os valores das aberturas ao longo de todo o comprimento da fissura foram calculadas e apresentadas por meio de um histograma. Na representação dessa distribuição, o eixo vertical apresenta a contagem de pixels, ou elementos de matriz que estejam dentro dos bins representados nos eixos horizontais. Os valores dos bins representam os valores das aberturas das fissuras, em pixels.

Na Figura 4.36 estão representadas as distribuições de aberturas das fissuras em cada ciclo para as diferentes amostras. A Figura 4.37 representa os mesmos dados, mas obtido pelo método automático, ou unicamente com Otsu.

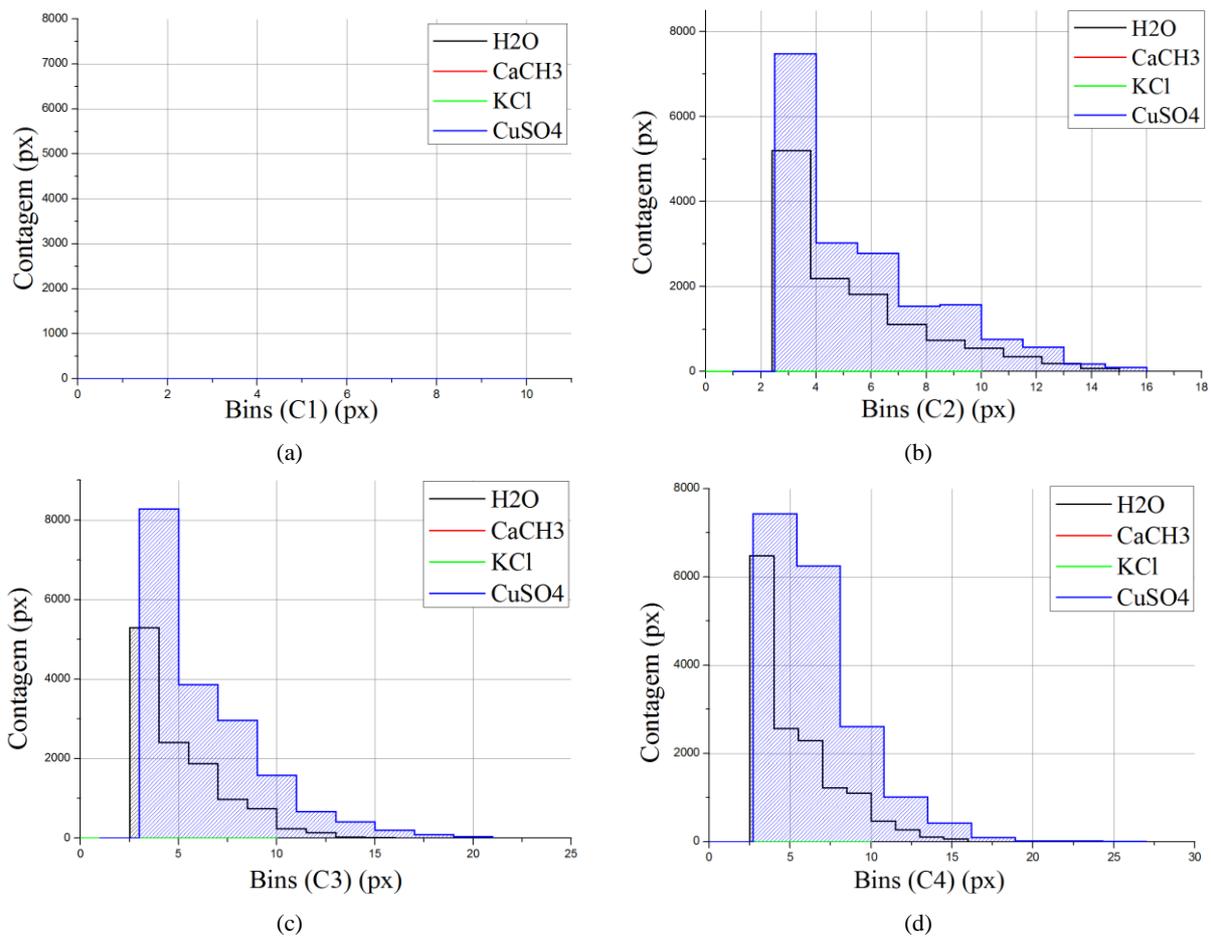


Figura 4.36– Distribuição das aberturas, variando o íon adicionado à mistura de areia padrão com bentonita a 20% da massa seca, pelo método do operador, sendo que (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo ciclo e (c) após o terceiro ciclo e (d) após o quarto ciclo do ressecamento.

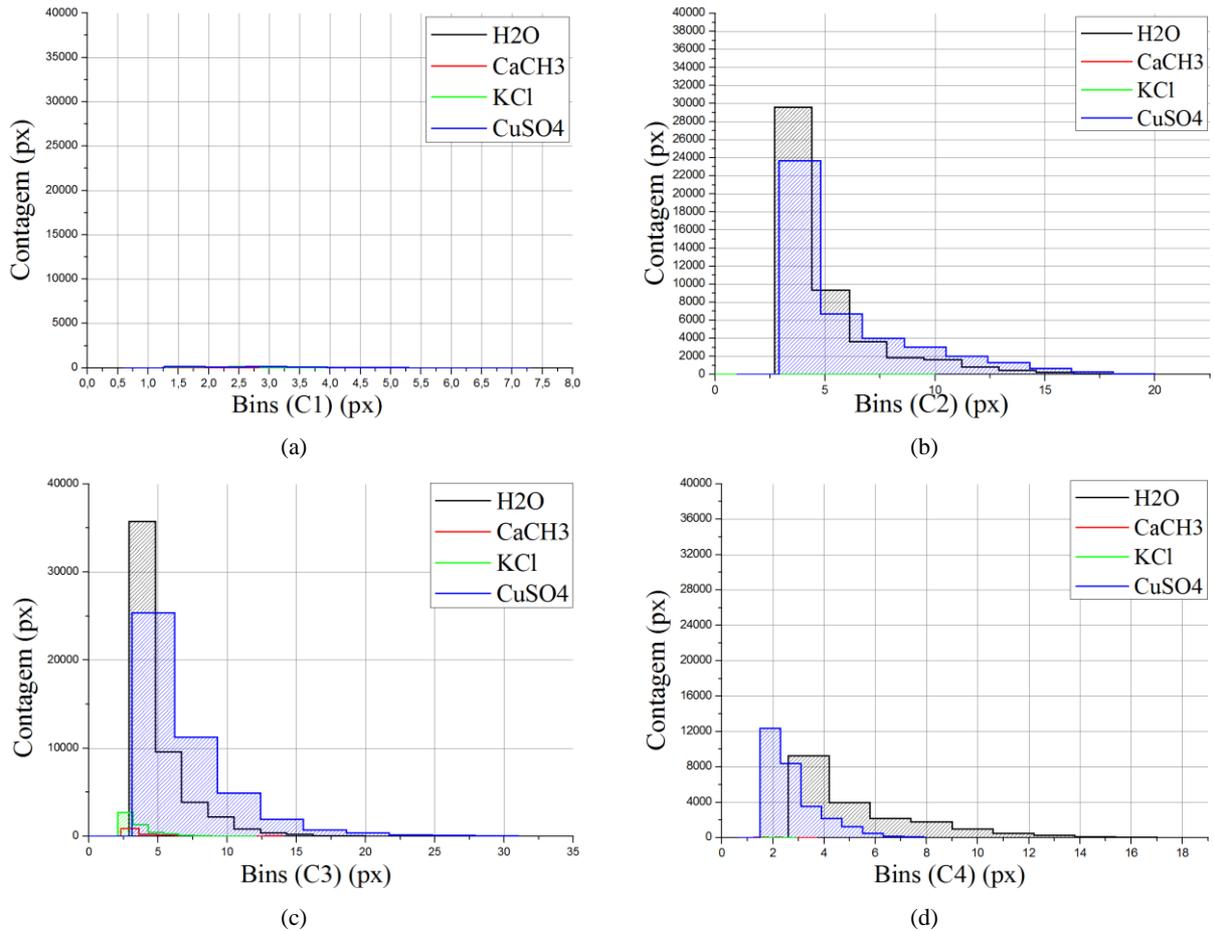


Figura 4.37– Distribuição das aberturas, variando o íon adicionado à mistura de areia padrão com bentonita a 20% da massa seca, pelo método de Otsu, , sendo que (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo ciclo e (c) após o terceiro ciclo e (d) após o quarto ciclo do ressecamento...

De forma diferente do solo com bentonita, a areia adicionada ao mesmo apresentou maiores fissuras na solução com sulfato de cobre. Esse resultado se repete tanto para os resultados a partir do operador como os obtidos por Otsu.

Nas Figuras 4.38 e 4.39 estão representadas as distribuições de aberturas das fissuras para uma única amostra do grupo de areias e solução iônica. Cada gráfico contém os histogramas de todos os ciclos para cada uma dessas amostras, pelos dois métodos.

Os histogramas dessas aberturas se referem à areia padrão que foi misturada a 20% de bentonita e compactada nas placas de Petri adicionada das diferentes soluções de sal.

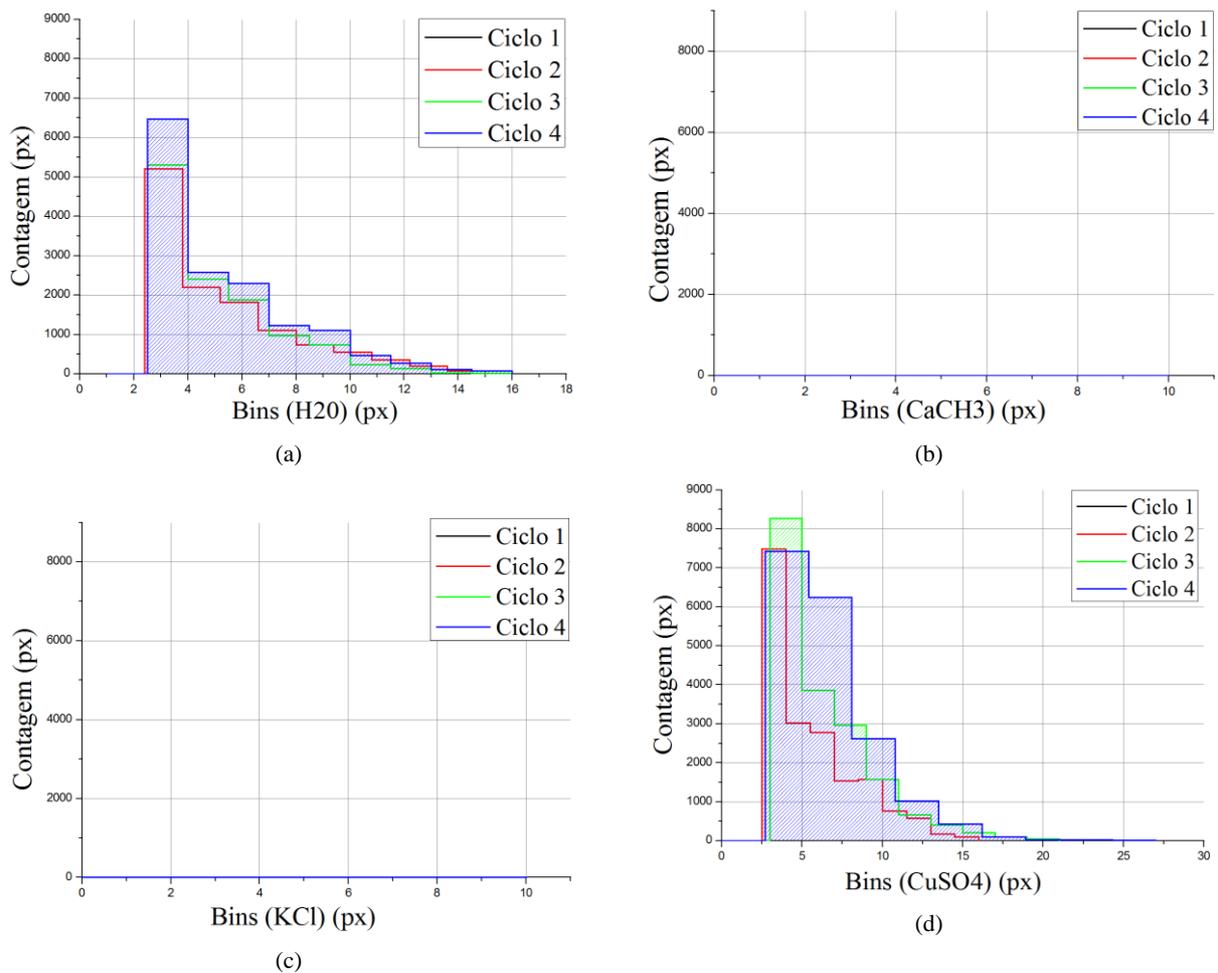


Figura 4.38– Distribuição das aberturas, em vários ciclos, para uma mesma amostra, pelo método do operador sendo que (a) representa a mistura umedecida com água destilada, (b) umedecida com solução de CaCH<sub>3</sub>, (c) umedecida com a solução de KCl e (d) umedecida com a solução de CuSO<sub>4</sub>.

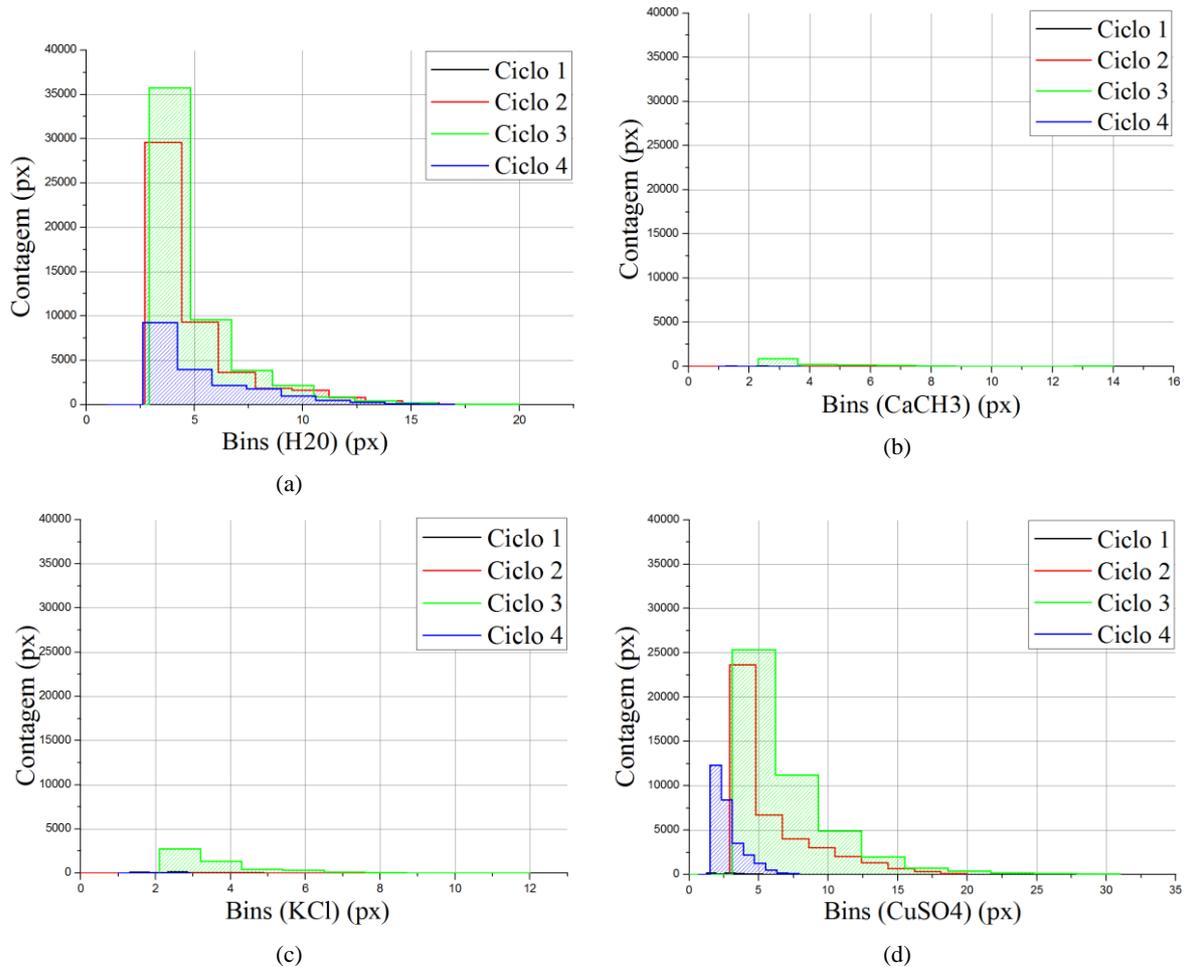


Figura 4.39– Distribuição das aberturas, em vários ciclos, para uma mesma amostra, por Otsu, sendo que (a) representa a mistura umedecida com água destilada, (b) umedecida com solução de  $\text{CaCH}_3$ , (c) umedecida com a solução de  $\text{KCl}$  e (d) umedecida com a solução de  $\text{CuSO}_4$ .

Observa-se que houve uma progressão de todos os valores nos resultados obtidos pelo operador, atingindo valores similares de abertura nos terceiros e quarto ciclos. Quando somente Otsu era usado, todos os materiais manifestaram a máxima fissuração no terceiro ciclo, seguido de uma redução no quarto ciclo.

A Figura 4.40 representa então o percentual da área fissurada em cada um dos ciclos, para cada uma das amostras. Em (a) estão os dados calculados a partir dos resultados do método do operador e em (b) automaticamente pelo método de Otsu.

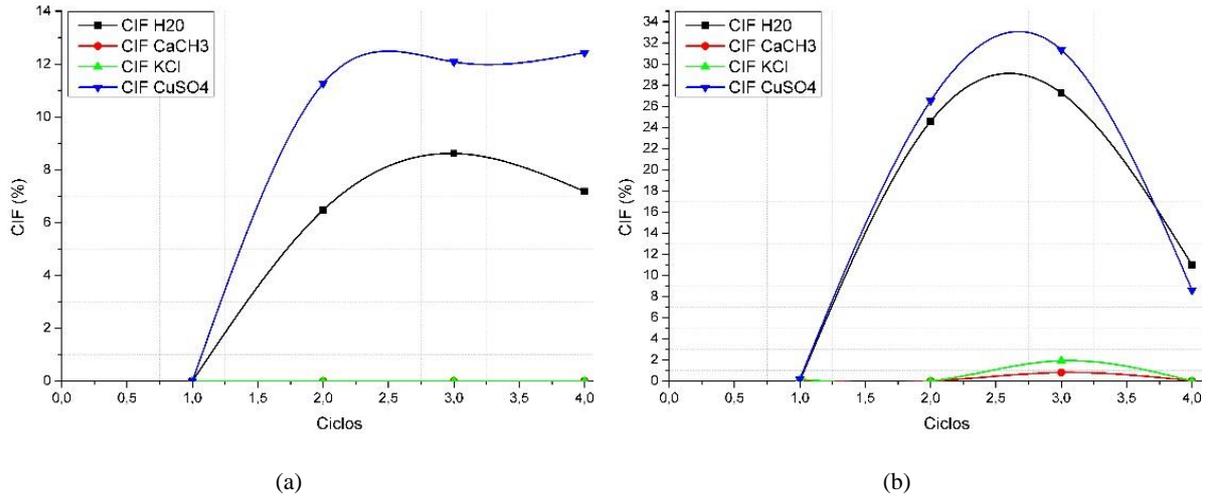


Figura 4.40– CIF em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b)

Os mesmos resultados observados nos histogramas se repetem na análise do CIF. A área fissurada aumenta até certo valor, de 8% a 12% e estabiliza, em torno dos mesmos. O mesmo ocorre para a análise somente por Otsu, mas com valores diferentes, de 28% a 34%.

É interessante notar que os resultados com a solução de sulfato de cobre geraram maior fissuração que o uso da água destilada, resultado diferente do obtido com a mistura de solo com bentonita.

A Figura 4.41 representa os valores da abertura média das fissuras em relação aos ciclos. Os valores foram calculados em valores percentuais do diâmetro da amostra. Em (a) estão os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas a partir do limiar de Otsu.

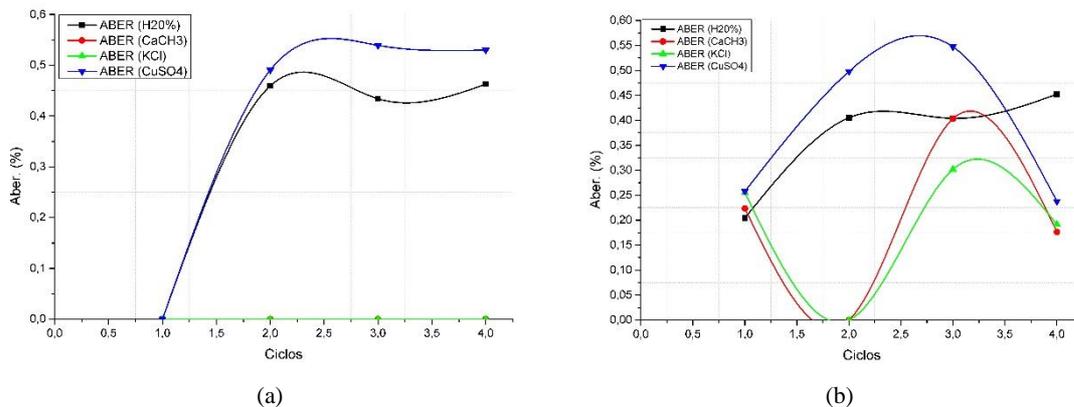


Figura 4.41– Abertura média em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador e Otsu

Pelo método do operador, percebe-se que os valores de abertura média crescem até certo ponto e se estabilizam. Ao contrário do observado na amostra de solo com bentonita, no qual as aberturas eram em torno de 0,20% a 0,25% e as amostras de areia com bentonita se aproximaram 0,5% a 0,6%, indicando uma maior influência do solo ao qual a argila expansível foi misturada.

Os resultados obtidos unicamente por Otsu mostraram uma queda nos valores médios para todas as amostras, indicando que nessa situação, uma amostra bem fissurada, o método se torna mais confiável.

A Figura 4.42 representa os valores do desvio padrão das aberturas fissuras em relação à média dos valores, representado ao longo dos ciclos. Os valores foram calculados em valores percentuais. Em (a) estão os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas a partir do limiar de Otsu.

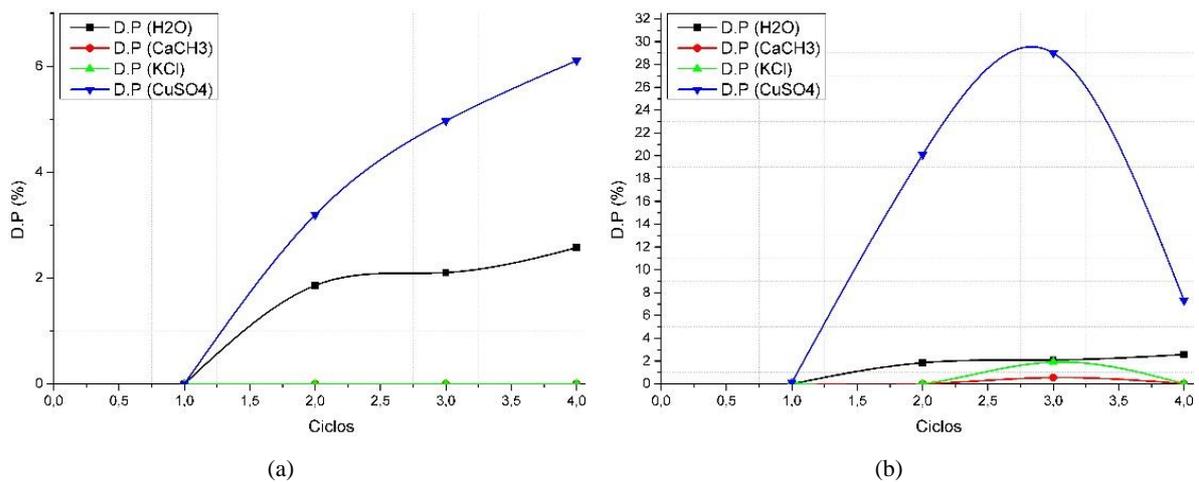


Figura 4.42– Desvio padrão das aberturas em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador e Otsu

#### 4.1.6 MISTURA COM SOLO NATURAL E BENTONITA E VARIANDO A ENERGIA DE COMPACTAÇÃO

Neste item são apresentados os resultados relativos a mistura de solo com 10% de bentonita e compactado nas placas de Petri, com diferentes energias de compactação e exposta aos ciclos de molhagem e ressecamento.

