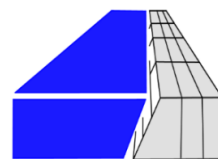




UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



JEFFERSON PEDRO DOS SANTOS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA PARA CARACTERIZAÇÃO DE MEIOS
FRATURADOS EMPREGANDO TÉCNICA DE SCANLINE E ANÁLISE
TOPOLÓGICA DE IMAGENS**

Recife

2018

JEFFERSON PEDRO DOS SANTOS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA PARA CARACTERIZAÇÃO DE MEIOS
FRATURADOS EMPREGANDO TÉCNICA DE SCANLINE E ANÁLISE
TOPOLÓGICA DE IMAGENS**

Dissertação ou Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em engenharia civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em engenharia civil.

Área de concentração: Simulação e Gerenciamento de reservatórios de Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes.

Recife

2018

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

S586d	Silva, Jefferson Pedro dos Santos. Desenvolvimento de ferramenta para caracterização de meios fraturados empregando técnica de scanline e análise topológica de imagens / Jefferson Pedro dos Santos Silva. - 2018. 122 folhas, il., gráfs., tabs. Orientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018. Inclui Referências e Anexo. 1. Engenharia Civil. 2. Sistemas fraturados. 3. Caracterização geológica. 4. Permeabilidade equivalente. I. Gomes, Igor Fernandes. (Orientador). II. Título. UFPE 624 CDD (22. ed.) BCTG/2018-291
-------	---

JEFFERSON PEDRO DOS SANTOS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA PARA CARACTERIZAÇÃO DE MEIOS
FRATURADOS EMPREGANDO TÉCNICA DE SCANLINE E ANÁLISE
TOPOLÓGICA DE IMAGENS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em engenharia civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em engenharia civil.

Aprovada em: 25/05/2018.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Igor Fernandes Gomes (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Manoel Porfírio Cordão Neto (Examinador Externo)

Universidade de Brasília

Profª. Drª. Leila Brunet de Sá Beserra (Examinadora Externa)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares pela compreensão e respeito nesta jornada, como também pela atenção e esforço ligados a minha educação e meu bem estar. À minha amiga e companheira Isabelle, pela dedicação, atenção e companheirismo durante as diversas fases deste trabalho;

Ao professor Igor Fernandes Gomes pela orientação, que em todos os momentos contribuiu com ideias valiosas para o desenvolvimento do trabalho;

Ao amigo Rafael Santos, pelas diversas ideias e orientações na área de sistemas fraturados;

A Ricardo Guedes, Bruno Marcelo e Leidy Laura, por compartilhar suas experiências e conhecimentos ligados a simulação numérica;

Ao Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica (LMCG) por ceder a infraestrutura necessária para desenvolvimento do trabalho.

À Computer ModelingGroup (CMG) pela concessão da bolsa de estudos;

RESUMO

Várias técnicas têm sido desenvolvidas e aperfeiçoadas para caracterização, modelagem e simulação de reservatórios naturalmente fraturados, devido a necessidade da produção de hidrocarbonetos da forma mais eficiente, uma vez que as fraturas têm influência direta sobre a permeabilidade e porosidade da rocha e sobre o fluxo de fluidos no seu interior. A adoção de estudos aplicados a afloramentos de reservatórios análogos tem sido largamente considerada devido à possibilidade de uma melhor caracterização da rocha em relação aos reservatórios em subsuperfície. Há diversas formas de coleta de dados na etapa de caracterização do meio fraturado como, por exemplo, imagens de satélite e fotografias aéreas com veículos aéreos não tripulados (UAVs), tecnologia de varredura de laser (LIDAR) entre outras, possibilitando a obtenção de grande quantidade de dados, estes devem ser processados por programas que possibilitem extrair informações acerca da região de estudo de forma eficaz. A partir destes dados de imagem grande parte dos programas disponíveis como FraNEP, FracPac e DigiFract, entre outros, obtêm as informações geométricas do meio, porém apenas o FracPac considera a topologia das fraturas que tem grande importância sobre o fluxo. Desta forma o presente trabalho visa a construção de um programa que obtêm, a partir de imagens/vídeos, as informações geométricas e também as topológicas, caracterizando o meio a partir de *scanline* linear e topologicamente, este programa é intitulado de TopoScan. Além da caracterização, as informações geradas pelo programa foram utilizadas para a construção de modelos computacionais para simulações numéricas de fluxo de fluido, permitindo validar, para determinados padrões topológicos, quais são as relações com a permeabilidade equivalente do meio. Quatro sistemas artificiais de redes de fraturas foram construídos, com parâmetros de abertura e comprimento definidos previamente, para os diferentes padrões topológicos X, Y, I e XYI, permitindo calibrar, validar e simular o fluxo de fluido para cada caso, identificando as relações topológicas com a permeabilidade equivalente do meio. Para o caso prático foi utilizada a imagem de campo no Granito do Cabo, litoral de Pernambuco, caracterizando o meio e simulando o fluxo de fluido. Os casos apresentados demonstram que a ferramenta construída obteve bons resultados nas caracterizações além de possibilitar com as informações geradas fazer simulações numéricas de fluxo de fluido identificando como as relações topológicas influenciam na permeabilidade equivalente do meio.