As imagens de cada etapa e com a respectiva energia de compactação estão representadas na Figura 4.43 no qual o eixo horizontal representa as diferentes energias e o eixo vertical representa os diferentes ciclos.

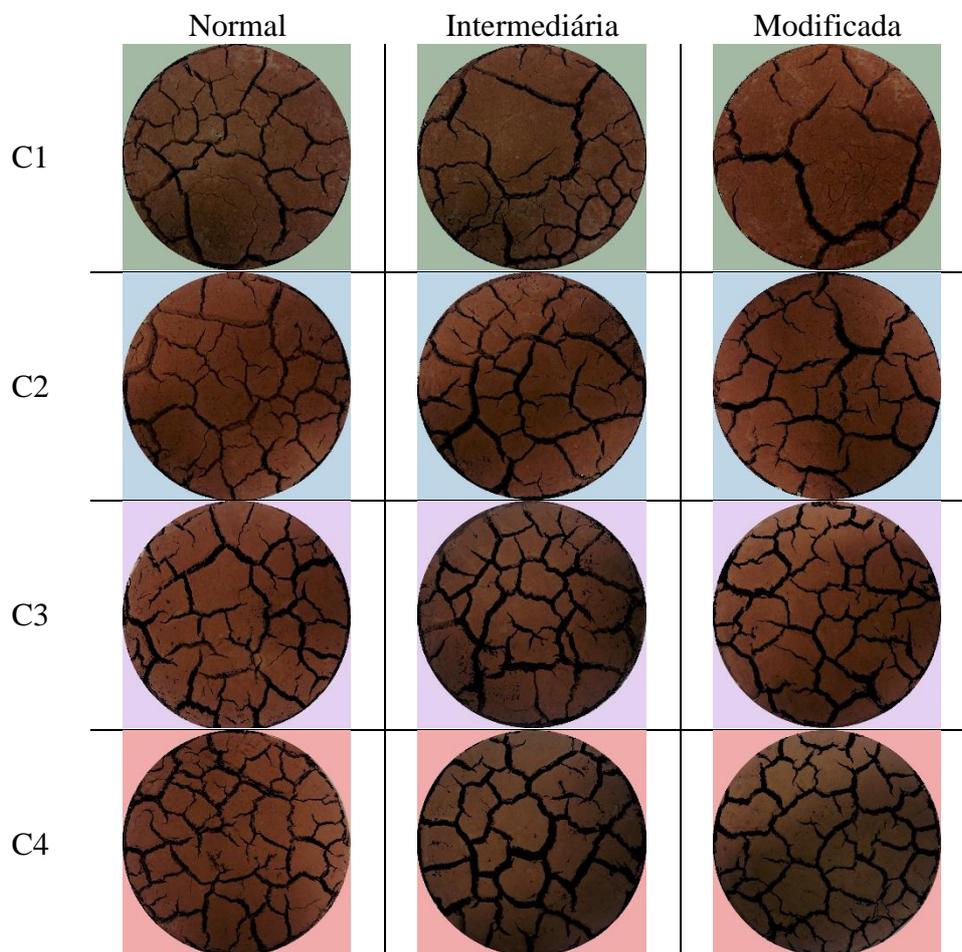


Figura 4.43– Imagens de cada amostra em cada um dos ciclos avaliados, variando a energia de compactação sobre a mistura de solo e 10% de bentonita em massa seca, onde C1 representa o primeiro ciclo, C2 o segundo, C3 o terceiro e C4 o quarto.

Os valores das aberturas ao longo de todo o comprimento da fissura foram calculadas e apresentadas por meio de um histograma. Na representação dessa distribuição, o eixo vertical apresenta a contagem de pixels, ou elementos de matriz que estejam dentro dos bins representados nos eixos horizontais. Os valores dos bins representam os valores das aberturas das fissuras, em pixels.

Na Figura 4.44 estão representadas as distribuições de aberturas das fissuras em cada ciclo para as diferentes amostras. A Figura 4.45 representa os mesmos dados, mas obtido pelo método automático, ou unicamente com Otsu.

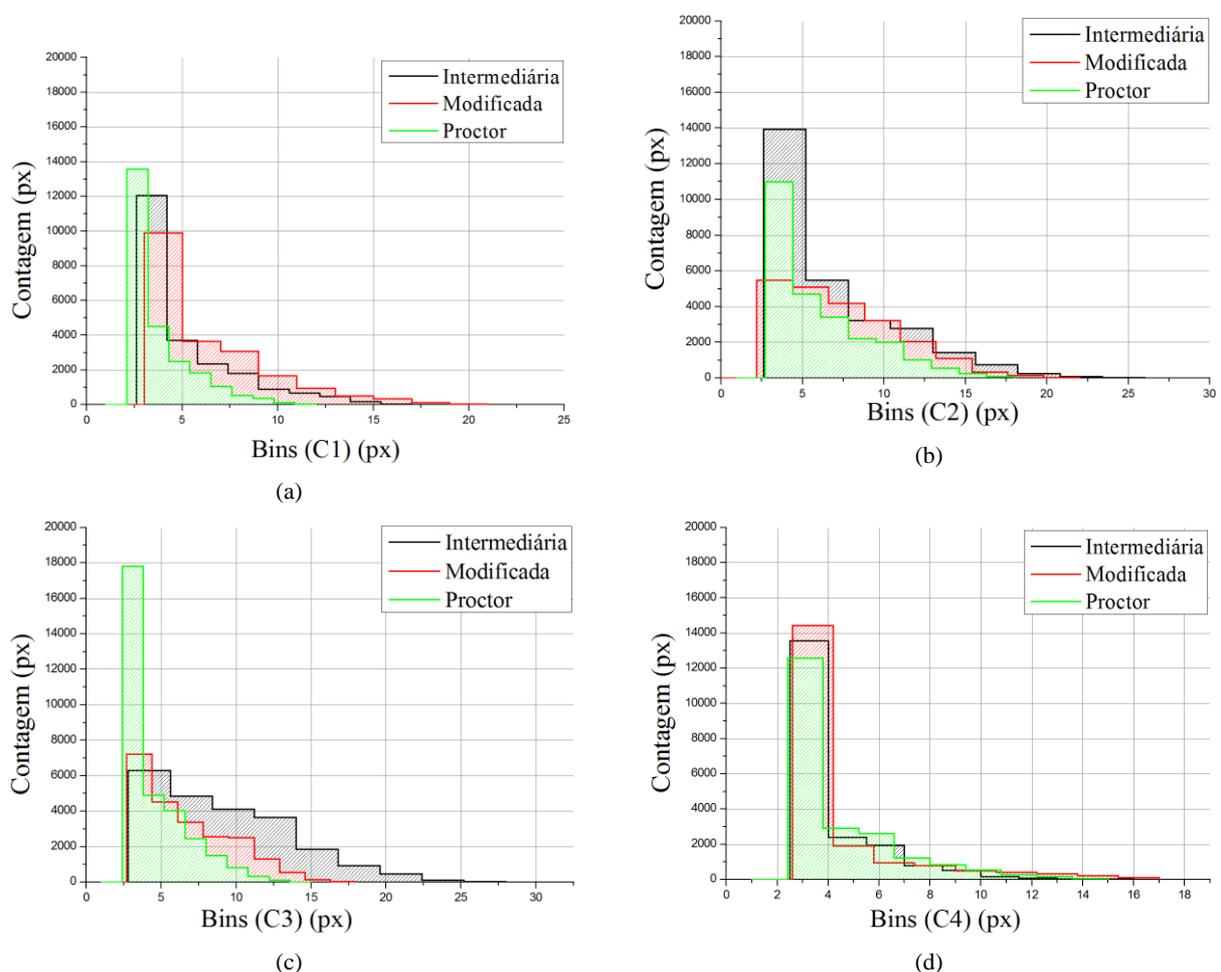


Figura 4.44– Distribuição das aberturas, variando a energia de compactação sobre a mistura de solo e 10% de bentonita, pelo método do operador, sendo (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro e (d) após o quarto ciclo do ressecamento.

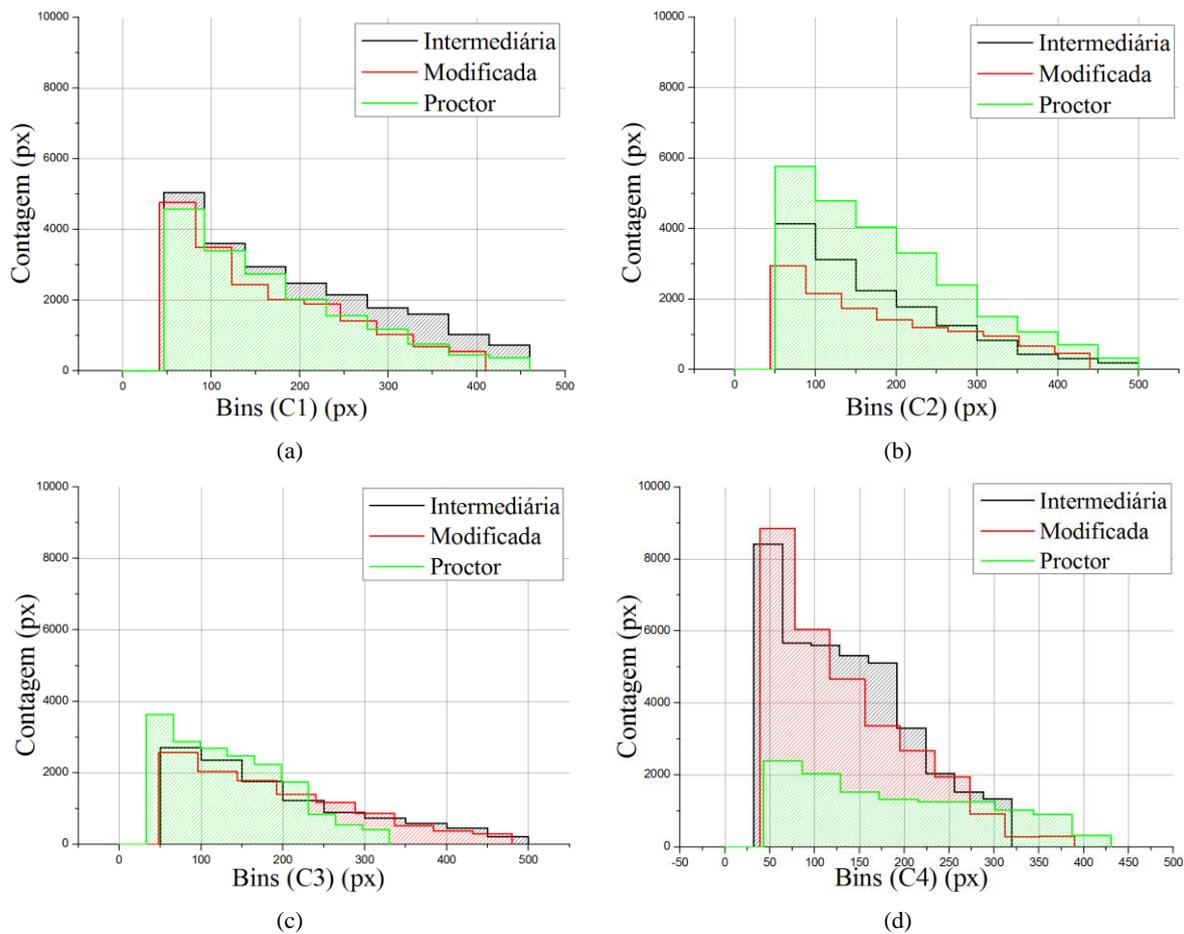


Figura 4.45– Distribuição das aberturas, variando a energia de compactação sobre a mistura de solo e 10% de bentonita, pelo método de Otsu, sendo (a) representa as aberturas após o primeiro ciclo de ressecamento e molhagem, (b) após o segundo e (c) após o terceiro e (d) após o quarto ciclo do ressecamento.

Os histogramas gerados pelo método do operador indicam que há uma oscilação nos valores para as aberturas, independente da energia de compactação. Esta situação pode representar uma possível indicação de um ciclo mais complexo de relaxamento do material compactado a diferentes energias.

Nas Figuras 4.46 e 4.47 estão representadas as distribuições de aberturas das fissuras para uma mesma energia ao longo dos ciclos.

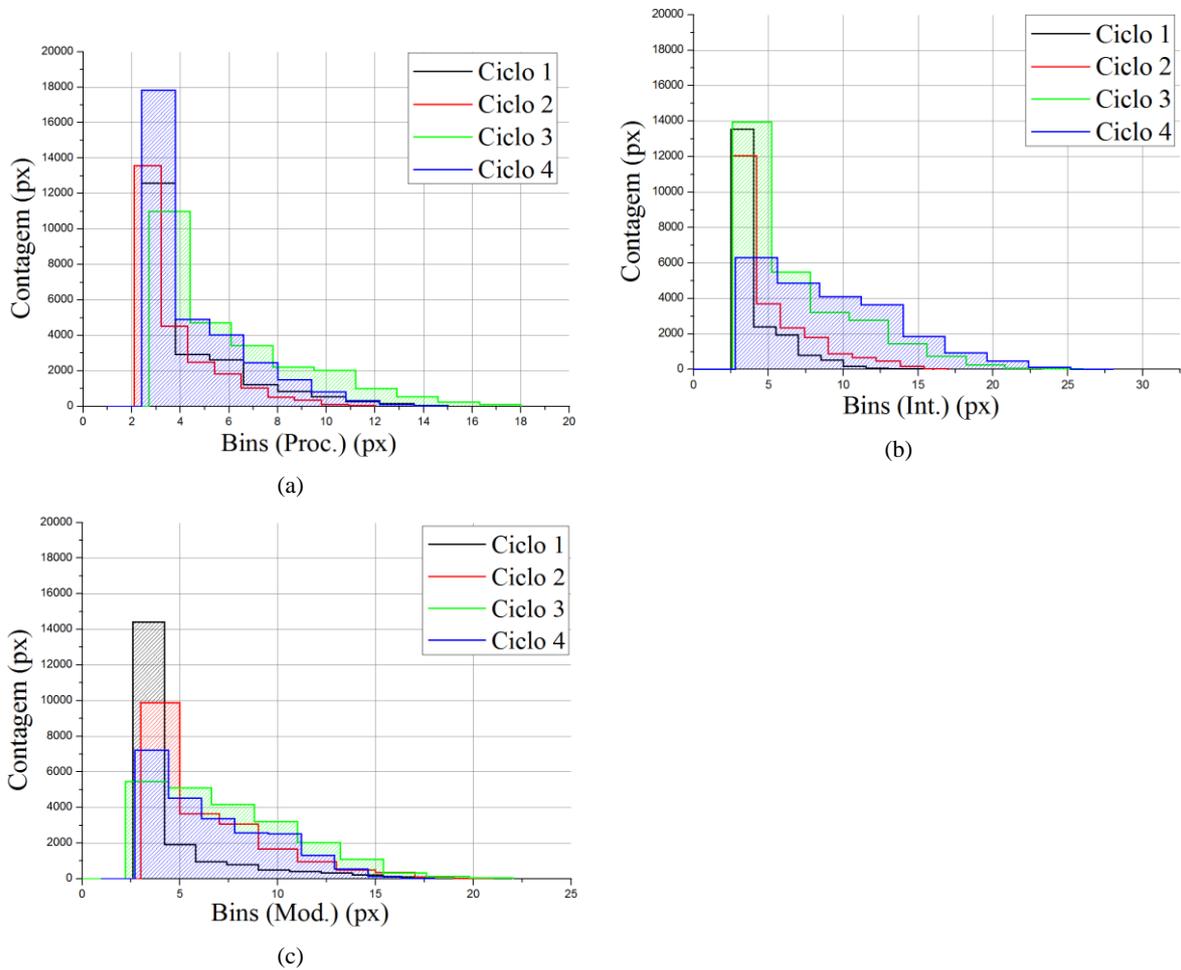


Figura 4.46– Distribuição das aberturas, para uma mesma energia pelo método Operador, sendo (a) energia Normal, (b) energia Intermediária e (c) a energia Modificada.

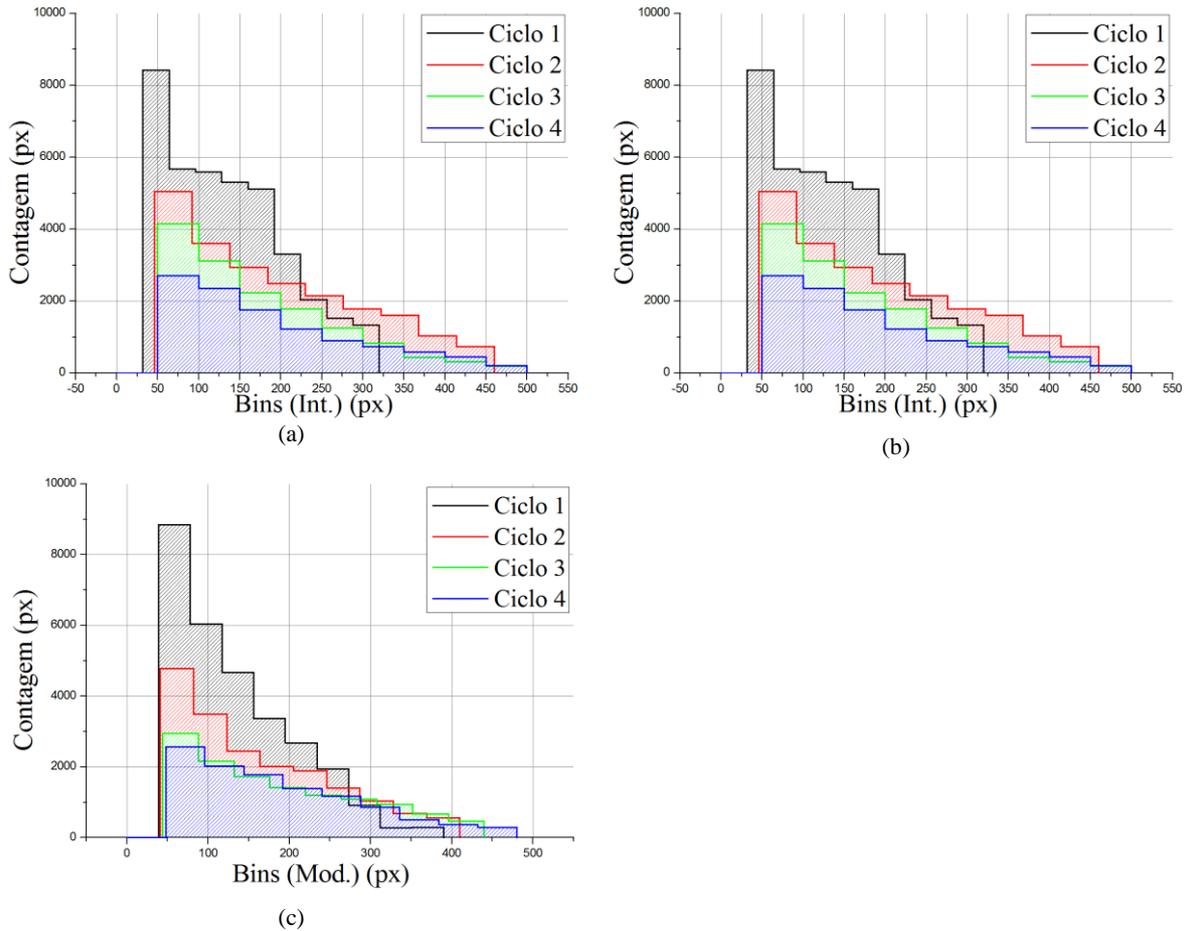


Figura 4.47 – Distribuição das aberturas, para uma mesma energia pelo método de Otsu, sendo (a) energia Normal, (b) energia Intermediária e (c) a energia Modificada.

A Figura 4.48 representa então o percentual da área fissurada em cada um dos ciclos, para cada uma das amostras.

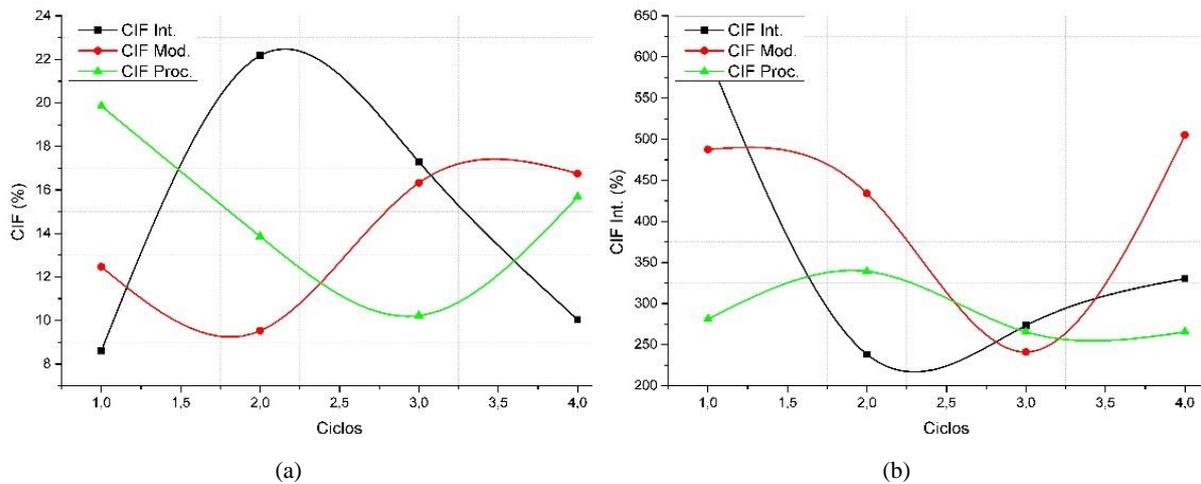


Figura 4.48– CIF em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b)

Verifica-se que os resultados do percentual de área fissurada demonstram um comportamento diferente quando comparado com todas as outras amostras analisadas anteriormente, para ambos os métodos. Os resultados dos valores de CIF assemelham-se a oscilações, com mudanças na concavidade das curvas entre ciclos de ressecamento. A estabilização da área fissurada não ocorreu como nas amostras onde percentuais de material expansivo e soluções de íons eram adicionados.

A Figura 4.49 representa os valores da abertura média das fissuras em relação aos ciclos. Os valores foram calculados em valores percentuais do diâmetro da amostra. Em (a) estão os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas a partir do limiar de Otsu.

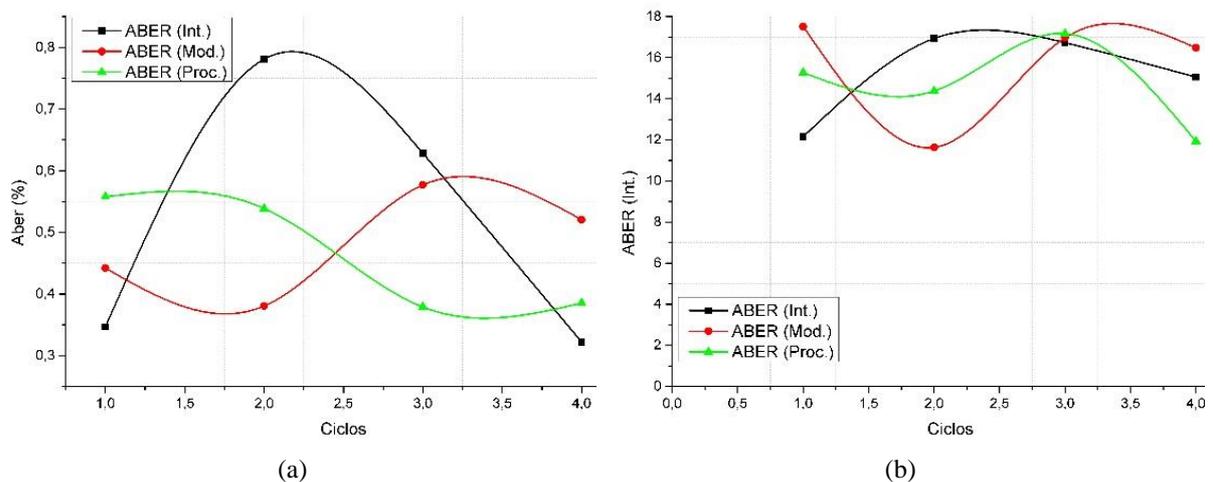


Figura 4.49 – Abertura média em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b)

De forma muito similar ao CIF as aberturas médias oscilações entre ciclos de ressecamento, sendo que a amostra compactada com energia normal apresentou a menor oscilação na abertura média ao final. As convergências de valores de abertura médios também não se manifestaram, sendo os valores para todas as energias dentro do intervalo de 0,35% a 0,75% da maior dimensão

A Figura 4.50 representa os valores do desvio padrão das aberturas fissuras em relação à média dos valores, representado ao longo dos ciclos. Os valores foram calculados em valores percentuais. Em (a) estão os dados calculados a partir do limiar de operador e em (b) estão as aberturas a partir do limiar de Otsu.

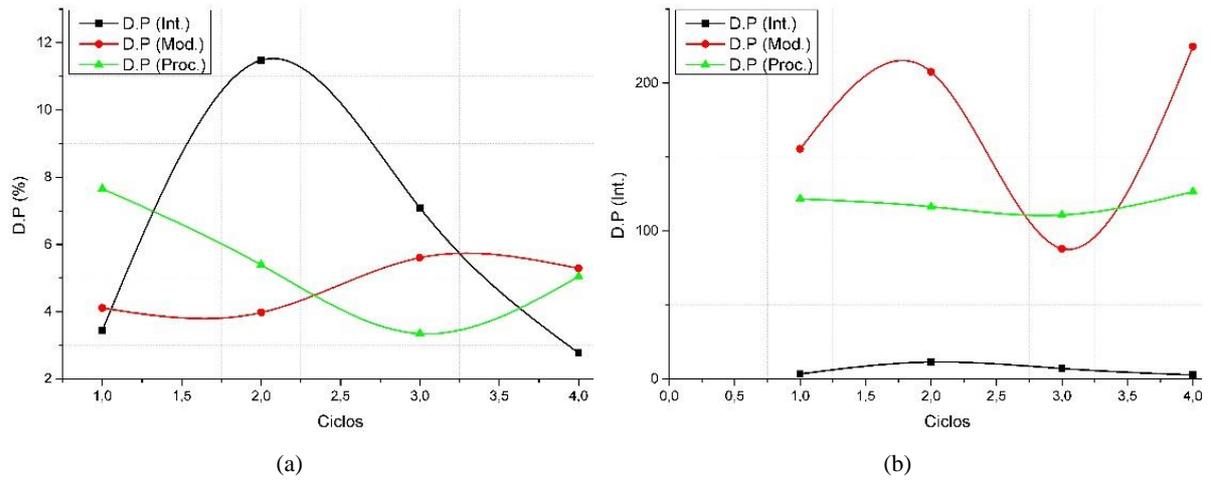


Figura 4.50– Desvio padrão das aberturas em relação aos ciclos, pelos métodos do Operador em (a) e Otsu em (b)

## 4.2 COMPACTAÇÃO, GRANULOMETRIA E PERMEABILIDADE

A partir dos ensaios de fissuração em menor escala foi possível escolher o material que seria usado em grande escala. Esse processo de seleção permitiu simultaneamente descartar os materiais que não fissuravam como necessário e reduzir a o número de ensaios para realizar somente nas amostras constituintes da mistura selecionada.

Os ensaios granulométricos foram executados para o solo natural (chamado de solo matriz), para a o solo adicionado de 10% de sua massa em bentonita (chamado mistura) e para a bentonita em si, primariamente para verificar a qualidade da mistura. A compactação foi executada para o solo puro e para a mistura e ao fim, a permeabilidade foi executada para a mistura compactada com a energia normal, as mesmas condições da caixa.

### 4.2.1 GRANULOMETRIA

A granulometria do material foi feita segundo a NBR 7181 (ABNT, 2016) com o peneiramento das amostras na primeira etapa para então fazer a sedimentação das mesmas ao final do mesmo. As Figuras 4.51, 4.52, 4.53 representam as curvas granulométricas do solo natural, mistura e bentonita pura.

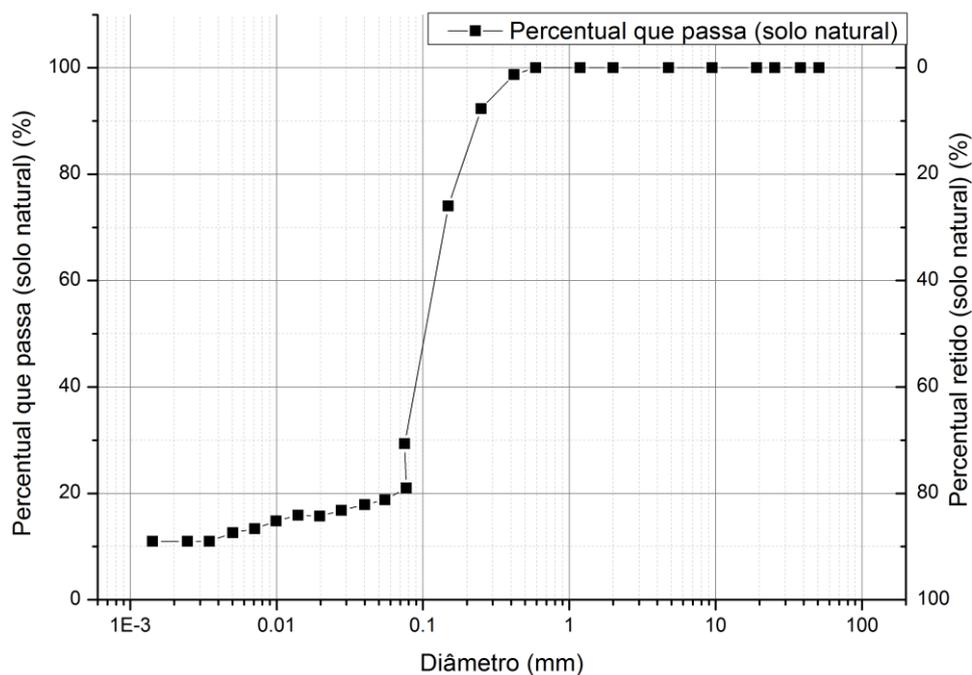


Figura 4.51 – Granulometria do solo puro.

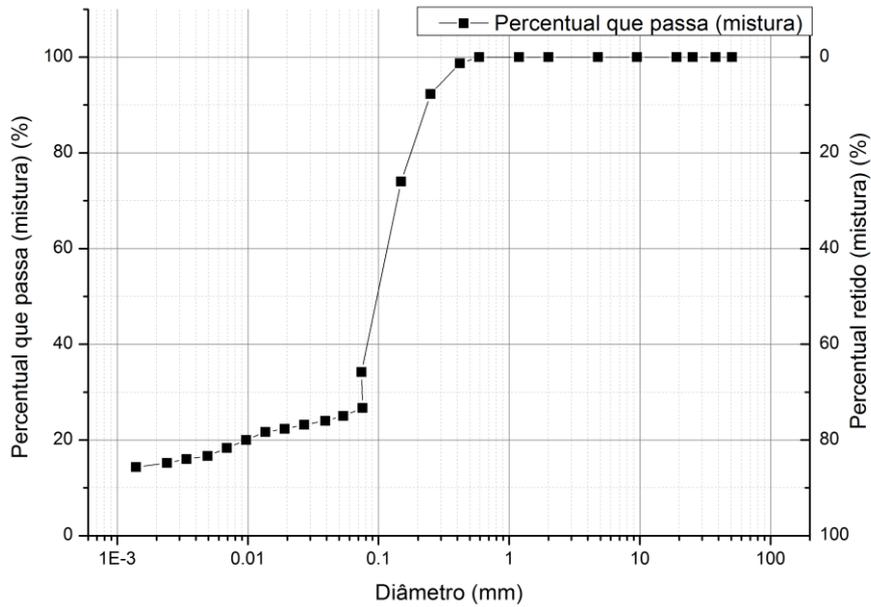


Figura 4.52– Granulometria da mistura do solo com bentonita

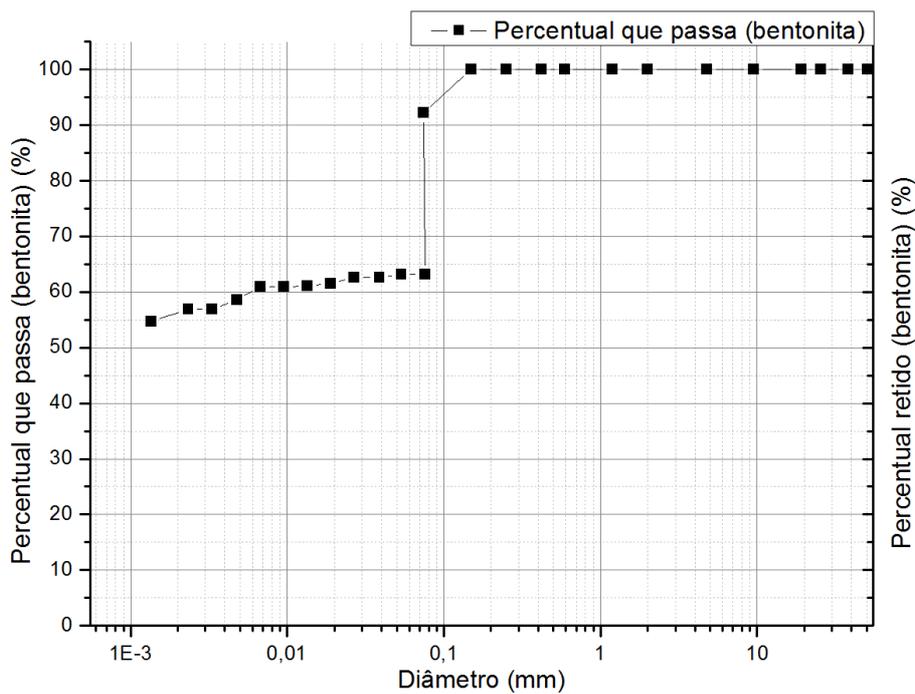


Figura 4.53– Granulometria da bentonita.

As curvas de tanto com o solo quanto com a mistura são praticamente iguais até que seja atingida a parcela referente ao material mais fino, que atravessa a peneira #200. Nessa parte, o efeito da adição de 10% da massa em bentonita é notável pois a curva da mistura fina aproxima-se da curva de bentonita como representado na Figura 4.54.

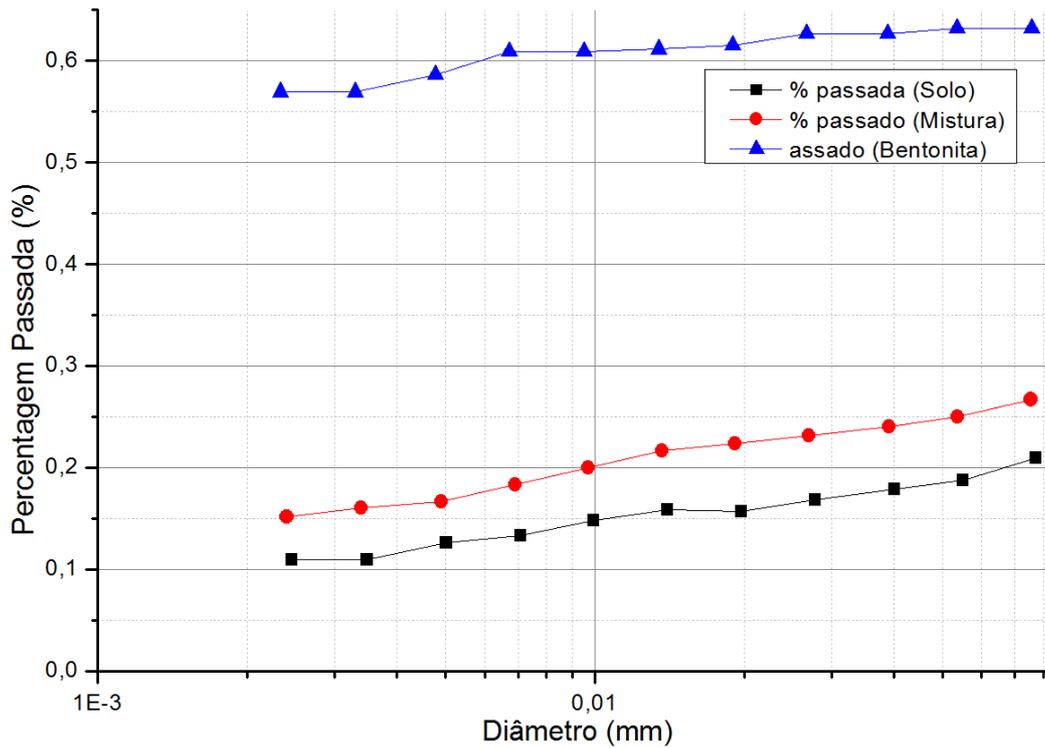


Figura 4.54– Detalhe da parcela fina de solos .

Com os dados da bentonita e do solo puro para a parcela mais fina do solo, pode-se então calcular um resultado médio a partir das proporções da mistura e comparar com o resultado experimental, com uma diferença pequena entre os resultados de até 2,1%. A representação da média em comparação com o valor experimental está na Figura 4.55.

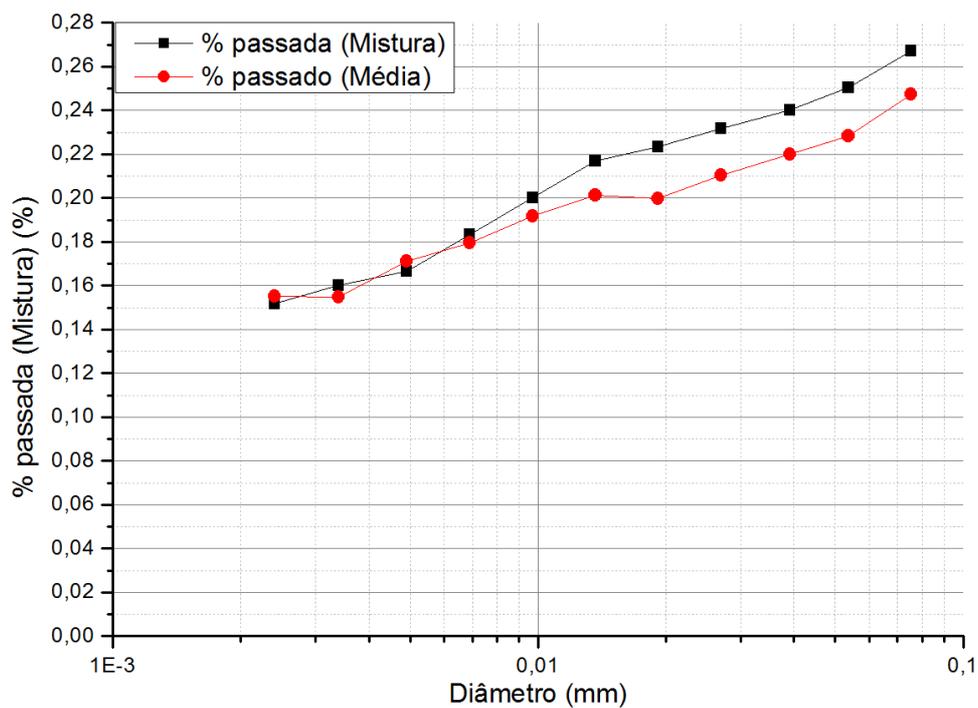


Figura 4.55– Comparação do resultado da mistura com a média da proporção.

## 4.2.2 COMPACTAÇÃO

A compactação foi feita para o solo puro e para a mistura com a bentonita adicionada, primariamente para avaliar o impacto da adição de uma argila expansível no solo pouco expansível. A curva de compactação para a mistura está representada na Figura 4.56 (a) e curva de compactação para o solo puro está representado em (b), da mesma Figura.

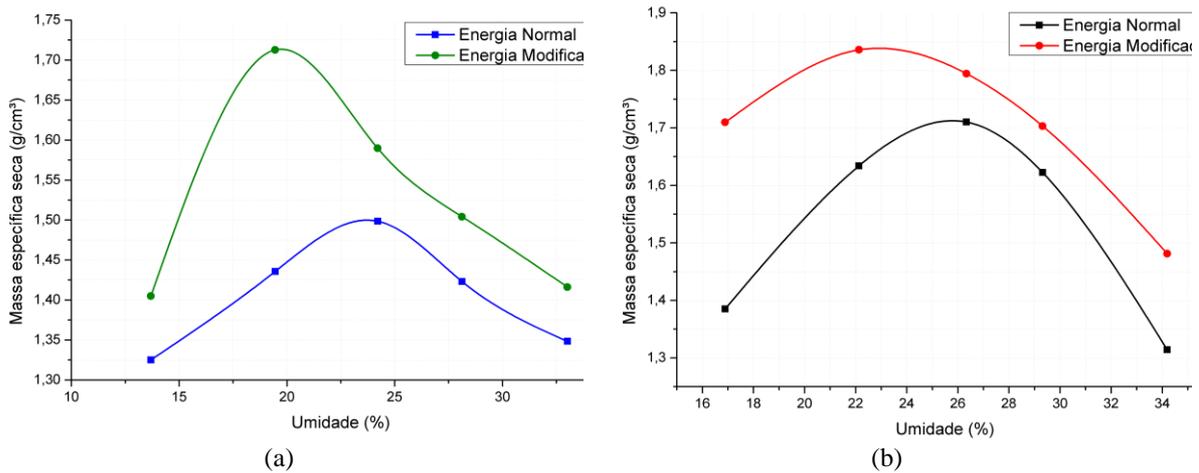


Figura 4.56– Curvas de compactação para a mistura em (a) e para o solo puro em (b).

Para que fosse possível determinar avaliar a diferença entre as curvas, com e sem a bentonita adicionada, todas as curvas foram plotadas juntas em conjunto, conforme pode ser visualizado na Figura 4.57

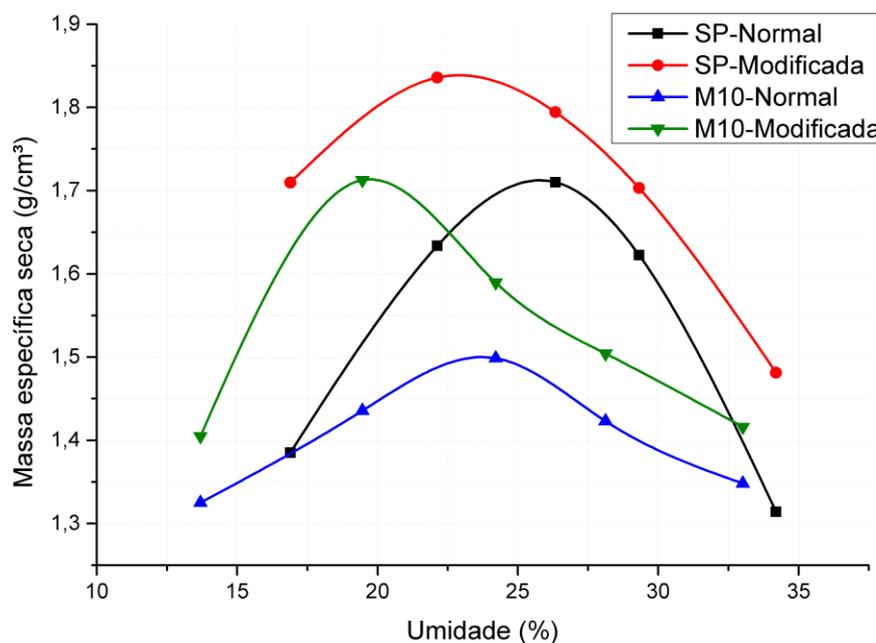


Figura 4.57– Todas as curvas compactação.

Para determinar o valor da umidade ótima foi usada o ponto de inflexão em cada uma das curvas, representada pela primeira derivada nula, calculada numericamente. Os valores de umidade ótima estão representado na Figura 4.58 Em (a) estão os dados referentes à umidade ótima da mistura e em (b) estão os dados referentes ao solo.

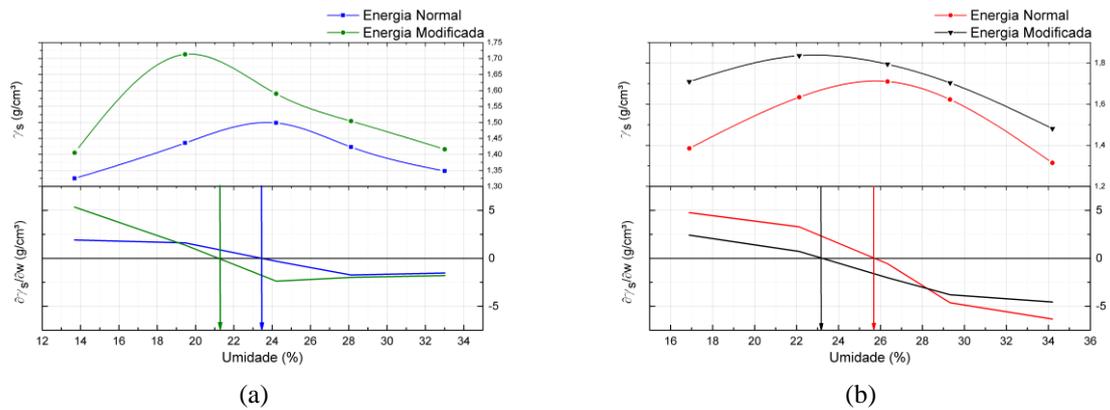


Figura 4.58– Definição das umidades ótimas para as curvas de solo natural em (a) e da mistura em (b).

A partir dessa etapa definiu-se o valor de umidade ótima de 23,3% e a energia Proctor normal. Com esses valores pode-se definir a quantidade de solo a ser usado na caixa.

### 4.2.3 PERMEABILIDADE

Com o valor da umidade ótima e a energia de compactação também definida foi moldado um corpo de prova cujas propriedades hidromecânicas pudessem ser representativas do material a ser compactado na caixa.

Esse material, mistura composta pelo solo puro com 10% de sua massa seca de bentonita foi umedecido e homogeneizado pelo mesmo procedimento descrito na etapa 3.3 Com o corpo de prova já compactado o mesmo foi transferido para célula de permeabilidade.

O solo foi submetido à saturação por um período de uma semana e então sua permeabilidade foi avaliada pelo método da carga variável. A instalação da câmara com o selo de bentonita junto com o nível de água está representado na Figura 4.59 (a) e em (b) está em detalhe a câmara em si.

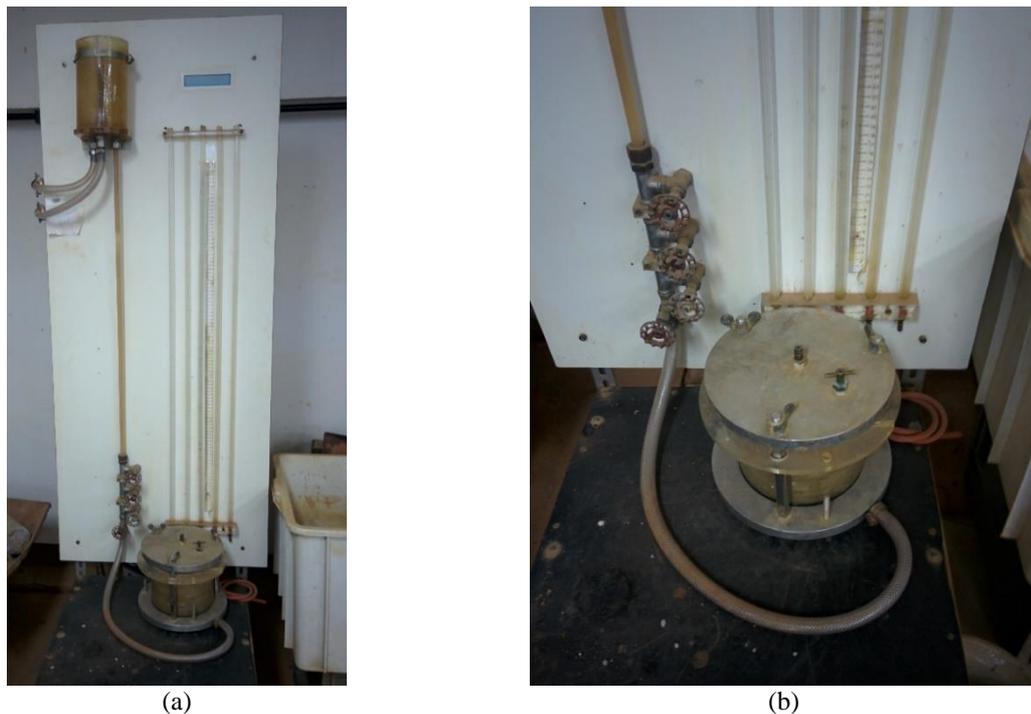


Figura 4.59– Permeabilidade do solo compactado em (a) e detalhe da câmara em (b).