Palavras-chave: Sistemas fraturados. Caracterização geológica. Permeabilidade equivalente.

ABSTRACT

Several techniques have been developed and improved for the characterization, modeling and simulation of naturally fractured reservoirs, due to the need of hydrocarbon production in a more efficient manner, since the fractures have a direct influence on the permeability and porosity of the rock and fluid flow through it. Studies applied to outcrops of analogue reservoirs has been widely considered in the study of fractured media, due to the possibility of a better characterization of the rock in relation to the subsurface reservoirs. There are several ways of collecting data in the characterization stage of the fractured media: satellite images and aerial photographs with unmanned aerial vehicles (UAVs), laser-scanning technology (LIDAR), among others. These make it possible to obtain a large amount of data, which must be processed by programs that make it possible to extract information about the studied region in an effective way. From this image data, most of the available programs such as FraNEP, FracPaq and DigiFract, among others, obtain the geometric information of the media, but only FracPaq considers the topology of the fractures that has great importance on the flow. The present work aims the construction of a program that obtains, from images / videos, the geometric and the topological information, characterizing the medium from linear *scanline* and topologically, this program is named TopoScan. In addition to the characterization, the information generated by the program were used to construct computational models for numerical fluid flow simulations, allowing validation, for certain topological patterns, of the relations with the equivalent permeability of the medium. Four artificial systems of fracture networks were constructed with previously defined opening and length parameters for the different topological patterns X, Y, I and XYI, allowing to calibrate, validate and simulate the fluid flow for each case, identifying the topological relationships with the equivalent permeability of the medium. For the practical case, the field image on the Cape Granite was used, characterizing the medium and simulating the fluid flow. The cases presented demonstrate that the tool constructed obtained good results in the characterizations, besides enabling the generated information to make numerical simulations of fluid flow, identifying how the topological relations influence the equivalent permeability of the media.

Keywords: Fractured systems. Geological characterization. Equivalent permeability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Mapa da região da chapada do Araripe.....	17
Figura 2 –	RaspberryPi 2 Model B.....	24
Figura 3 –	Aplicação da técnica scanline.....	25
Figura 4 –	Correção de Terzaghi para abertura.....	26
Figura 5 –	Padrões topológicos, nós (I) círculos verdes, nós (Y) triângulos vermelhos e nós (X) diamantes azuis.....	27
Figura 6 –	Resultado da identificação das fraturas do FracPac.....	28
Figura 7 –	Fluxograma dos processos utilizados na metodologia do trabalho.....	30
Figura 8 –	Esquema da comunicação entre os equipamentos.....	31
Figura 9 –	Imagem do piso do laboratório obtida pela câmera GoPro.....	32
Figura 10 –	Distorção radial nas imagens.....	33
Figura 11 –	Distorção tangencial.....	34
Figura 12 –	Lado esquerdo (a), imagem antes da calibração, lado direito (b), após a calibração.....	35
Figura 13 –	Fluxograma do programa construído no MATLAB.....	37
Figura 14 –	Ângulo para identificação das famílias de fraturas.....	38
Figura 15 –	Marcação das fraturas e aberturas.....	39
Figura 16 –	Imagem com as fraturas de 1 pixel de largura.....	40
Figura 17 –	Imagem com as fraturas de 3 pixels de largura.....	40
Figura 18 –	Imagem com as fraturas de N pixels de largura.....	41
Figura 19 –	Transformação morfológica skeletonization.....	41
Figura 20 –	Representação em binário de uma imagem no cruzamento de linhas.....	42
Figura 21 –	Representação em binário de uma imagem para o fim de linhas.....	42
Figura 22 –	Representação da detecção do cruzamento e fim ao mesmo tempo.....	43
Figura 23 –	Padrões topológicos obtidos pelo TopoScan.....	44
Figura 24 –	Contorno da imagem com as fraturas de N pixels de largura.....	45
Figura 25 –	Esquema que mostra pontos de cruzamento, linha scanline e aberturas.....	46
Figura 26 –	Esquema da aproximação de descontinuidades forte: (a) elemento finito com fratura embebida; (b) tratamento do vetor de fluxo na descontinuidade.....	48
Figura 27 –	Tipos de fraturas criadas para construção dos padrões topológicos.....	50
Figura 28 –	Sistema fraturado construído para validação com predominância de padrões I.....	51