O valor resultante da permeabilidade a partir do ensaio de carga variável foi de  $8,1 \cdot 10^{-9}$  m/s, valor baixo de permeabilidade, adequado à aplicação do material para *liners*.

### 4.3 FISSURAÇÃO E INFILTRAÇÃO

O ensaio de compactação foi necessário para se definir qual era a umidade e a energia para compactar o solo em maior escala, na caixa de infiltração. Com o valor de permeabilidade podia-se então simular uma matriz de solo não fissurada e simular o fluxo através da mesma.

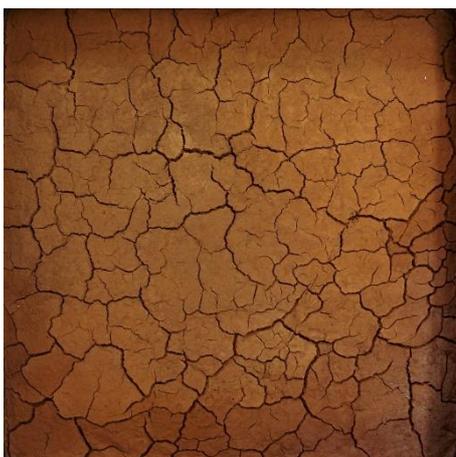
O material foi compactado em três camadas de 5 cm cada uma à umidade de 23,3% e com energia Proctor normal (nessa situação equivalente a 75 golpes do soquete maior). O solo já compactado foi submetido a um primeiro ressecamento e posteriormente à saturação e ressecamento. Esse foi repetido em 3 ciclos, no qual o solo foi então submetido a uma infiltração controlada e os valores da água percolada foram medidos. A Figura 4.60 representa as fissuras ao fim dos quatro ciclos de ressecamento ao qual a mistura foi submetida.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.60– Diferentes estados de fissuração na caixa, sendo (a) após o primeiro ressecamento, em (b) após o segundo, (c) o terceiro e (d) o quarto ciclo.

As imagens obtidas ao fim de cada um dos ciclos passaram por um processo de binarização, descrito pelo algoritmo na etapa 3.6. Nessa etapa, optou-se por usar o operador para definir manualmente os valores de limiar e analisando a imagem em preto e branco.

A Figura 4.61 apresenta as imagens binárias das fissuras geradas em cada um dos ciclos.

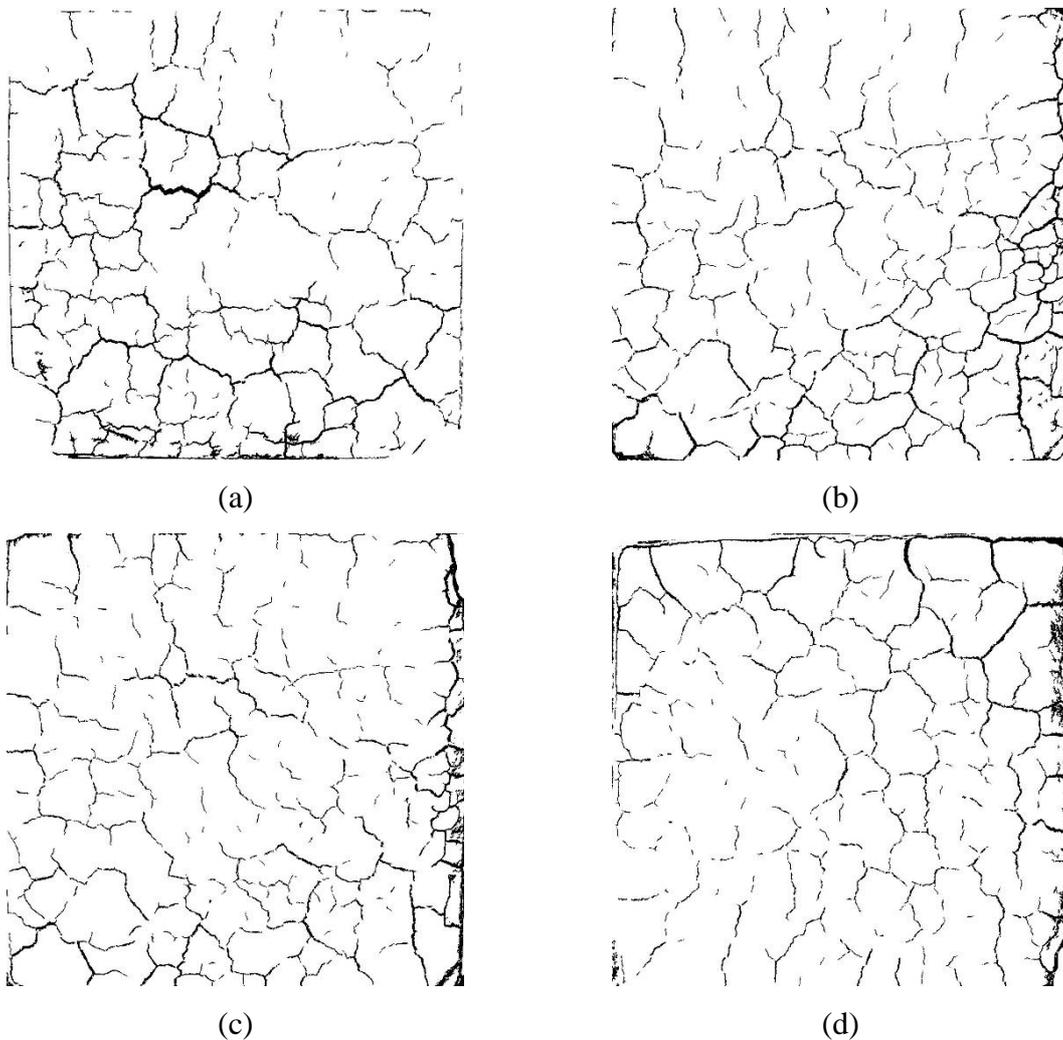


Figura 4.61– Diferentes estados de fissuração na caixa após a binarização, (a) após o primeiro ressecamento, em (b) após o segundo, (c) o terceiro e (d) o quarto ciclo..

Com a imagem de cada uma das etapas de ressecamento já transformada em uma matriz de argumento lógico o programa internamente montava o esqueleto das fissuras e fazia a transformada de distância.

Os valores da transformada de distância ficaram então guardados dentro de uma matriz de igual dimensão à binária. A matriz esqueleto era usada para extrair os valores de distância na mesma posição em que o esqueleto se encontra.

A Figura 4.62 representa os esqueletos das fissuras geradas em cada um dos ciclos.

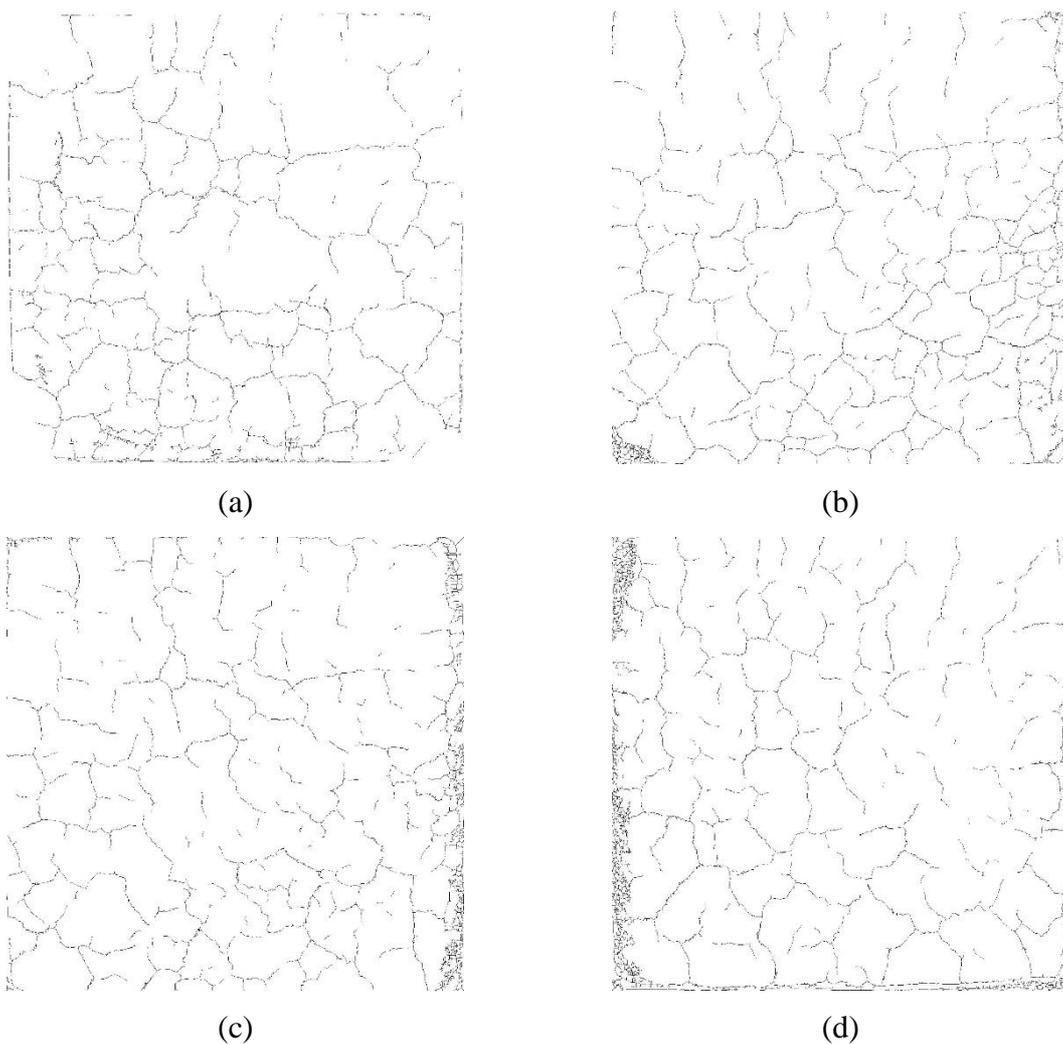


Figura 4.62– As representações dos esqueletos ao final de cada ciclo, (a) após o primeiro ressecamento, em (b) após o segundo, (c) o terceiro e (d) o quarto ciclo..

Com os esqueletos compostos, têm-se os dados necessários para então determinar as aberturas ao longo de cada uma das fissuras. O resultado das aberturas para cada um dos ciclos individuais está representado na Figura 4.63.

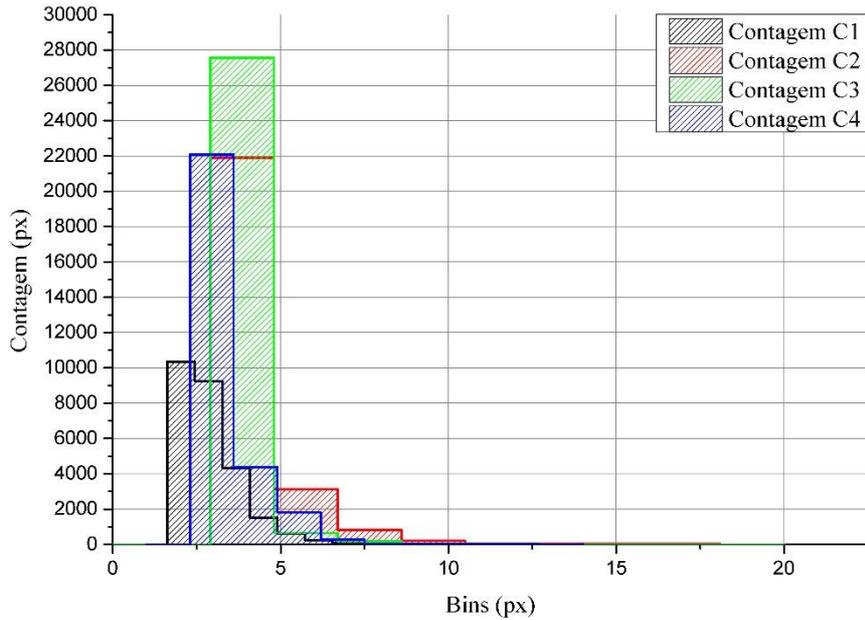


Figura 4.63– Distribuição de aberturas para cada um dos ciclos.

A partir das relações representadas no histograma, pode-se visualizar a tendência à estabilização das fissuras, tanto em abertura quanto em área fissurada, sendo que os valores do quarto ciclo se aproximam do segundo ciclo e são menores que do terceiro. Os valores máximos desses parâmetros são atingidos ao final do segundo ciclo de fissuração e esse resultado está representado nas Figuras 4.64 e 4.65.

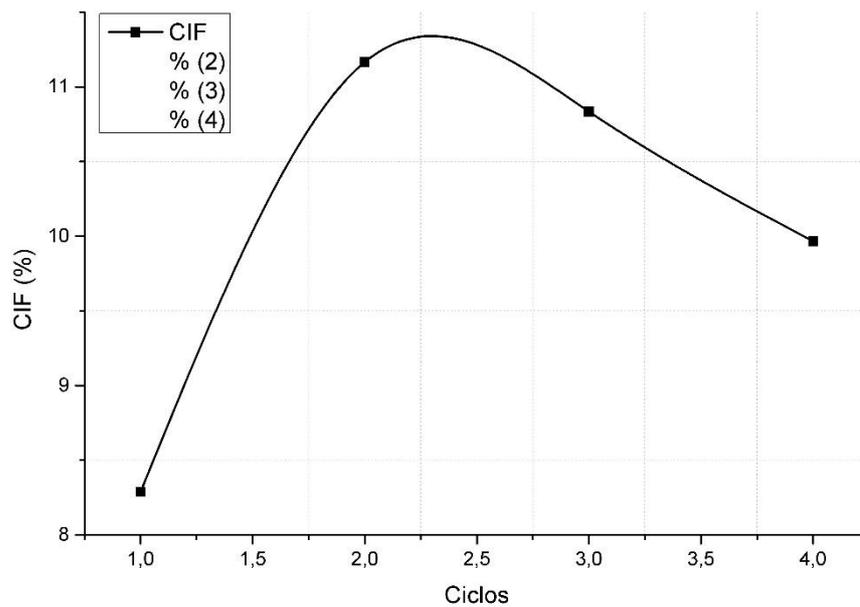


Figura 4.64– Variação do CIF ao longo dos ciclos.

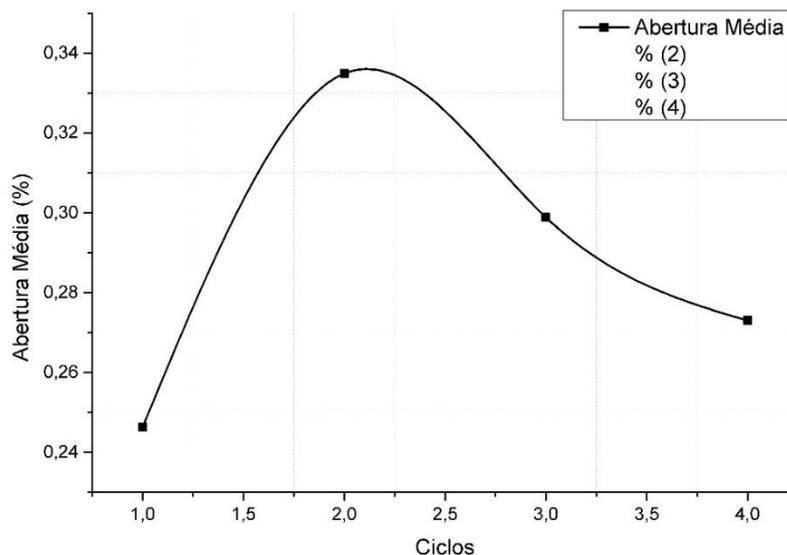


Figura 4.65– Variação da abertura média ao longo dos ciclos.

Os valores de CIF são dados em percentuais em relação à área total do solo compactado e os resultados da abertura média são dados em percentuais em relação à maior dimensão da área analisada. De forma bastante interessante, a abertura mostrou a mesma tendência à estabilização que nas amostras menores e com um valor igualmente próximo, dentro do intervalo de [0,25%; 0,3%] para o solo natural adicionado de bentonita.

Essa estabilidade em torno de um valor de abertura média pode indicar que a longo prazo, ou após múltiplos ciclos de ressecamento e molhagem, o CIF torna-se um parâmetro inteiramente adequado para o descrever as fissuras. Para avaliar essa possibilidade os valores de CIF foram plotados em relação às aberturas, na Figura 4.66.

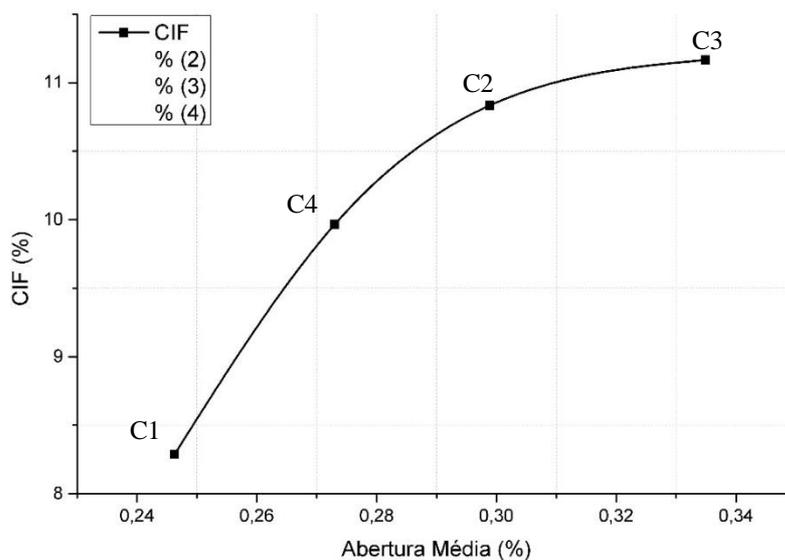


Figura 4.66– Correlação entre abertura média e CIF.

Uma possível correlação entre as aberturas e o valor de CIF foi definida anteriormente e com apenas o CIF, foi simulado uma infiltração.

A partir do segundo ao terceiro ciclo, foi observado um fenômeno não previsto que era a concentração da bentonita nas fissuras. Devido à sua granulometria muito fina e à tendência da mesma se manter em suspensão por muito tempo, a bentonita foi acumulando-se nas fissuras e na superfície à medida que a água evaporava como representado na Figura 4.67.

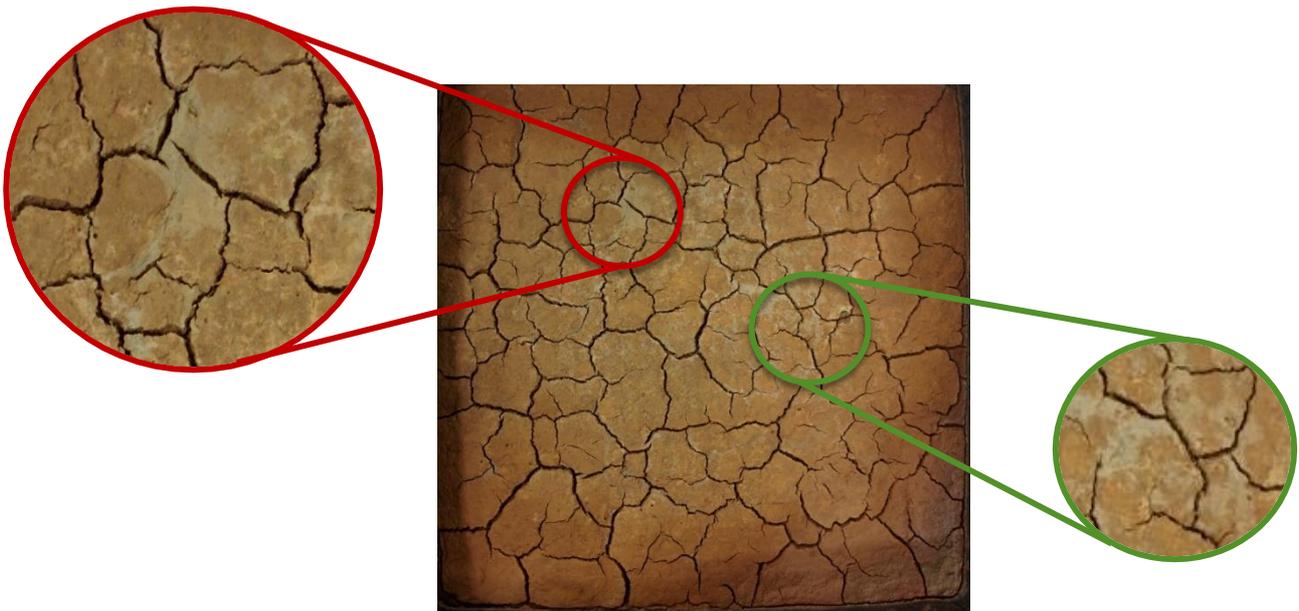


Figura 4.67– Deposição da bentonita na superfície do solo, na proximidade das fissuras.

É possível que tenha ocorrido um tunelamento ou uma suspensão da bentonita após as etapas de saturação, na qual o material mais fino, dissolveu-se na água e foi carregado por meio das fissuras até a face interna das mesmas e a superfície do solo. Os efeitos do acúmulo da bentonita nessas posições estão associados à redução da vazão.

A nível de representação, todas as fissuras estão sobrepostas na Figura 4.6.8

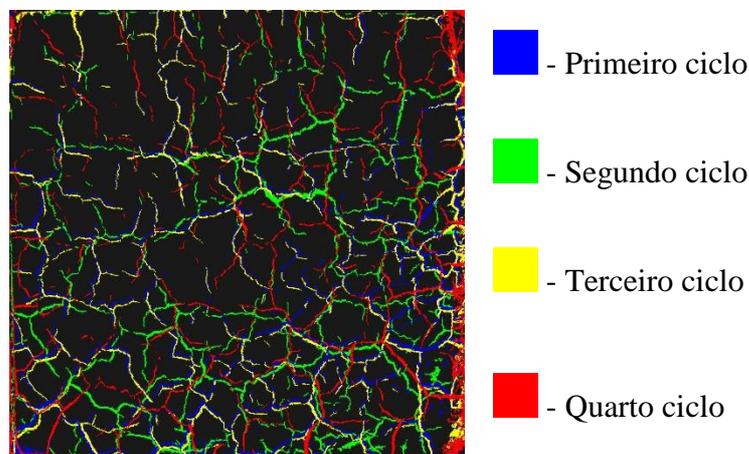


Figura 4.68– Deposição da bentonita na superfície do solo, na proximidade das fissuras.

## 4.4 MODELAGEM DAS FISSURAS

Devido à natureza bastante complexa da fissuração dos diferentes solo, optou-se por calibrar a correlação de abertura nas imagens com as profundidades por meio de uma relação empírica. O propósito dessa relação era associar uma geometria plana com uma tridimensional de sua profundidade.

Para tal propósito foram aplicadas duas técnicas diferentes, uma de medição das profundidades nas aberturas com uma haste de aço e outra com a moldagem das fissuras por uma “extrusão negativa” na qual um material moldante, a ser selecionado era despejado na amostra para então gerar a modelagem das mesmas em três dimensões.

O histograma das distribuições de profundidades dos valores aferidos manualmente está representado na Figura 4.69.

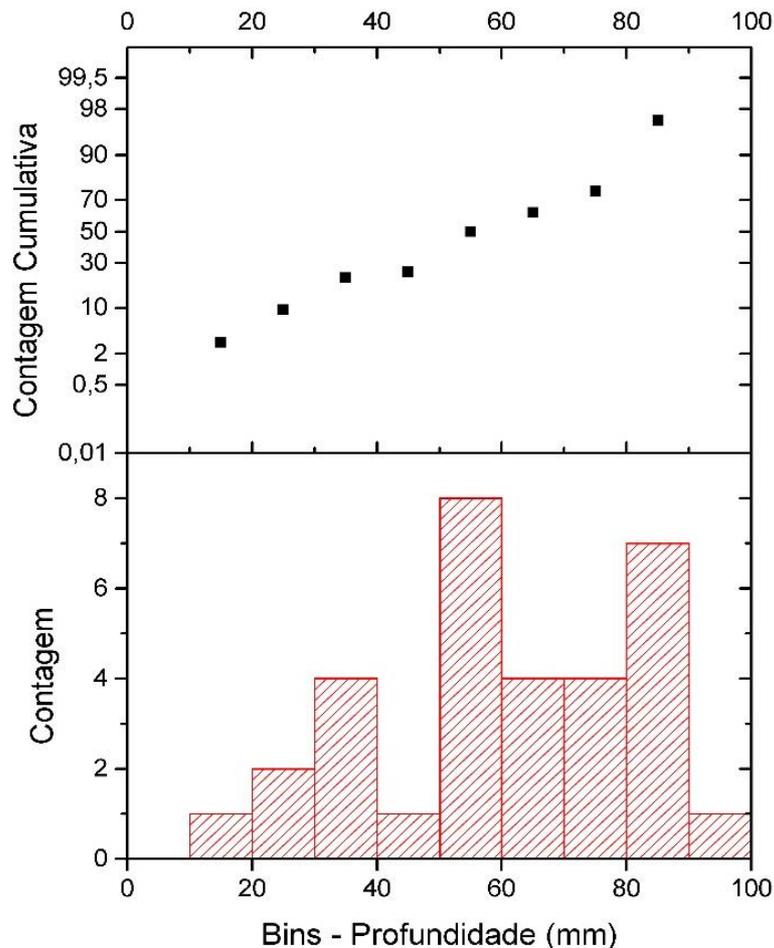


Figura 4.69– Valores das profundidades das fissuras, por aferição direta.

A distribuição não se aproxima em similaridade à distribuição dos valores das aberturas, apresentando lacunas entre alguns valores de profundidade. Essa distribuição dos valores medidos manualmente é de pouca precisão pelas várias razões apresentadas anteriormente.

A Figura 4.70 representa uma distribuição acumulada dos valores de aberturas, e a regressão da mesma por uma função polinomial de quinto grau.

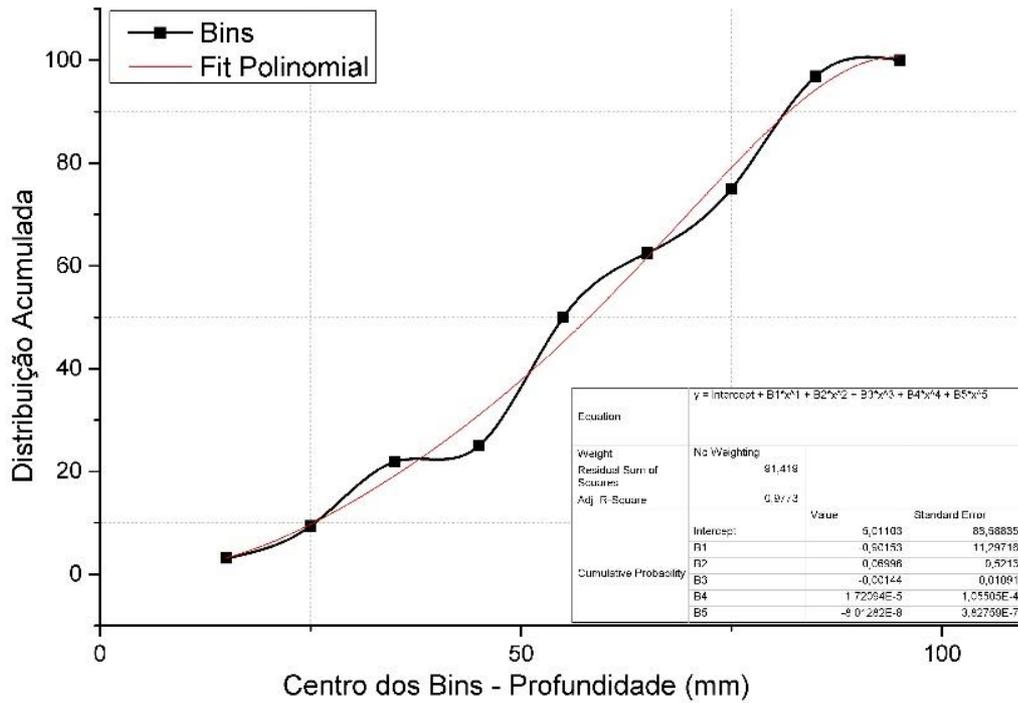


Figura 4.70– Distribuição acumulada dos valores pelo centro dos bins.

#### 4.4.1 CALIBRAÇÃO POR MOLDAGEM

Como descrito no terceiro capítulo, foi usado uma mistura de nata de graute com aditivo de pega super-rápida para a produção dos moldes tridimensionais das fissuras. A mistura foi preparada e aplicada sobre a superfície do solo fissurado rapidamente.

Para auxiliar o alcance dessa mistura, a caixa onde o solo se encontrava foi submetida à sucção de uma bomba pneumática na parte inferior, por meio do espigão por onde a água percolada era medida. A bomba pneumática estava separada por um filtro de água impedindo que partes do solo ou graute chegassem à mesma.

Terminada essa etapa, a caixa era selada e movimentada cuidadosamente para uma região em que não seria perturbada e foi deixada por um período de 7 dias para que material passasse por um processo de cura até que o molde das fissuras fosse desformado.

Com a desforma dos moldes, foi necessário lavar o mesmo com jatos de água e ar comprimido para separar a crosta de solo que grudava nas superfícies do molde. A Figura 4.71 apresenta o procedimento lógico da moldagem das fissuras e Figura 4.72 representa em (a) a perspectiva das fissuras e em (b) vistas planas onde as medidas foram feitas.

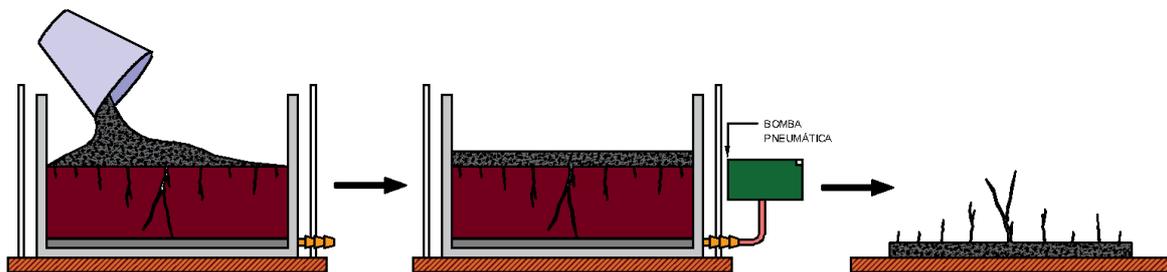
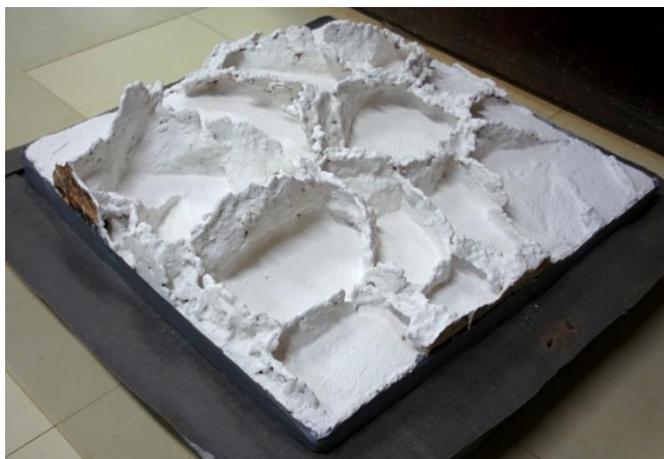


Figura 4.71– Moldagem das fissuras.



(a)



(b)

Figura 4.72– Resultado da moldagem das fissuras em perspectiva (a) e em vista plana (b)

As profundidades medidas nos moldes foram então plotadas em um histograma representado na Figura 4.73;

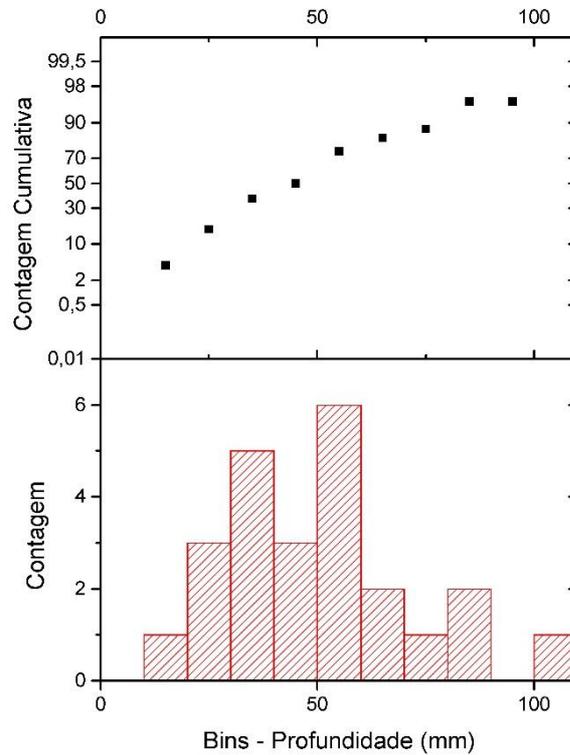


Figura 4.73 – Valores das profundidades das fissuras, por moldagem.

A distribuição de fissuras obtidas pelo molde não se aproximou em similaridade à distribuição dos valores das aberturas, no entanto, aparenta continuidade maior que os valores medidos por aferição direta.

A Figura 4.74 representa uma distribuição acumulada dos valores de aberturas, e a regressão da mesma por uma função polinomial de quinto grau.

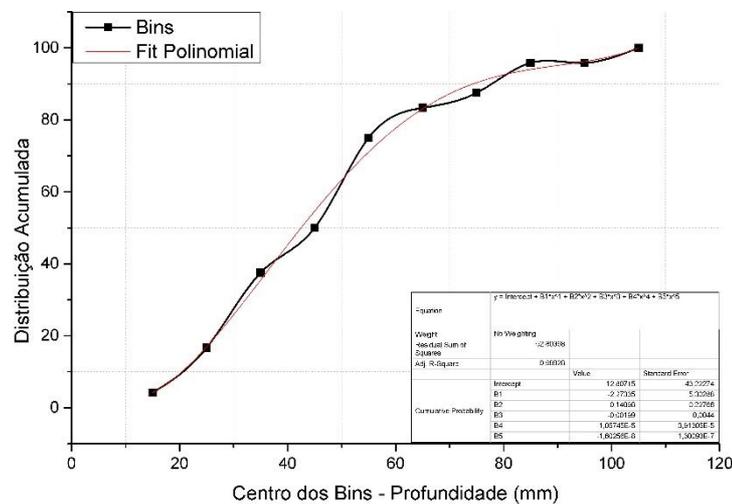


Figura 4.74– Distribuição acumulada dos valores pelo centro dos bins.

Para a correlação de Chertkov (1998), foram extraídos os dados dos gráficos originais, como representado na figura 4.75

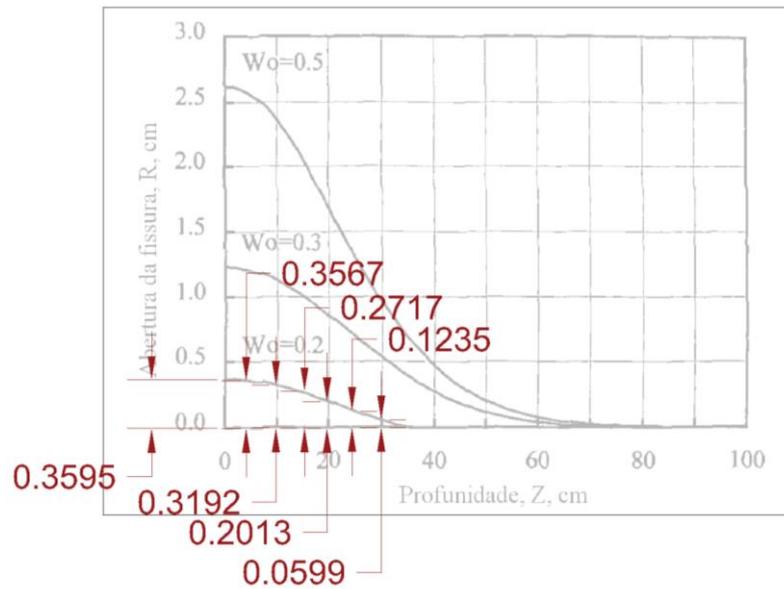


Figura 4.75 – Representação dos dados extraídos da correlação de Chertkov (1998).

A Figura 4.76 representa os valores plotados de forma que a abertura em cm, no eixo  $x$  permitiu determinar o alcance da fissura a partir do fundo.

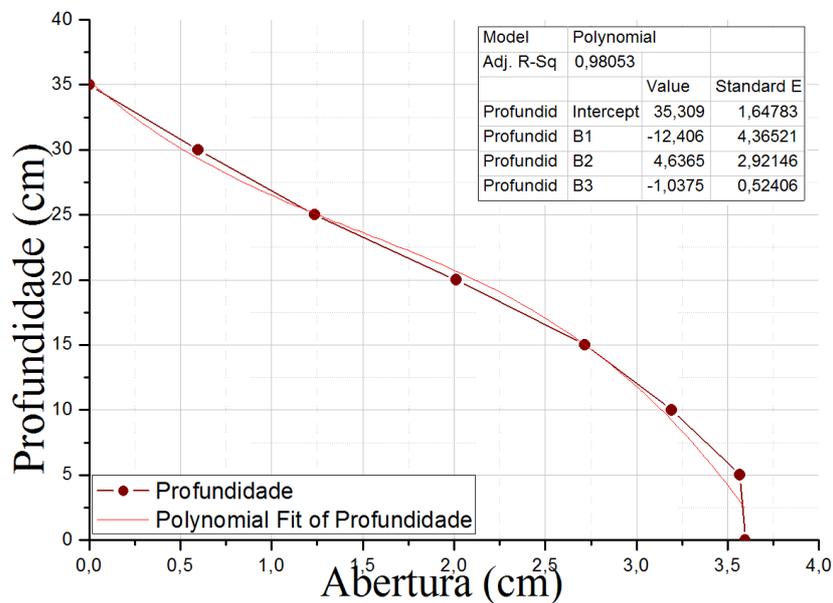


Figura 4.76 – Correlação entre abertura e alcance da fissura.

A equação 4.1 representa a regressão polinomial da correlação entre abertura da fissura e profundidade atingida pela mesma.

$$z(x) = 35,31 - 12,41x^3 + 4,64x^2 - 1,04x \quad 4.1$$

## 5 ANÁLISES

A determinação do meio equivalente se deu por meio da iteração entre a geometria do volume, produzido por meio da análise de imagens e as propriedades originais do material. Com o meio equivalente definido, a condutividade hidráulica equivalente ou teórica pode ser calculada para posterior análise em relação aos valores medidos experimentalmente.

Uma representação simplificada do processo está apresentada na Figura 5.1 onde uma foto de uma amostra fissurada no trabalho de Santos e Silva (2014) é submetida a um processo de formação de superfície e depois transformado em um modelo equivalente.

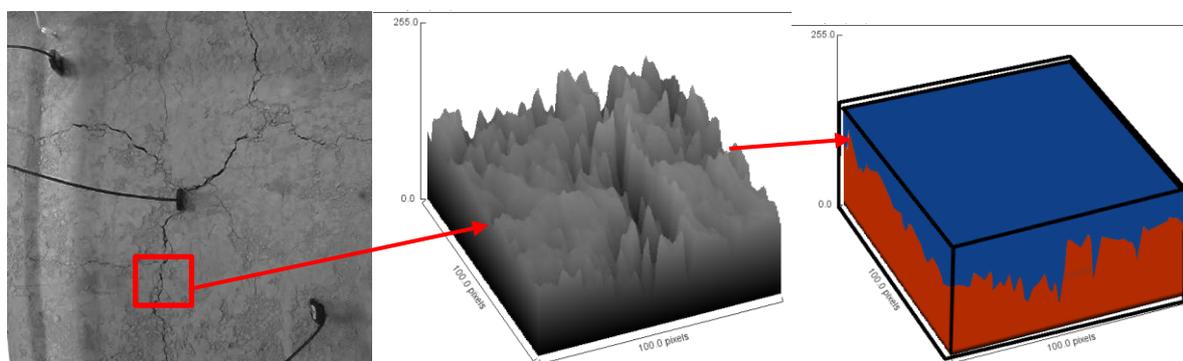


Figura 5.1– Representação lógica da equivalência de modelo, Santos e Silva (2014)

As medições dos dados experimentais dessa etapa foram feitas ao longo de 15 horas no qual o material percolado através do solo compactado e fissurado na caixa foi coletado. A massa em cada intervalo de tempo foi medida e depois o total percolado foi usado para estimar uma permeabilidade equivalente. A Figura 5.2 representa essa coleta de água (colorizada para a foto).



Figura 5.2– Representação da coleta da água percolada que acumulou-se.

Como a caixa encontrava-se vedada com as bordas de borracha e as barras de aço parafusadas garantindo que a condição de conservação da água dentro do sistema era aplicável. Com o volume percolado em cada etapa, o mesmo era removido da lâmina de água dentro da caixa, reduzindo a pressão sobre a mesma e por consequência o gradiente hidráulico.

As fotos com fissuras já delineadas pelo programa produzem a geometria da face pela qual a água irá percolar, sendo que as fissuras reduzem a espessura de solo em cada ponto de tal forma que o fluido tem menor dificuldade para atravessar o meio. A Figura 5.3 apresenta o processo lógico usado para a avaliação da infiltração da água através do meio fissurado.

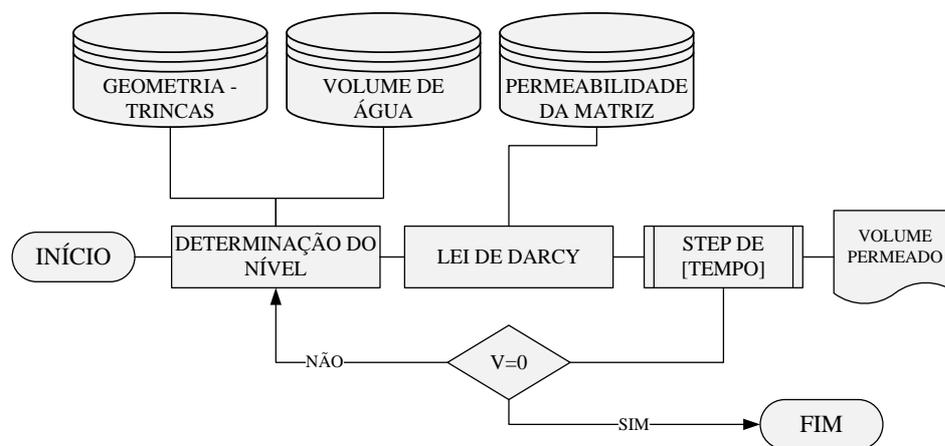


Figura 5.3– Representação do procedimento para avaliação da percolação ao longo do tempo

Os resultados experimentais obtidos a partir da caixa, executada no laboratório estão representados na Figura 5.4

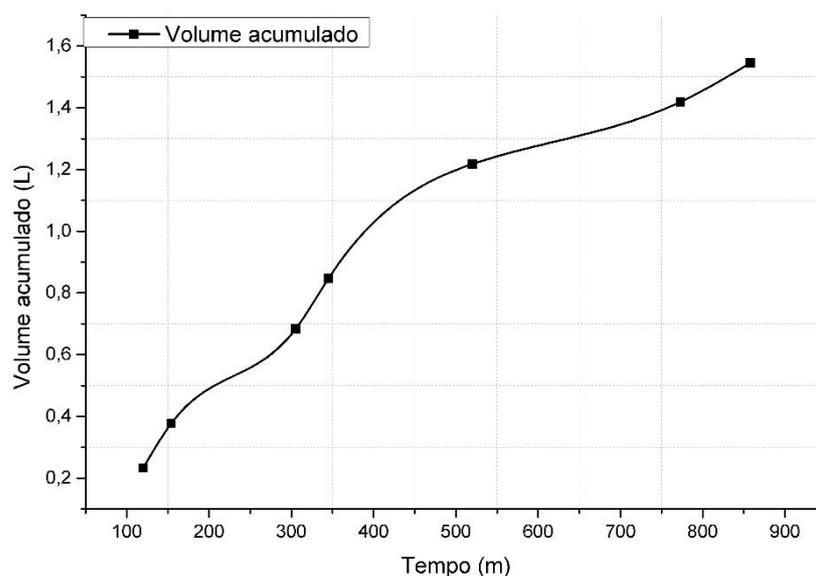


Figura 5.4 – Volume de água percolada acumulada experimentalmente

## 5.1 RELAÇÃO DE CHERTKOV

Como descrito anteriormente, Chertkov (1998) propôs valores de abertura em um solo para diferentes condições de umidade inicial. As aberturas propostas por Chertkov (1998) eram voltadas para um solo com conteúdo de argila expansiva natural de até 20% e se correlacionavam com as profundidades por meio do gráfico representado na Figura 5.5

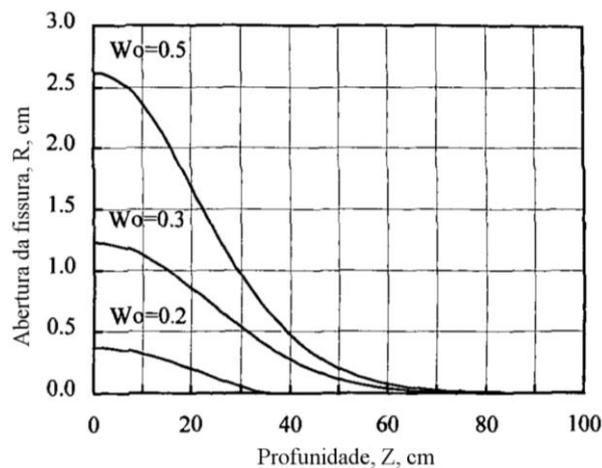


Figura 5.5– Diferentes profundidades para, Chertkov (1998).

A partir das correlações de Chertkov (1998) pode-se montar uma superfície fissurada do solo, pela qual se avaliou a passagem da água. Essa superfície está representada na Figura 5.6, sendo que os valores de profundidade em cada ponto da fissura são os dados do eixo vertical.

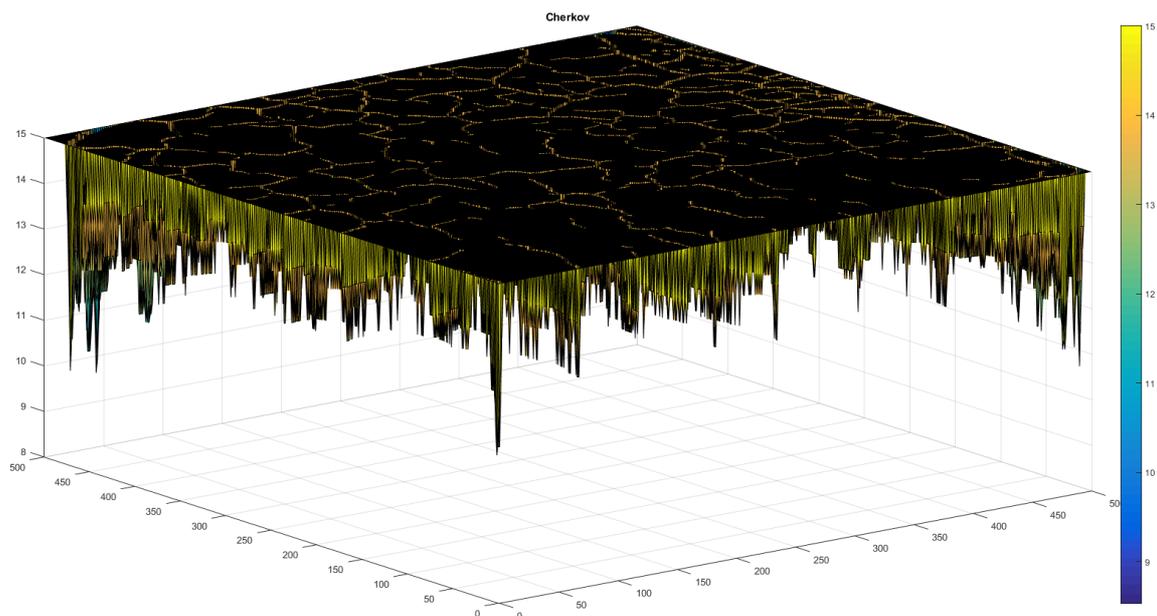


Figura 5.6– Profundidades das fissuras geradas por Chertkov.