Figura 29 –	Scanlines para imagem dos padrões I processados no TopoScan.....	51
Figura 30 –	Lei de potência set A, scanline 1.....	52
Figura 31 –	Lei de potência set A, scanline 2.....	52
Figura 32 –	Lei de potência set A, scanline 3.....	52
Figura 33 –	Lei de potência set A, scanline 4.....	53
Figura 34 –	Lei de potência set B, scanline 5.....	53
Figura 35 –	Lei de potência set B, scanline 6.....	53
Figura 36 –	Lei de potência set B, scanline 7.....	54
Figura 37 –	Lei de potência set B, scanline 8.....	54
Figura 38 –	Lei de potência média set A (a) e set B (b).....	55
Figura 39 –	Boxplot dos erros relativo das aberturas (a) e dos comprimentos (b)....	56
Figura 40 –	Curva teórica (a) e curva com os dados reais (b) da abertura x comprimento das fraturas.....	57
Figura 41 –	Padrões topológicos, predominância I.....	58
Figura 42 –	Diagrama ternário mostrando predominância do padrão I.....	58
Figura 43 –	Sistema fraturado construído para validação com predominância de padrões X.....	59
Figura 44 –	Scanlines para imagem dos padrões X processados no TopoScan.....	60
Figura 45 –	Lei de potência set C, scanline 1.....	60
Figura 46 –	Lei de potência set C, scanline 2.....	60
Figura 47 –	Lei de potência set C, scanline 3.....	61
Figura 48 –	Lei de potência set C, scanline 4.....	61
Figura 49 –	Lei de potência set D, scanline 5.....	61
Figura 50 –	Lei de potência set D, scanline 6.....	62
Figura 51 –	Lei de potência set D, scanline 7.....	62
Figura 52 –	Lei de potência set D, scanline 8.....	62
Figura 53 –	Lei de potência média set C (a) e set D (b).....	63
Figura 54 –	Boxplot dos erros relativos das aberturas das fraturas.....	63
Figura 55 –	Padrões topológicos, predominância X.....	64
Figura 56 –	Diagrama ternário predominância X.....	65
Figura 57 –	Sistema fraturado simulado para validação com predominância de padrões Y.....	65
Figura 58 –	Scanlines para o padrão Y.....	66
Figura 59 –	Lei de potência set E, scanline 1.....	66
Figura 60 –	Lei de potência set E, scanline 2.....	67

Figura 61 –	Lei de potência set E, scanline 3.....	67
Figura 62 –	Lei de potência set E, scanline 4.....	67
Figura 63 –	Lei de potência set F, scanline 5.....	68
Figura 64 –	Lei de potência set F, scanline 6.....	68
Figura 65 –	Lei de potência set F, scanline 7.....	68
Figura 66 –	Lei de potência set F, scanline 8.....	69
Figura 67 –	Lei de potência média set E (a) e set F (b).....	69
Figura 68 –	Boxplot dos erros relativo das aberturas (a) e dos comprimentos (b) das fraturas.....	70
Figura 69 –	Padrões topológicos, predominância Y.....	71
Figura 70 –	Diagrama ternário com os padrões topológicos para o padrão Y.....	72
Figura 71 –	Sistema fraturado simulado para validação com predominância de padrões XYI.....	72
Figura 72 –	Scanlines para o padrão XYI.....	73
Figura 73 –	Lei de potência set G, scanline 1.....	73
Figura 74 –	Lei de potência set G, scanline 2.....	73
Figura 75 –	Lei de potência set G, scanline 3.....	74
Figura 76 –	Lei de potência set G, scanline 4.....	74
Figura 77 –	Lei de potência set H, scanline 1.....	74
Figura 78 –	Lei de potência set H, scanline 2.....	75
Figura 79 –	Lei de potência set H, scanline 3.....	75
Figura 80 –	Lei de potência set H, scanline 4.....	75
Figura 81 –	Lei de potência média set G (a) e set H (b).....	76
Figura 82 –	Boxplot dos erros relativo das aberturas (a) e do comprimento (b) das fraturas.....	76
Figura 83 –	Curva teoria (a) e curva com os dados reais (b) da abertura x comprimento das fraturas.....	77
Figura 84 –	Padrões topológicos, com número de padrões iguais.....	78
Figura 85 –	Diagrama ternário com número iguais de padrões X, Y e I.....	78
Figura 86 –	Nomenclatura da intensidade de faturamento.....	79
Figura 87 –	Condições de contorno horizontal.....	80
Figura 88 –	Condições de contorno vertical.....	81
Figura 89 –	Malha de elementos finitos triangulares com predominância do padrão topológico I.....	82
Figura 90 –	Evolução da pressão do líquido, caso I com condição de contorno horizontal.....	82
Figura 91 –	Evolução da pressão do líquido, caso I com condição de contorno vertical.....	82