Os resultados do volume acumulado com base nos dados experimentais em relação ao volume acumulado calculado usando as correlações de abertura e profundidade produzidas por Chertkov (1998) estão representados na Figura 5.7

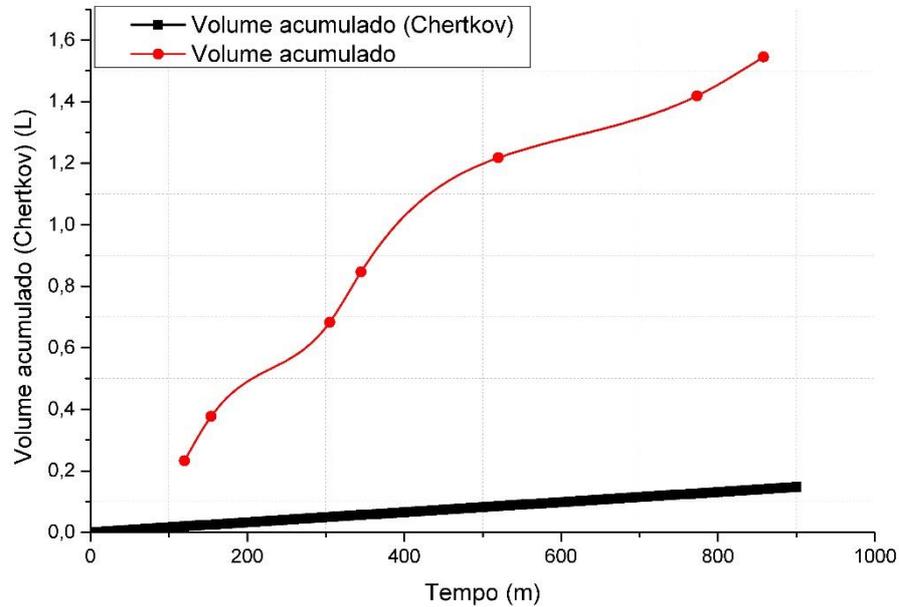


Figura 5.7– Volume de água acumulada experimental e calculado dor Chertkov .

Os resultados experimentais foram muito muito diferentes dos esperado por uma vazão através do solo com qualquer um dos modelos. O solo fissurado permitiu a passagem de praticamente um volume de água dez vezes maior que o esperado para a situação.

Todas as correlações de abertura e profundidade são bastante conservadoras, no sentido em que superestimam a infiltração da água pois não levam em consideração alguns fenômenos que reduziriam ainda mais essa percolação. E ainda com essa margem superior de percolação os resultados saíram menores que os valores medidos, por uma ordem de magnitude.

## 5.2 CALIBRADO EMPIRICAMENTE

A partir das medições de profundidade, seja pela moldagem das fissuras ou pela medição direta, as aberturas foram correlacionadas às profundidades e na Figura 5.8 está representada as profundidades geradas pela relação medida diretamente.

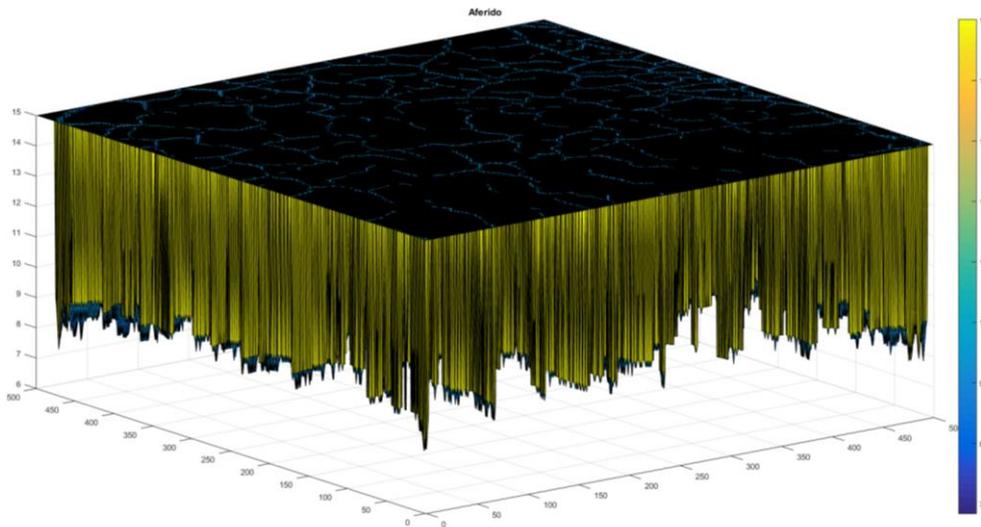


Figura 5.8– Profundidades das fissuras geradas por aferição direta.

Os resultados do volume acumulado obtido experimentalmente em relação ao volume acumulado calculado usando as relações de abertura diretas estão representados na Figura 5.9

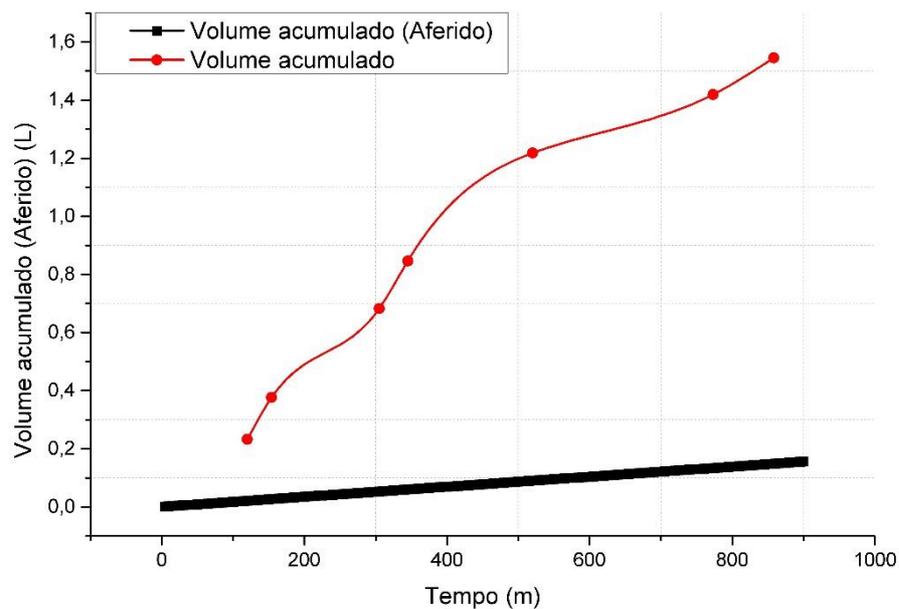


Figura 5.9– Volume de água acumulada experimental e calculado da profundidade aferida diretamente .

Na Figura 5.10 está representada as profundidades geradas pela relação medida diretamente. Por meio da moldagem das fissuras

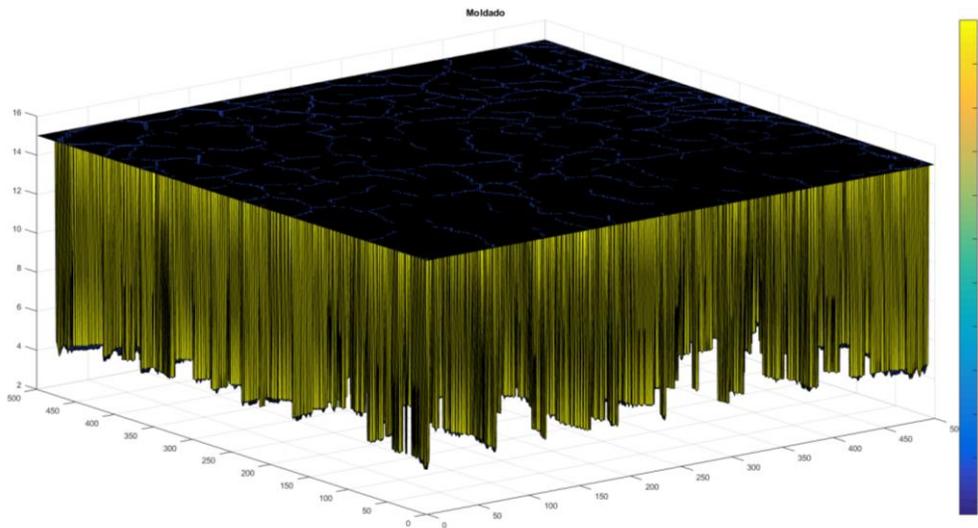


Figura 5.10– Profundidades das fissuras geradas por medição do molde.

Os resultados do volume acumulado obtido via condição experimental em relação ao volume acumulado calculado usando as relações de abertura tiradas da moldagem estão representados na Figura 5.11.

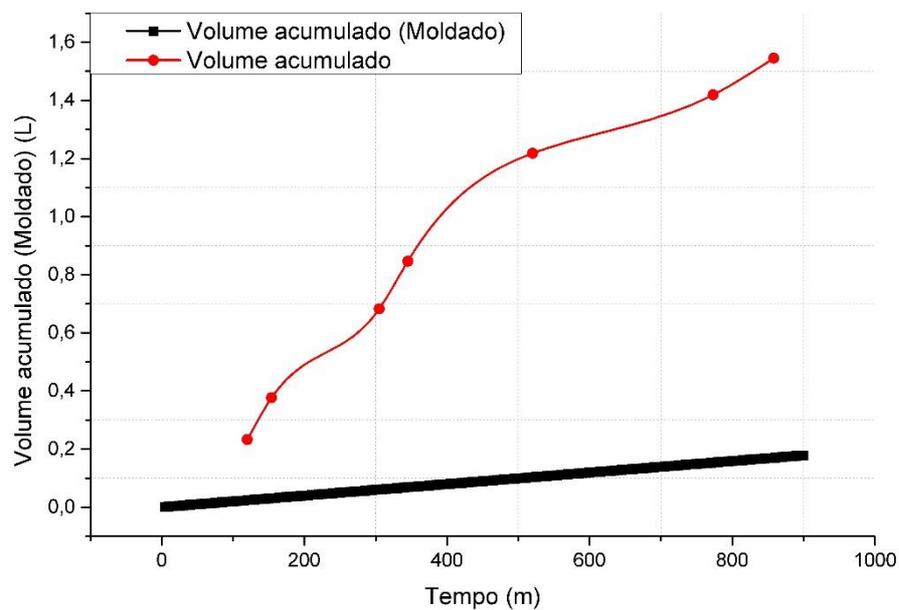


Figura 5.11– Volume de água acumulada experimental e calculado pela medição no molde.

Todos os valores teóricos foram bem menores que os valores medidos experimentalmente, mesmo resultado tirado de Chertkov (1998).

### 5.3 AVALIANDO SOMENTE COM CIF

Usando somente o valor de CIF, foram criadas superfícies cujos valores de áreas fissuradas fossem iguais ao valor manifestado na camada experimental. As mesmas são resultado de um algoritmo que a partir de posições aleatórias dentro de uma matriz, “cresce” as fissuras até certo comprimento e abertura aleatório definidos dentro de um intervalo.

A Figura 5.12 apresenta os resultados gerados pelo algoritmo, sendo que todas as imagens representadas têm o mesmo valor de CIF isto é de 10,75%. Em (a) estão representadas as fissuras paralelas com aberturas de 1 a 2 pixels e comprimentos de até 50 pixels; em (b) estão representadas as mesmas aberturas, mas com um ângulo de 45 graus entre as mesmas; em (c) estão representadas cruzetas, de mesma abertura, mas comprimentos variando de 1 a 10 pixels e em (d) estão representados quadrados cujo lado tem de 1 a 10 pixels.

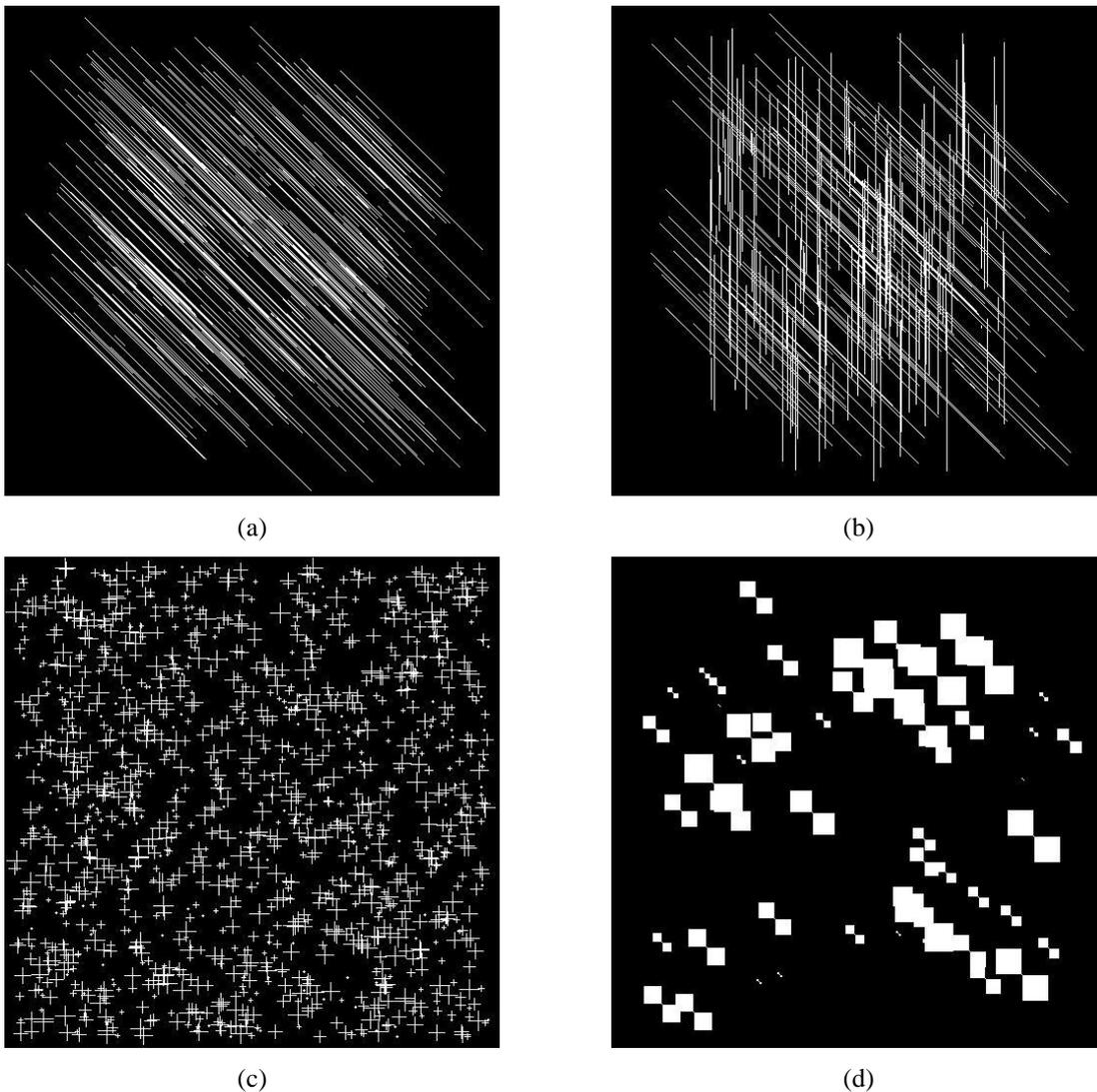


Figura 5.12– Superfícies de CIF equivalente à do ensaio, sendo (a) linhas paralelas, (b) linhas inclinadas, (c) as cruzetas e (d) o quadrados .

Nessas imagens, foram modificados alguns parâmetros, primariamente a disposição das fissuras equivalentes, o padrão da mesma e a abertura. Essas imagens geradas foram então transformadas em superfícies de profundidade equivalente por meio da calibração experimental e por meio da relação de Chertkov (1998).

A correlação de profundidade na Figura 5.13 é de Chertkov (1998). Em (a) estão representadas as fissuras paralelas com aberturas de 1 a 2 pixels e comprimentos de até 50 pixels; em (b) estão representadas as mesmas aberturas, mas com um ângulo de 45 graus entre as mesmas; em (c) estão representadas cruzetas, de mesma abertura, mas comprimentos variando de 1 a 10 pixels; e em (d) estão representados quadrados cujos lados tem de 1 a 10 pixels.

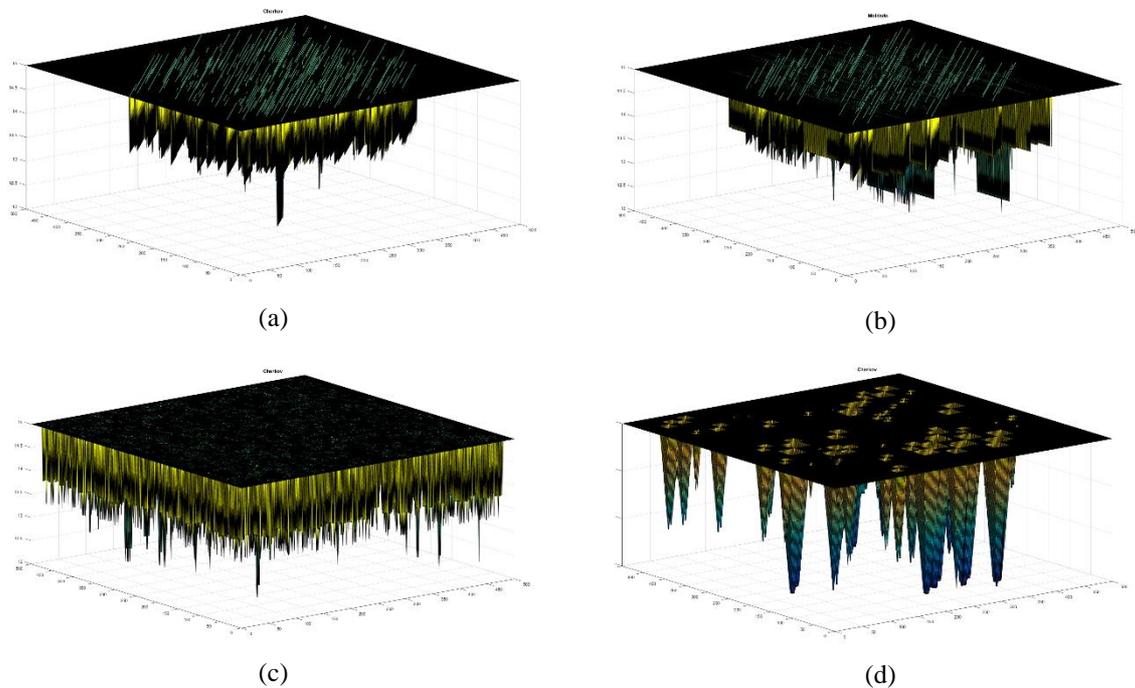


Figura 5.13– Superfícies geradas a partir de Chertkov (1998) , sendo (a) linhas paralelas, (b) linhas inclinadas, (c) as cruzetas e (d) o quadrados.

A correlação de profundidade apresentada na Figura 5.14 é de calibração empírica. Em (a) estão representadas as fissuras paralelas com aberturas de 1 a 2 pixels e comprimentos de até 50 pixels em (b) estão representadas as mesmas aberturas, mas com um ângulo de 45 graus entre as mesmas; em (c) estão representadas cruzetas, de mesma abertura, mas comprimentos variando de 1 a 10 pixels; e em (d) estão representados quadrados cujos lados tem de 1 a 10 pixels.

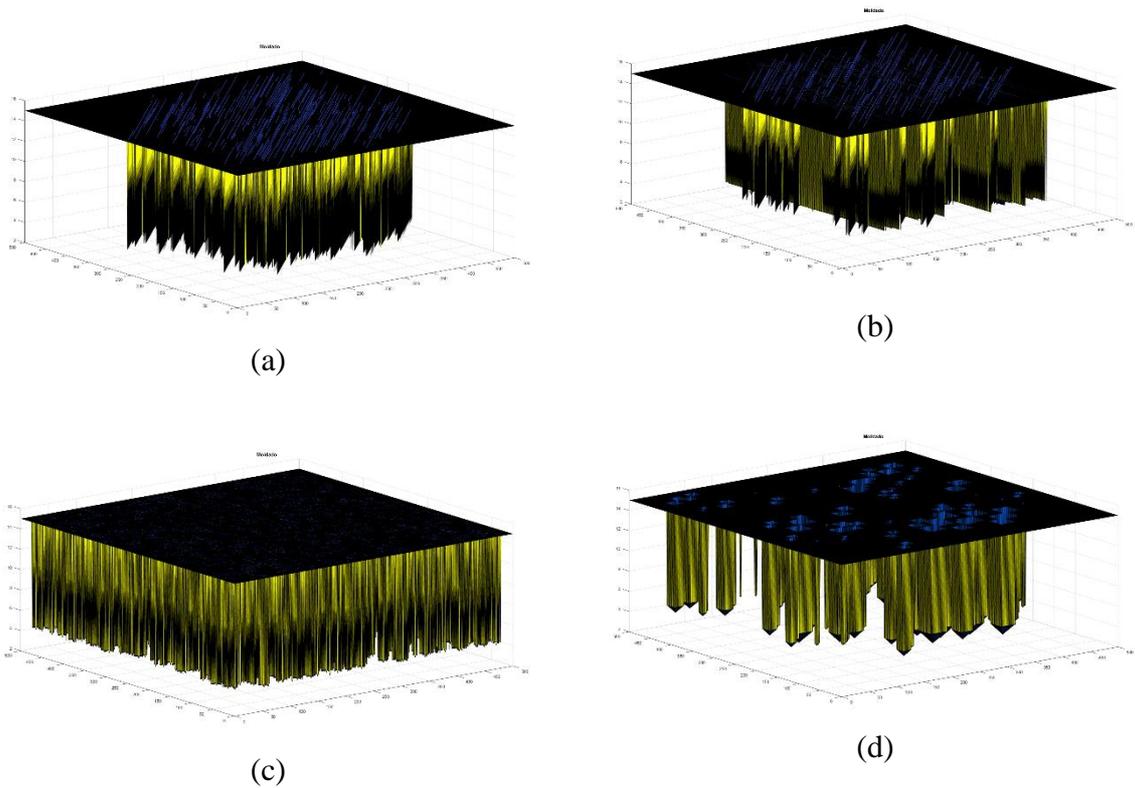


Figura 5.14– Superfícies geradas a partir da calibração por moldagem, sendo (a) linhas paralelas, (b) linhas inclinadas, (c) as cruzetas e (d) o quadrados.

Os resultados do volume acumulado da infiltração ao longo do tempo, para as imagens genéricas e calculado usando as relações de abertura tiradas da moldagem e Chertkov (1998) estão representados respectivamente na Figura 5.15 (a) e (b).

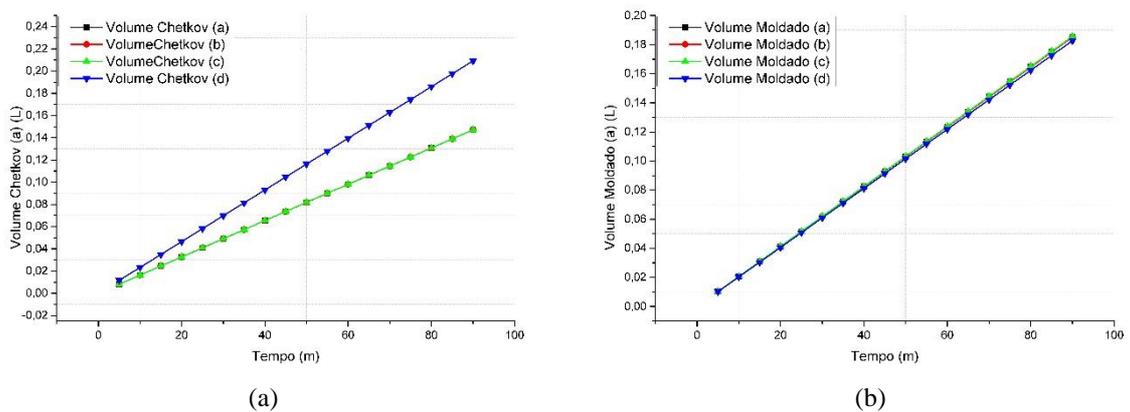


Figura 5.15– Valores de vazão acumulados por cada uma das superfícies aleatórias pela relação de Chertkov (1998) (a) e pela moldagem em (b)

Ao usar somente o valor de CIF, os modelos calibrados em acordo mostram pouca a nenhuma variação nos valores infiltrados. Mas ao usar um modelo baseado em valores de abertura reais, as “fissuras” de maior abertura apresentaram uma vazão maior.

#### 5.4 AVALIADO COM ABERTURA MÉDIA

A proposição de usar o CIF e o valor da abertura média como parâmetros para calcular as propriedades do meio teve como objetivo melhor representar o mesmo com um conjunto de parâmetros mais representativos. A Figura 5.16 representa em (a) a superfície real usada no ensaio e em (b) a superfície equivalente, em termo de CIF e abertura média.

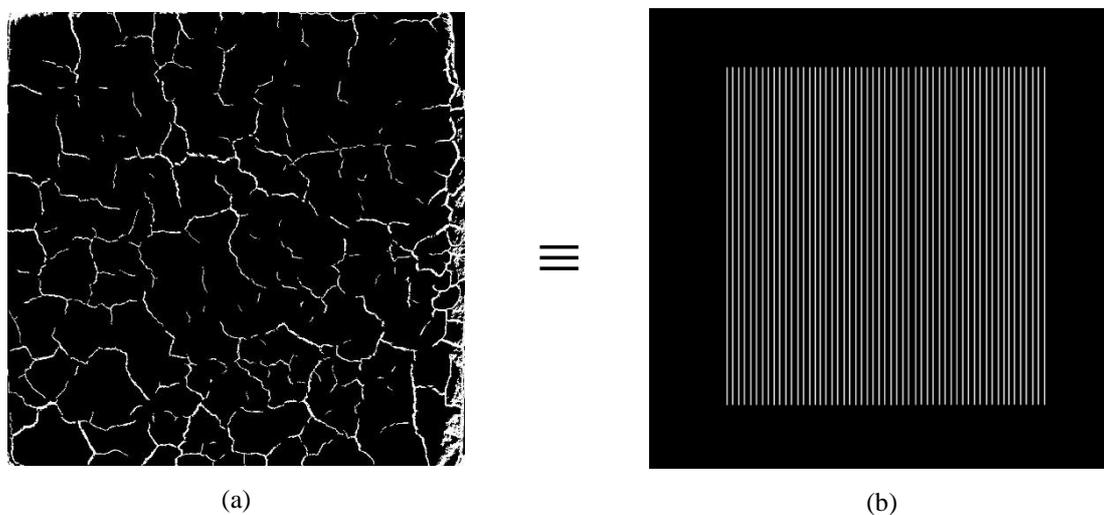


Figura 5.16 – Representação de duas superfícies com CIF e aberturas médias equivalentes, sendo (a) as fissuras naturais e (b) a representação equivalente.

A partir da superfície equivalente, foram então criados modelos tridimensionais em acordo com as correlações de medida direta, medida por moldagem e Chertkov (1998). Os resultados não são visualmente diferentes, mas estão representados na Figura 5.17 em (a), (b) e (c), respectivamente.

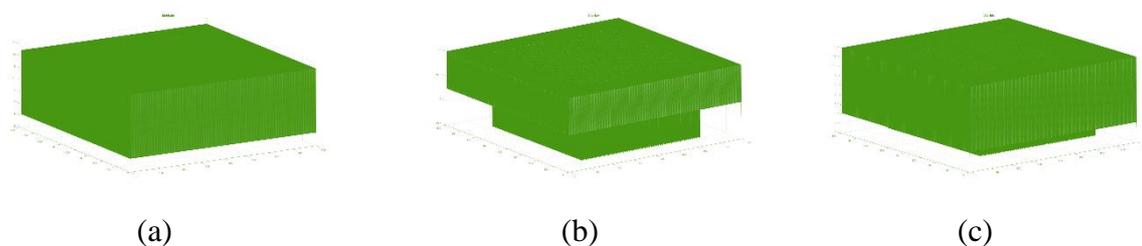


Figura 5.17– Representação das profundidades das fissuras equivalentes em relação a cada modelo, sendo (a) aferição direta, (b) moldagem e (c) Chertkov (1998).

Com os volumes fissurados definidos foi então calculada a infiltração ao longo da superfície equivalente de forma semelhante às anteriores e os resultados da superfície equivalente e os valores calculados para a superfície real foram plotados na Figura 5.18.

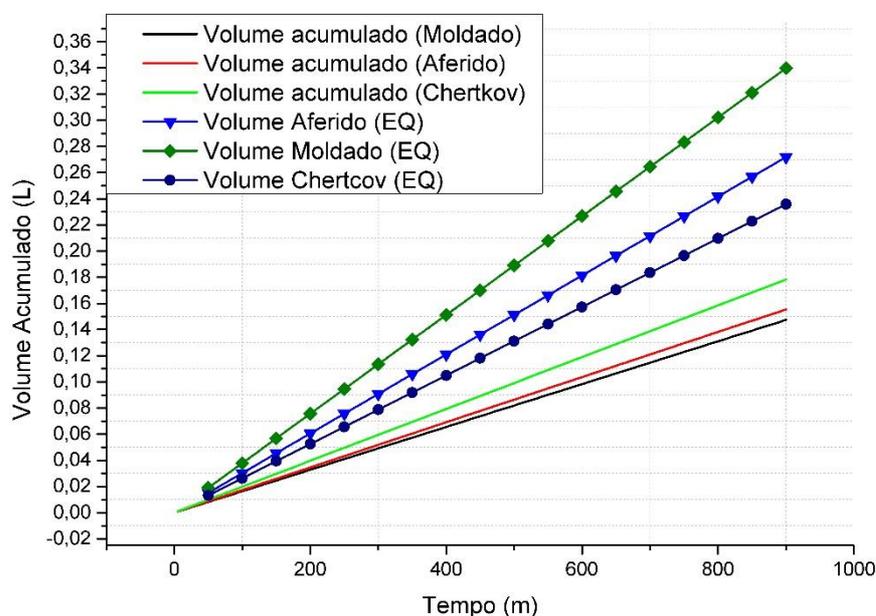


Figura 5.18– Resultados calculados para os valores a partir da equivalência de abertura e CIF

Como nessa situação se tem uma superfície equivalente sendo comparada com uma superfície real, os melhores valores são aqueles em que as curvas são mais próximas. Os valores de Chertkov (1998), o único modelo não baseado necessariamente em uma proporcionalidade, são os mais próximos aos valores teoricamente esperados pela superfície do terceiro ciclo.

Os resultados que não dependiam de uma correlação baseada em uma distribuição proporcional funcionaram melhor quando a superfície do solo foi transformada em uma superfície equivalente pelos parâmetros. Uma relação simples de proporcionalidade medida in-loco não apresentou resultados bons sendo ao mesmo tempo pouco sensível à abertura das fissuras e menos confiável em relação à superfície equivalente.

## 5.5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Os resultados experimentais de vazão acumulada foram muito maiores que os gerados por meio das simulações de percolação no meio fissurado.

Nenhum dos modelos de profundidade por abertura tinham sistemas de inchamento devido à reabsorção de água do meio e nenhum deles continha estimativas de tortuosidade. Com esses fenômenos desconsiderados na simulação, os resultados teóricos deveriam ser muito maiores, do que os experimentais, no entanto isso não ocorreu.

Uma justificativa para essa diferença entre os resultados poderia ser uma possível deformação da parede da caixa aliado à concentração de fissuras no contorno. Como ferramenta de análise, transformou-se a área fissurada lateral mais próxima da borda em uma trinca entre o solo e a parede da caixa que atravessava a camada inteira, permitindo o fluxo direto da água através do solo.

A Figura 5.19 representa em (a) a fissura lateral, em (b) a superfície alimentada ao programa e em (c) o volume gerado impondo a condição de que a fissura lateral atravessa a camada inteira.

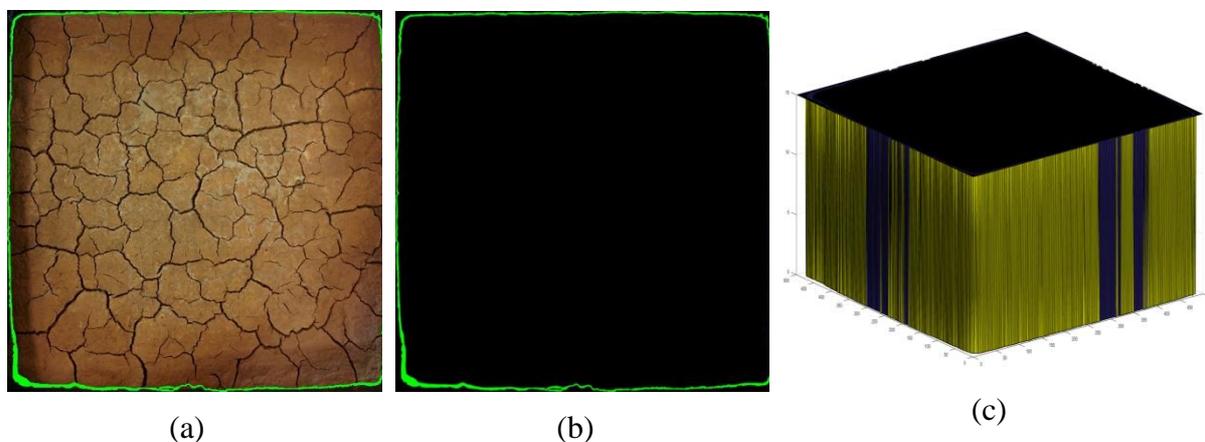


Figura 5.19– Representação da região fissurada lateral em (a), essa fissura isolada em (b) e transformada em superfície em (c).

A proximidade dos dados experimentais e os resultados calculado a partir da suposição da abertura lateral está representado na Figura 5.20.

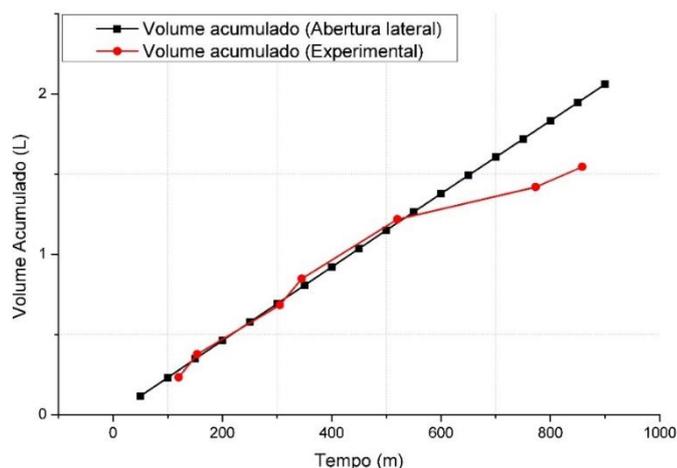


Figura 5.20– Volume de água acumulada experimental e calculado com fissuras de abertas junto às paredes.

Foram feitas comparações entre os resultados experimentais, os resultados esperados para a camada fissurada e os resultados esperados para a camada intacta. Os gráficos dos volumes percolados acumulados estão na Figura 5.21.

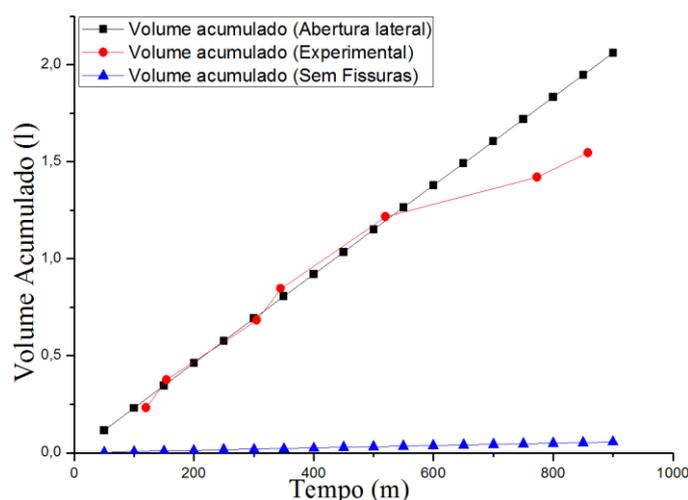


Figura 5.21 – Volume de água acumulada em três condições diferentes.

Embora nenhuma das fissuras no solo tenham atravessado o solo por inteiro em nenhuma das aferições, a vazão experimental foi 41 vezes maior que a vazão esperada para o meio não fissurado. Os resultados para a passagem de água na abertura lateral, entre o solo e a borda são muito mais próximos aos valores medidos que os valores esperados para o meio fissurado. Com esse resultado pode-se afirmar que a vazão relativamente grande é provavelmente resultado de uma passagem entre o solo e caixa que permitia a passagem de água em volume maior. Os resultados indicam, portanto que em situações fissuradas, o impacto da fissuração pode ser previsto por meio da percolação de Darcy.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÃO

A natureza desse trabalho era dupla, coletar dados experimentais no laboratório, para por sua vez verificar o algoritmo de reconhecimento e caracterização de fissuras. Com os dados dessas duas etapas foram feitas comparações entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados da simulação.

Do ponto de vista computacional, foi produzido um algoritmo com interface gráfica que permitiu de forma rápida e simples tirar propriedades complexas de imagens digitais de fissuras ou quaisquer figuras primariamente bimodais. Dados como distribuições de valores de aberturas, percentuais fissurados, comprimento das fissuras são obtidos de forma direta a partir do algoritmo produzido.

No entanto, um dos pontos mais fracos dentro do algoritmo foi a determinação do limiar da figura binária por Otsu. Poucos resultados dentro da grande massa de figuras ficaram razoáveis. Para a implementação do programa como uma máquina inteiramente autônoma seria necessário modificar ou mudar o sistema de determinação de *threshold* para soluções mais avançadas, com uma determinação por contraste local em áreas menores.

Materiais cujos grão eram maiores que um pixel da imagem geraram muita interferência no processo de reconhecimento das fissuras, sendo necessário reduzir as dimensões da matriz-imagem (gerando perda de informação) ou usar necessariamente um operador. Os esqueletos das fissuras nesses materiais granulares ou sem muitas fissuras apresentaram ruído, ou “plumas”, valores fora dos centróides das fissuras que foram contados durante as análises, gerando incrementos falso nos resultados feitos apenas com Otsu. Foi, portanto, necessário o uso do operador para minimizar o ruído oriundo de uma superfície não fissurada.

Os valores calculados de CIF foram compatíveis tanto pelo algoritmo quanto pela contagem em um programa de suporte, nesse caso *ImageJ*. A determinação do *threshold* ou limiar unicamente por Otsu mostrou-se falha para situações em que não há muita fissuração claramente definida.

As diferentes condições de contorno sugeridas na etapa de metodologia foram avaliadas e os diferentes materiais nas diferentes combinações de parâmetros mostraram comportamentos

interessantes, mas dentro do esperado. Alguns dos resultados mais interessantes ocorreram na variação de energia de compactação, na adição de sais e na repetição de alguns valores de abertura média, independentemente dos valores de CIF.

Foi observada uma convergência de valores médios de abertura ao longo do tempo, sendo que mesmo em diferentes valores de CIF, valores de abertura média continuam próximos. No entanto, em várias das situações estudadas, o aumento da área fissurada incorre em uma diversificação dos valores de abertura e não somente em um aumento das mesmas. Quando somente a variação da energia de compactação foi avaliada, o material teve um comportamento oscilatório, com as curvas das diferentes energias comportando-se como se tivessem sido deslocadas por fases

A partir das etapas de fissuração em pequena escala e com os resultados obtidos por suas análises foi possível definir as condições do ensaio em maior escala e calibrar o programa para a determinação mais efetiva do material a ser utilizado nas etapas de simulação. Foi usado o solo natural extraído de 2m de profundidade e ao mesmo foi adicionado 10% de bentonita em massa seca.

Os dois materiais componentes da mistura tinham uma granulometria fina, com  $D_{60}$  da bentonita em torno de  $6 \cdot 10^{-3}$  mm e do solo natural em torno de 0,12 mm. A bentonita pura é pouco trabalhável em quantidades maiores que as usadas nas placas de Petri, tornando o controle da homogeneização difícil;

O principal efeito da adição da bentonita, visível na curva de compactação é uma inflexão da curva no ramo úmido. A umidade ótima da mistura de solo e bentonita também foi alterada por meio da adição da argila, atingindo 23,3%, para a energia normal, em relação ao valor de quase 26% do solo puro.

Ao longo de uma série de ciclos de molhagem e ressecamento, foi verificada a tendência à estabilização na área fissurada ao longo do período. Os maiores valores de CIF não ocorreram necessariamente nos últimos ciclos, e em algumas amostras o máximo manifestava-se no segundo ou terceiro ciclo.

Quando em uma condição de repouso com o material fissurado saturado não havia sido previsto e não foi considerado na simulação essa deposição de argilomineral. Esse fenômeno interessante poderia ser previsto em aplicações futuras com o acoplamento da lei de Stokes ao sistema.

Após as análises pode-se afirmar que o estado de fissuração do solo de fato gerou um acréscimo da infiltração no solo, no entanto, esse acréscimo foi muito maior do que o esperado para os valores teóricos. Nenhuma das correlações proporcionou valores próximos da vazão acumulada ao longo do intervalo.

Após diferentes abordagens, as fissuras laterais mais próximas das paredes das caixas foram transformadas em aberturas que atravessavam a camada inteira, com resultados muito próximos aos experimentais.

Com esse resultado pode-se afirmar que a vazão relativamente grande é provavelmente resultado de uma passagem entre o solo e caixa que permitia a passagem de água em volume maior. Os resultados indicam, portanto que em situações fissuradas, o impacto da fissuração pode ser previsto por meio da percolação de Darcy e as correlações de profundidade moldada, em associação com as condições de contorno permitem avaliar o volume de.

## 6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O objetivo de produzir um programa que permite para a determinação de propriedades e parâmetros de camadas fissuradas a partir de imagens digitais foi atingido de forma razoável, mas ainda há muito espaço para desenvolvimento, especificamente nas áreas de reconhecimento, sendo que o programa ainda depende de um operador humano, primariamente para interpretar a foto binária e avaliar se está próximo do esperado.

Na etapa de detecção de geometria plana das matrizes binárias são necessárias poucas mudanças no algoritmo, possivelmente a adição de alguma rotina de *pruning* ou poda que tornaria o esqueleto mais apropriado à sua função de referência espacial como centroide da fissura.

A sub-rotina de determinação da dilatação era muito primitiva, e dependia de todas as outras rotinas, muitas vezes gerando a dilatação mínima de 1 pixel e poucas mudanças no sentido de conexão do esqueleto. Para essa situação talvez o acoplamento de técnicas auxiliares como CBMA (*catchment basins merging algorithm*) para a melhor análise da conexão entre fissuras seja o ideal. Melhora do sistema com operadores de gradientes que considerem processos de erosão e dilatação.

Na transformação da imagem plana em um meio tridimensional seria interessante o uso de modelos mecânicos mais adequados ou representativos do solo para associar o estado geométrico da fissura com sua natureza mecânica.

O uso de modelos mais modernos como o modelo de Shi et al (2013) depende de muitas outras variáveis e é bem mais complexo do que o de Chertkov (1998) e possibilita o entendimento da dinâmica das fissuras, seria de grande interesse usar algum modelo que preveja a tortuosidade das fissuras no plano vertical, propriedade que não é abordada em várias soluções de profundidade de fissuras.

Aplicar as mesmas técnicas de reconhecimento de fissuras e equivalência de meios fraturados para outras aplicações geotécnicas ou da engenharia. Algumas aplicações como pavimentação e geossintéticos poderiam aproveitar-se bastante da extração de dados a partir de imagens.

O uso de VANTS para o reconhecimento de fissuras em grandes áreas e para o catálogo de imagens é uma futura ferramenta para controle em tempo real de áreas grandes, em aterros ou em reservatório onde geomembranas são usadas.

O método de análise de fissuras é bastante flexível permitindo então a longo prazo o uso das mesmas para a extração de informações e parâmetros não triviais de aplicações sujeitas a fissuração.

As moldagens das fissuras do solo podem em conjunto com escâner tridimensional produzir cópias fieis das fissuras em umas futuras iterações que poderiam ser alimentadas diretamente aos sistemas. Por fim, é necessário em futuras iterações do ensaio, um controle muito grande das condições de contorno para avaliação das fissuras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS *Solo - Determinação do limite de liquidez*. NBR 6459 /2017. Rio de Janeiro, 2017

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. NBR 7180 /2016. Rio de Janeiro, 2016

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. NBR 6508 /2010. Rio de Janeiro, 2010

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS *Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio*. NBR 13292 /1995. Rio de Janeiro, 1995

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos*. NBR 8419/1996. Rio de Janeiro, 1996.

AKSU, I.; BAZILEVSKAYA, E.; KARPYN, Z.t.. Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability. **Georesj**, [s.l.], v. 7, p.1-13, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.003>.

ALBRECHT, B. A., BENSON, C. H. (2001). **Effect of desiccation on compacted natural clays**.ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1, 67–75.

ATIQUE, Alvis; SANCHEZ, Marcelo. Analysis of Cracking Behavior of Drying Soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2., 2011, Cingapura. **Proceedings...** . Cingapura: Iacsit Press, 2011. p. 66 - 70.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**, São Paulo: Oficina de Textos, 2008

BURGOS, J.F. (2016). **Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM- 272/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149 p

CHERTKOV, V. Y.. **Modeling the Crack Network of Swelling Clay Soils**. Soil Science Society Of America Journal, Madison, Wisconsin, p.1162-1171, set. 1998.

CIE (1926). *Commission internationale de l'éclairage proceedings, 1924*. Cambridge: Cambridge University Press.

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

DALTIN, Decio. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações**. São Paulo: Edgar Blucher, 2011. 321 p.

EGLOFFSTEIN, T.A. “**Natural Bentonites – Influence of the Ion Exchange and Partial Desiccation on Permeability and Self-healing Capacity of Bentonites Used in GCLs**”. Geotextiles and Geomembranes, 19, pp. 427-444, 2001.

FALCÃO, M.F.B., SOARES, J.B. **Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação**.

FILHO, Jaime De A. Gusmão. **Desempenho de Obras Geotécnicas**. 1. ed.: Editora Universitária UFPE, 2006. p. 395-407.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H... **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. : Wiley-Interscience , 1993.

GAZZIRO, Mario. **Quadro Segmentação de Imagens: Método de Otsu**. 2013. USP, São Carlos, Processamento de Imagens. Disponível em: <[http://wiki.icmc.usp.br/images/b/bb/Otsu\\_e\\_derivadas.pdf](http://wiki.icmc.usp.br/images/b/bb/Otsu_e_derivadas.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2016.

SCIENTIFIC VOLUME IMAGING (Org.). **Seed-and-threshold segmentation**. 2016. Disponível em: <<https://svi.nl/SeedAndThreshold>>. Acesso em: 01 maio 2016.

GUTIERREZ, D. A. R. (2015). **Análise do Processo de Ressecamento em Misturas de Resíduos de Construção Civil (RCC) e Bentonita para Aplicação em Camadas de Coberturas de Aterros de Resíduos Sólidos**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G.DM 255/15, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 114 p.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. 251p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HUSE, K. (2007). **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros**. 2007. 126p. Tese (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **10918-1: Information technology -- Digital compression and coding of continuous-tone still images: Requirements and guidelines**. 1 ed. Genebra: ISO, 1993. 189 p.

LI, Xiong-wei et al. **Unsaturated expansive soil fissure characteristics combined with engineering behaviors**. Journal of Central South University. Changsha, China, 12/2012. Caderno p. 3564–3571.s

KHLUDNEV, A. M.; KOVTUNENKO, V. A.. **Analysis of Cracks in Solids**. Moscou: Computational Mechanics, Inc., 1999. 386 p.

KERR, Douglas A.. **The CIE XYZ and xyY Color Spaces**. 2010. Stanford Computer Graphics Laboratory. Disponível em: <[https://graphics.stanford.edu/courses/cs148-10-summer/docs/2010--kerr--cie\\_xyz.pdf](https://graphics.stanford.edu/courses/cs148-10-summer/docs/2010--kerr--cie_xyz.pdf)>. Acesso em: 15 mar. 2016.