Figura 92 –	Vetores de fluxo para $t = 5.796,55$ dias, condição de contorno vertical.	83
Figura 93 –	Vetores de fluxo para $t = 4.060,47$ dias, condição de contorno vertical.	83
Figura 94 –	Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão I, condição de contorno horizontal.....	85
Figura 95 –	Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão I, condição de contorno vertical.....	85
Figura 96 –	Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão I, condição de contorno horizontal.....	86
Figura 97 –	Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão I, condição de contorno vertical.....	86
Figura 98 –	Malha com predominância padrão topológico X.....	87
Figura 99 –	Evolução da pressão do líquido, caso X com condição de contorno horizontal.....	87
Figura 100 –	Evolução da pressão do líquido, caso X com condição de contorno vertical.....	87
Figura 101 –	Vetores de fluxo para $t = 1.282,69$ dias com condição de contorno horizontal.....	88
Figura 102 –	Vetores de fluxo para $t = 1.282,69$ dias com condição de contorno vertical.....	88
Figura 103 –	Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão X com condição de contorno horizontal.....	89
Figura 104 –	Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão X com condição de contorno vertical.....	90
Figura 105 –	Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão X com condição de contorno horizontal.....	90
Figura 106 –	Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão X com condição de contorno vertical.....	91
Figura 107 –	Malha com predominância do padrão topológico Y.....	91
Figura 108 –	Evolução da pressão do líquido, caso Y com condição de contorno horizontal.....	92
Figura 109 –	Evolução da pressão do líquido, caso Y com condição de contorno vertical.....	92
Figura 110 –	Vetores de fluxo para $t = 1.051,2$ dias para condição de contorno horizontal.....	93
Figura 111 –	Vetores de fluxo para $t = 935,48$ dias para condição de contorno vertical.....	93
Figura 112 –	Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão Y com condição de contorno horizontal.....	94
Figura 113 –	Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão Y com condição de contorno vertical.....	94
Figura 114 –	Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão Y com condição de contorno horizontal.....	95
Figura 115 –	Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão Y com condição de contorno vertical.....	95
Figura 116 –	Malha com padrão topológico XYI.....	96
Figura 117 –	Evolução da pressão do líquido, caso XYI.....	96
Figura 118 –	Evolução da pressão do líquido, caso XYI.....	96

Figura 119 –	Vetores de fluxo para $t=1.398,4$ dias.....	97
Figura 120 –	Vetores de fluxo para $t=1.410$ dias.....	97
Figura 121 –	Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão XYI com condição de contorno horizontal.....	98
Figura 122 –	Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão XYI com condição de contorno vertical.....	99
Figura 123 –	Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão XYI com condição de contorno horizontal.....	99
Figura 124 –	Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão XYI com condição de contorno vertical.....	100
Figura 125 –	Imagem do granito do Cabo de Santo Agostinho, PE.....	102
Figura 126 –	Scanline.....	103
Figura 127 –	Lei de potência scanline 1.....	103
Figura 128 –	Lei de potência scanline 2.....	103
Figura 129 –	Lei de potência scanline 3.....	104
Figura 130 –	Lei de potência scanline 4.....	104
Figura 131 –	Lei de potência média.....	105
Figura 132 –	Padrões topológicos encontrados no granito do Cabo de Santo Agostinho.....	105
Figura 133 –	Diagrama ternário da imagem no granito do Cabo de Santo Agostinho.....	106
Figura 134 –	Malha do sistema fraturado no granito do Cabo de Santo Agostinho.....	106
Figura 135 –	Evolução da pressão do líquido, granito do Cabo de Santo Agostinho com condição de contorno horizontal.....	107
Figura 136 –	Evolução da pressão do líquido, granito do Cabo de Santo Agostinho com condição de contorno vertical.....	107
Figura 137 –	Vetores de fluxo para $t=2.671,6$ dias para condição de contorno horizontal.....	108
Figura 138 –	Vetores de fluxo para $t = 2.359.1$ dias para condição de contorno vertical.....	108
Figura 139 –	Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, Cabo de Santo Agostinho para condição de contorno horizontal.....	109
Figura 140 –	Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, Cabo de Santo Agostinho para condição de contorno vertical.....	110
Figura 141 –	Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, Cabo de Santo Agostinho para condição de contorno horizontal.....	110
Figura 142 –	Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, Cabo de Santo Agostinho para condição de contorno vertical.....	111
Figura 143 –	Opções para iniciar o programa.....	118
Figura 144 –	Opções de realce de filtros sugeridas ao usuário.....	118
Figura 145 –	Opções de realce de contraste sugeridas ao usuário.....	119
Figura 146 –	Solicitação do ângulo das famílias.....	119