KURECIC, Manja; SFILIGOJ, Majda. Polymer Nanocomposite Hydrogels for Water Purification. **Nanocomposites - New Trends And Developments**, [s.l.], p.162-185, 27 set. 2012. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/51055>.

MAIA, Iva Marlene Cardoso. **CARATERIZAÇÃO DE PATOLOGIAS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**. Porto: Faculdade De Engenharia Da Universidade do Porto, 2012. Disponível em:

<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68091/1/000154859.pdf>. Acesso em: 20/03/2016

NOVAK, V.; SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN3, M. Th.. INFILTRATION OF WATER INTO SOIL WITH CRACKS. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**. Reston, Va, p. 41-47. fev. 2000.

O'DOWD, Noel. **Advanced Fracture Mechanics: Lectures on Fundamentals of Elastic, Elastic-Plastic and Creep Fracture, 2002–2003**. Londres: Imperial College London, 2003.

PORTO, T. G. **A infra-estrutura da via férrea**. 1984. 122p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

POYNTON, Charles. The rehabilitation of gamma. In: IS&T/SPIE'S INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONIC IMAGING: SCIENCE AND TECHNOLOGY, 10., 1998, San Jose. **Proceedings of SPIE/IS&T Conference 3299**. Bellingham: SPIE, 1998. v. 39, p. 1 - 18.

RIBEIRO, B. T. *ET al.* **Calibração e uso de minissimulador de chuva para estudos de erosão e poluição do solo**. In: Boletim Técnico, n. 77. Lavras: Ufla, 1-17, 2007

RUSS, John C.. **The Image Processing Handbook**. 7. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, Llc, 2016.

SANTOS, J.R.; SILVA, T.J.L. (2014). **Viabilidade do uso de um Solo Tropical e Fibras PET em Sistemas de Cobertura de Aterros Sanitários**. Trabalho de Projeto Final, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85 p.

SAARELA, J. **Hydraulic Approximation of Infiltration Characteristics of Surface Structures on Closed Landfills**. Finnish Environment Institute, Finland.1997.

SCURI, Antonio Escaño. **Fundamentos da Imagem Digital**. Rio de Janeiro: Tecgraf/puc-rio, 1999. 67 p.

SHI, Bei-xiao et al. Expansive Soil Crack Depth under Cumulative Damage. **The Scientific World Journal**. Londres, p. 1-10. 4 mar. 2013.

SHUWANG, Yan; BINGCHUAN, Guo; LIQIANG, Sun. **Cracking mechanism of soft clay in evaporation and desiccation conditions**. Japanese Geotechnical Society Special Publication. Tokyo, Japão, 11/2015. Caderno p. 378-381.

SOLARGIS. **Global Horizontal Irradiation**. 2013. Disponível em: <<http://solargis.com/assets/graphic/free-map/GHI/Solargis-Brazil-GHI-solar-resource-map-en.png>>. Acesso em: 11 nov. 2016.

**TECHNÉ: As causas de fissuras**. São Paulo: Pini, set. 1998. Mensal.

William B. Pennebaker; Joan L. Mitchell (1993). **JPEG still image data compression standard** (3rd ed.). Springer. p. 291. ISBN 978-0-442-01272-4

## SITES CONSULTADOS

<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/skeleton.htm> > Acesso em Fevereiro de 2016

<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/36/artigo287160-1.aspx> > Acesso em Março de 2016.

<http://www.mathworks.com/help/images/ref/hough.html> > Acesso em Fevereiro de 2017.

[https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Spherical\\_Waves\\_Point\\_Source.html](https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Spherical_Waves_Point_Source.html) > Acesso em Dezembro de 2016.

<http://www.womp-int.com/images/story/2010vol08/11d.jpg> > Acesso em Fevereiro de 2016.

[https://www.webelements.com/copper/atom\\_sizes.html](https://www.webelements.com/copper/atom_sizes.html) > Acesso em Fevereiro de 2017

<http://damnet.or.jp/cgi-bin/binran/enPAL.cgi?idm=72369> > Acesso em Junho de 2016

[http://www.mathworks.com/help/matlab/math/ch\\_data\\_struct5.gifs](http://www.mathworks.com/help/matlab/math/ch_data_struct5.gifs) > Acesso em Fevereiro de 2016.

[https://dotcolordotcom.files.wordpress.com/2012/12/pantone\\_2013\\_dot\\_color.png](https://dotcolordotcom.files.wordpress.com/2012/12/pantone_2013_dot_color.png) > Acesso em Dezembro de 2016.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGB\\_Cube\\_Show\\_lowgamma\\_cutout\\_b.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGB_Cube_Show_lowgamma_cutout_b.png) > Acesso em Dezembro de 2016.

<http://www.theasc.com/magazine/april05/conundrum2/image11.html> > Acesso em Dezembro de 2016.

[http://www.intechopen.com/source/html/38555/media/image1\\_w.jpg](http://www.intechopen.com/source/html/38555/media/image1_w.jpg) > Acesso em Dezembro de 2016.

# CRONOGRAMA

ETAPA	02/16	03/16	04/16	05/16	06/16	07/16	08/16	09/16	10/16	11/16	12/16	01/17	02/17	03/17	04/17	05/17
Revisão Bibliográfica																
Defesa de seminário																
Etapa Laboratorial																
Etapa computacional																
Análise dos resultados																
Elaboração da Tese																
Defesa da tese																
Correções da tese																

# ANEXOS

## Programa de avaliação das aberturas das fissuras

```
function varargout = ProtoAvaliador(varargin)
% PROTOAVALIADOR MATLAB code for ProtoAvaliador.fig
% PROTOAVALIADOR, by itself, creates a new PROTOAVALIADOR or raises the existing
% singleton*.
%
% H = PROTOAVALIADOR returns the handle to a new PROTOAVALIADOR or the handle to
% the existing singleton*.
%
% PROTOAVALIADOR('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
% function named CALLBACK in PROTOAVALIADOR.M with the given input arguments.
%
% PROTOAVALIADOR('Property','Value',...) creates a new PROTOAVALIADOR or raises the
% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%
% PREFORMATTED
% TEXT
%
% applied to the GUI before ProtoAvaliador_OpeningFcn gets called. An
% unrecognized property name or invalid value makes property application
% stop. All inputs are passed to ProtoAvaliador_OpeningFcn via varargin.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help ProtoAvaliador

% Last Modified by GUIDE v2.5 17-Feb-2017 11:57:16

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @ProtoAvaliador_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @ProtoAvaliador_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before ProtoAvaliador is made visible.
function ProtoAvaliador_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin command line arguments to ProtoAvaliador (see VARARGIN)
```

```

% Choose default command line output for ProtoAvaliador
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes ProtoAvaliador wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = ProtoAvaliador_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{ 1 } = handles.output;

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
[filename pathname] = uigetfile({'*.jpg'},'File selector'); % abre interface para importar arquivo, ressaltando arquivos .jpg;
fullpathname = strcat(pathname, filename); % extrai uma string que é o endereço do arquivo;
set(handles.edit1, 'String',fullpathname); % escreve o endereço no campo editável;
global ori
% global h
global titus

titus = strrep(filename, '.jpg', ' ');
ori = importdata(get(handles.edit1,'string')); % importa a imagem original

h1=findobj('Type','axes','Tag','axes1');
%axes (h1);
axes(handles.axes1)
image (ori)
% axis off % desliga eixos
axis image % plota imagem no espaço da GUI
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

global ori
global cin
global level
global pb

cin = rgb2gray (ori); %transforma em escala de cinza
level = graythresh(cin);
pb = imcomplement(im2bw(rgb2gray(ori),level));

% global check
% check = get(handles.checkbox1, 'Value');
% if check==0
% pb = im2bw(rgb2gray(ori),level);
% else
% pb = im2bw(imcomplement(rgb2gray(ori)),level);
% end

set(handles.slider1,'Value', level);
% h2= findobj('Type','axes','Tag','axes2');
axes(handles.axes2)
imshow (pb)

axis off
axis image

% hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
global h
global pb
% global check
% check = get(handles.checkbox1, 'Value');
%
% if check==1
% pbi = imcomplement(pb); %pbintermediário
% else
% pbi = pb;
% end

% h3=findobj('Type','axes','Tag','axes3');
axes(handles.axes3)
BW1 = bwareaopen(pb, 40, 8);
imshow (BW1)
pb = BW1;
axis off
axis image
% hObject handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pb
global aber
global hcont

```

```

global fg %fator geométrico
global esq

t = size(pb);
fg = (get(handles.edit5,'value')/t(1,1));
aber = zeros(t);
esq0 = bwmorph(pb,'skel',Inf);
esq = bwmorph(esq0,'spur');

comp = imcomplement (pb);
dist = bwdist (comp);

for i=1:t(1,1)
    for j = 1:t(1,2)
        if esq (i,j)==1;
            aber(i,j)= dist(i,j);
        end %if end
    end %for end
end %for end

dado = zeros(1,nnz(aber));
k=1;

for i=1:t(1,1)
    for j = 1:t(1,2)
        if esq (i,j)~=0;
            dado(1,k)= single(aber(i,j));
            k=k+1;
        end %if end
    end %for end
end %for end

t = size(pb);
area = (pi*(t(1,1))^2)/4;

cif = 100*(nnz(pb)/(area));
abem = fg*median(dado);
dpad = fg*std (dado);

set (handles.edit2,'String', cif);
set (handles.edit3,'String', abem);
set (handles.edit4,'String', dpad);

% h4=findobj('Type','axes','Tag','axes4');
axes(handles.axes4)
imshow (aber)
axis off
axis image

% h4=findobj('Type','axes','Tag','axes5');
axes(handles.axes5)
axis on
h = histogram(dado,10)
hcont = table(transpose(h.BinEdges),[0;transpose(h.Values)]);

% hObject   handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on slider movement.
function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global ori

```

```

global pb
global check
global level

check = get(handles.checkbox1, 'Value');
set(handles.slider1, 'min', 0);
set(handles.slider1, 'max', 1);
sli = get(handles.slider1, 'Value');
level = sli;

if check==0
pb = im2bw(rgb2gray(ori),level);
else
pb = im2bw(imcomplement(rgb2gray(ori)),level);
end

imshow (pb)

% hObject handle to slider1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
% get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to slider1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
global titus
global hcont
global esq
global pb

nome = strcat(titus,'ESQOp','.jpg');
nome2 = strcat(titus,'ABEOp','.txt'); %resultado somente com OTSU
nome3 = strcat(titus,'BW','.jpg'); %resultado somente com OTSU

imwrite(pb,nome3)
imwrite(esq,nome);
writetable(hcont,nome2,'WriteRowNames',true,'Delimiter','\t')
% clear all

% dlmwrite (titus, hcont,'delimiter','\t','precision',3)
% hObject handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% --- Executes on button press in checkbox1.
function checkbox1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to checkbox1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox1

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

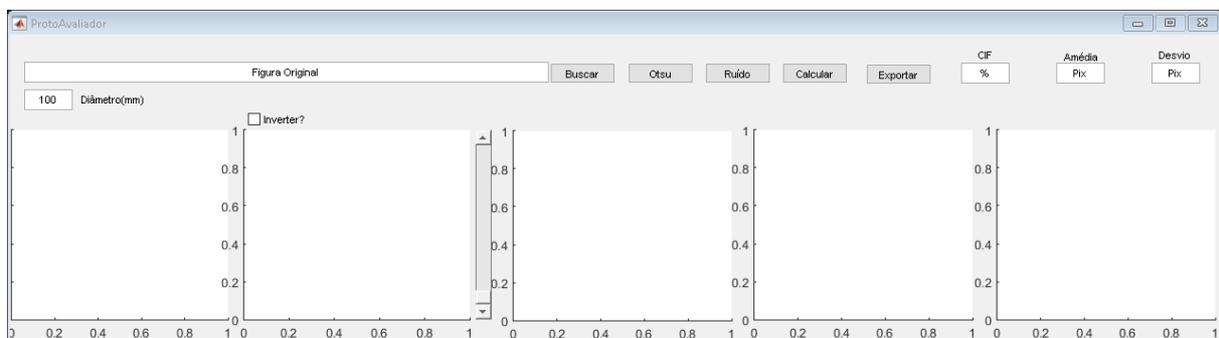
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes2

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes2

```



## Programa de avaliação da permeabilidade

```
%%%%%%%%%%IMPORTAR
IMAGEM%%%%%%%%%%

ori = importdata ('K3BW500.jpg');
%orig = rgb2gray (ori);
pb = im2bw (ori, 0.1);
comp = imcomplement (pb);
dist = bwdist (comp); %%%% matriz da transformada de distância

%%%%%%%%%%GEOMETRIA DA
CAIXA%%%%%%%%%%

lar = 0.5; %largura da caixa
com = 0.5; %comprimento da caixa
ac = lar*com; %área da caixa em metros quadrados
hc = 0.4; %altura da caixa em metros
hs = 0.15; %altura máxima do solo em m²
vola = 10; %volume de água inserido em l
uns = ones(size(dist)); %dimensões da matriz caixa unitária

%%%%%%%%%%PROPRIIDADES DO
MEIO%%%%%%%%%%

pmax = 0.9; %penetração máxima das aberturas em %
amax = max(max(dist));%abertura máxima
perm = 8.1E-9; %permeabilidade da matriz de solo m*s¹

distad = dist./amax;%distância adimensional ou em percentual do máximos.
tamdis= size(distad);%dimensão da matriz de transformada de distância
Cher = [4*30].*(amax./tamdis(1,1)).*(lar*10);%matriz de Chertkov
Afer = [5.286 3.224 -0.12891 0.0029 -2.9737E-5 1.1234E-7];%parâmetros aferidos, argumentos da regressão
Mold = [10.04605 1.38368 -0.04716 0.00125 -1.54E-5 7.193E-8];%parâmetros moldados, argumentos da regressão

profC = ones(size(distad));
profA = ones(size(distad));
profM = ones(size(distad));
esps = hs*100*ones(size(distad)); %espessura do solo

for i=1:tamdis(1,1)
    for j = 1:tamdis(1,2)
        k = distad(i,j);
        if k>0

            profC (i,j)=esps(i,j)-Cher*distad(i,j);
            profA (i,j)=esps(i,j)-
            (Afer(1)+Afer(2)*distad(i,j)+Afer(3)*(distad(i,j)^2)+Afer(4)*distad(i,j)^3+Afer(5)*(distad(i,j))^4+Afer(5)*(distad(i,j))^5);
            profM (i,j)=esps(i,j)-
            (Mold(1)+Mold(2)*distad(i,j)+Mold(3)*(distad(i,j)^2)+Mold(4)*distad(i,j)^3+Mold(5)*(distad(i,j))^4+Mold(5)*(distad(i,j))^
            5);

        else

            profC (i,j)= esps(i,j);
            profA (i,j)=esps(i,j);
            profM (i,j)=esps(i,j);

        end % if end

    end %for end
end %for end
```

```

% for i=1:tamdis(1,1)
%   for j = 1:tamdis(1,2)
%     if profA (i,j)<0
%       profA (i,j)=0;
%     else
%       profA (i,j)= profA (i,j);
%     end %end ifA
%
%     if profM (i,j)<0
%       profM (i,j)=0;
%     else
%       profM (i,j)= profM (i,j);
%     end %end ifC
%
%     if profC (i,j)<0
%       profC (i,j)= 0;
%     else
%       profC (i,j)= profC (i,j);
%     end %end ifC
%   end
% end

% profC(1,:) = 0.002;
% profC(end,:) = 0.002;
% profC(:,1) = 0.002;
% profC(:,end) = 0.002;

% figure
% subplot (1,3,1);
% surf(profC);
% title('Cherkov')

% figure
% subplot (1,3,2);
% surf(profA);
% title('Aferido')

figure
% subplot (1,3,3);
surf(profM);
title('Moldado')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE
ÁGUA%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

dmax = (pmax*hs)/amax;%correlação da abertura com profundidade

lam0 = (hc-hs)*uns; %lâmina de água inicial

prof = hs*(uns)-dmax*dist; %matriz de espessura dos solos

% Vi = ac*(hc-hs); % Volume de água inicial em m³

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ITERAÇÃO%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

deltat = 300; %Intervalo do step de tempo em s
steps = 43; %Número de steps tomados
deltah = 0; %decrécimo de carga devido a água percolada inicial=0
ael = ac/numel(uns);%área do elemento
dadox = linspace(1,steps,steps); %identificação do step
dadoy = ones(1,steps);%identificação da vazão em cada passo
dadoz = ones(1,steps); % identifica soma das vazões

```

```

vacum = 0; % vazão acumulada
vazs = 0*uns;% vazão suporte para plotar
h0=hc;

for i=1:steps
h0=h0-deltah;
carga = h0*uns; %carga em cada ponto de solo
grad = carga*(0.1*uns./profC); % gradiente em cada ponto
vaz = ael*deltat*perm*grad; % vazão em cada step de tempo
totalv = sum(vaz(:));%total vazado
vazs = (vazs+vaz);
deltah = (totalv/ac); %variação da altura da lâmina
dadoy(1,i)=totalv;
vacum = vacum+totalv; % vazão acumulada
dadoz(1,i)= vacum;
end %if end
datav= table(transpose(5*dadox),transpose(dadoy)); %dados da vazão
datac=table(transpose(5*dadox),transpose(1000*dadoz)); %dados acumulado

writetable(datav,'vazão','WriteRowNames',true,'Delimiter','\t')
writetable(datac,'acumu','WriteRowNames',true,'Delimiter','\t')

%%%%%%%%%%%%%%Superficies e
Geometria%%%%%%%%%%%%%%

figure
subplot (1,3,1);
plot(dadox, dadoy);
title('Vazão')

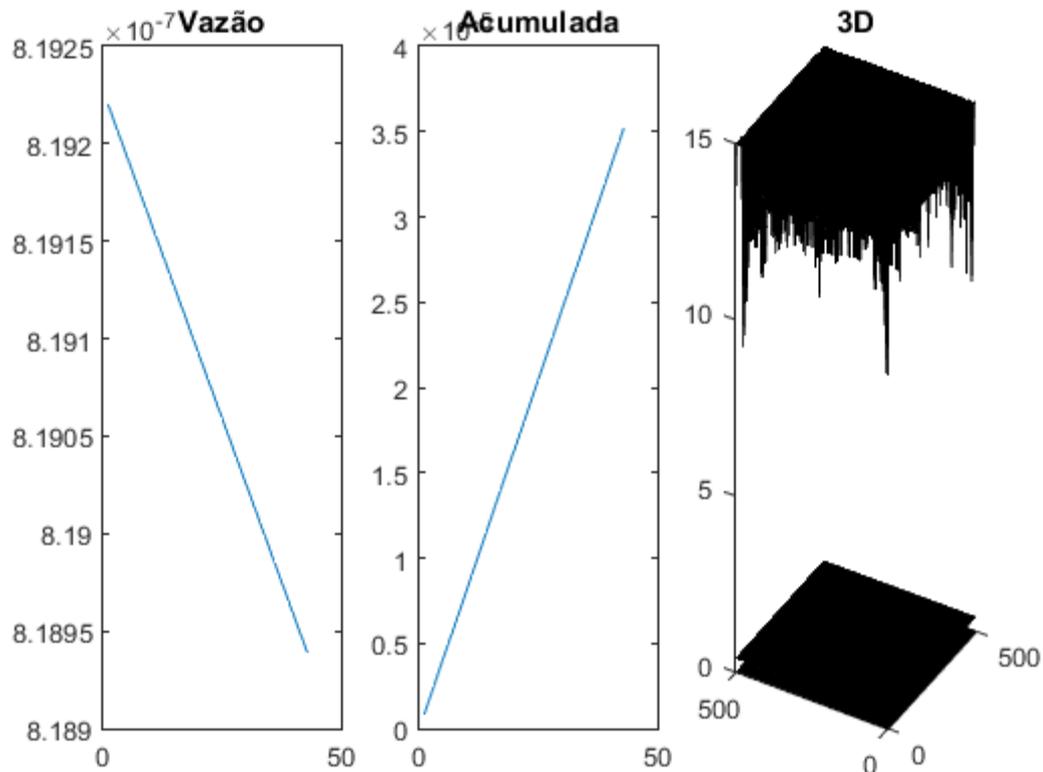
subplot (1,3,2);
plot(dadox, dadoz);
title('Acumulada')

subplot (1,3,3);
hold on
surf (profC);
surf (carga);
surf (vazs);
title('3D')

surf (profC);
surf (carga);
surf (vazs);
view(-60, 12)

%%%%%%%%%%%%%%Assumindo
inchamento%%%%%%%%%%%%%%

```



*Published with MATLAB® R2015a*

## Programa de geração de superfícies equivalentes

```

clear all
dimens = [500 500];
figi = zeros (dimens);%Figura a ser criada
numfi = 0.1075*numel(figi);%número de celulas a preencher
d=0; %identificador do ciclo
somapix=0; %controle de superficie fissurada
c=30; %comprimento

for i=1:numfi;
    if somapix>numfi
        d=0;
    else

germ = randi([(1+c) (dimens(1,2)-(1+c))], 1,2);

figi(germ(1,1),germ(1,2))=1;%gérmen da figura
dira = randi([1 c], 1,1); %acrécimo aleatório no gérmen

for j=1:dira
    for k=1:dira

```

```
figi(germ(1,1)+j,germ(1,2)+j)=1;  
figi(germ(1,1)+k,germ(1,2)+k)=1;  
figi(germ(1,1)-k,germ(1,2))=1;  
figi(germ(1,1),germ(1,2)-j)=1;
```

```
end  
end
```

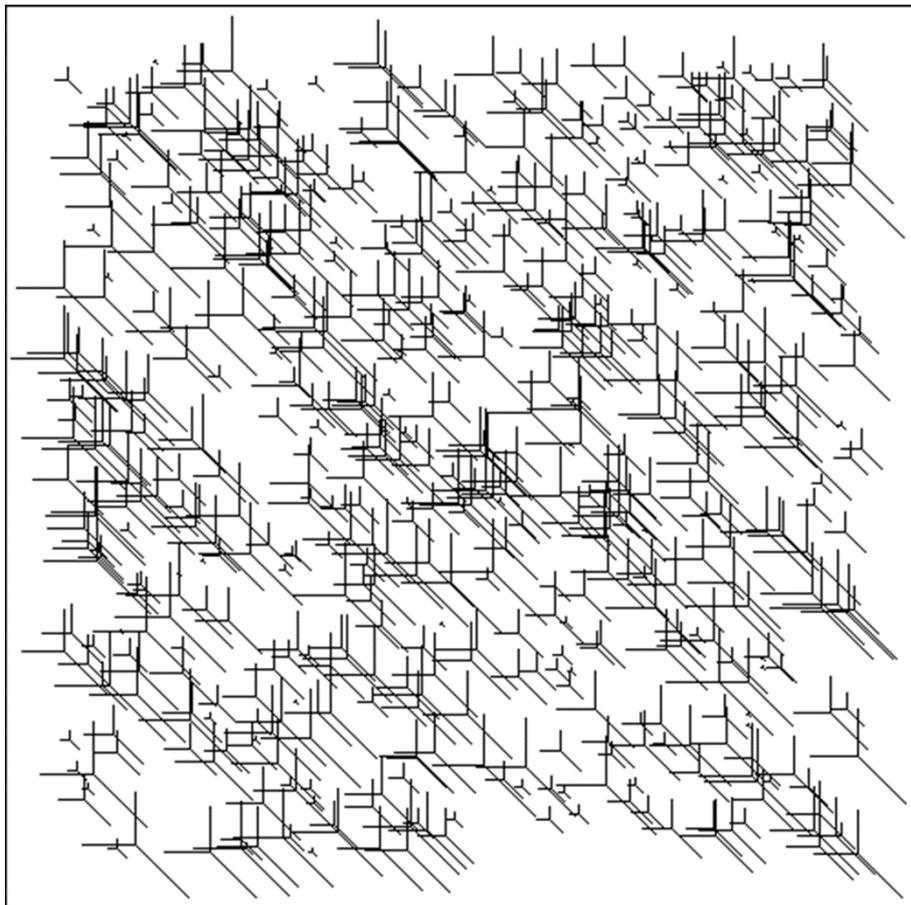
```
d=d+1;
```

```
somapix=nnz(figi);
```

```
end
```

```
end
```

```
imshow (figi);  
% imwrite(figi,'rand7.jpg')
```



*Published with MATLAB® R2015a*