Figura 147 –	Informações sobre marcação dos pontos de referência.....	120
Figura 148 –	Objeto de referência com a marcação dos pontos.....	120
Figura 149 –	Solicitação do tamanho do objeto de referência.....	120
Figura 150 –	Informações sobre marcação das fraturas.....	121
Figura 151 –	Informações sobre marcação das aberturas.....	121
Figura 152 –	Fratura adicionada.....	121
Figura 153 –	Opção de utilização da técnica scanline linear.....	122
Figura 154 –	Número de scanlines.	122
Figura 155 –	Inserção das Scanlines.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Separação das famílias por colunas com os comprimentos das fraturas.....	70
Tabela 2 –	Separação das famílias por colunas com os comprimentos das fraturas.....	77
Tabela 3 –	Propriedades dos materiais.....	81
Tabela 4 –	Permeabilidades equivalentes para os diversos padrões topológicos estudados.....	100

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	RESERVATÓRIOS NATURALMENTE FRATURADOS	20
2.2	TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	22
2.2.1	Raspberry Pi.....	23
2.3	SCANLINE.....	24
2.4	TOPOLOGIA DAS FRATURAS	26
2.5	PROCESSAMENTO DOS DADOS	27
2.6	PROCESSAMENTO DE IMAGEM.....	28
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS DE FRATURAS.....	30
3.1.1	Aquisição de Dados.....	30
3.1.2	Tratamento/Processamento dos Dados.....	35
3.1.3	Caracterização (Informações de Saída).....	46
3.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO DE FLUIDO EM MEIO NATURALMENTE FRATURADO.....	46
3.2.1	Formulação matemática do problema de fluxo monofásico	47
3.2.2	Formulação de elementos finitos com descontinuidades fortes incorporadas	47
4	VALIDAÇÃO E RESULTADOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS DE FRATURAS	50
4.1	PADRÃO I.....	50
4.2	PADRÃO X	59
4.3	PADRÃO Y	65
4.4	PADRÃO XYI	72
5	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	79
5.1	PADRÃO I.....	81
5.2	PADRÃO X	86
5.3	PADRÃO Y	91
5.4	PADRÃO XYI	95
5.5	RESUMO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	100

6	APLICAÇÃO DO TOPOSCAN E SIMULAÇÃO NUMÉRICA A CENÁRIO DE AFLORAMENTO	102
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	112
7.1	TRABALHOS FUTUROS	113
	REFERÊNCIAS	114
	ANEXO – TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DO TOPOSCAN.....	118

1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos reservatórios são naturalmente fraturados e encontrados em todo o mundo, com recursos naturais essenciais, como água subterrânea e hidrocarbonetos (Lamarche et al, 2012).

A caracterização destes reservatórios e sua modelagem, em subsuperfície, tem sido desafiadora, especialmente quando estes se encontram em grandes profundidades, tal como os depósitos carbonáticos do Pré-Sal brasileiro.

Nestes casos, onde o interesse no conhecimento do sistema de fraturas é de grande importância, pode-se deparar com uma insuficiência de dados para esta caracterização, uma vez que a quantidade de testemunhos obtidos em subsuperfície é pequena em relação ao volume e distribuição espacial do reservatório. Além disso, muitas fraturas podem se apresentar em escalas subsísmicas, dificultando assim sua identificação e contemplação em um modelo de simulação.

Diante disso, é comum a adoção de afloramentos análogos que, segundo Miranda, et al. (2012) podem ser definidos como formações de rocha expostas em superfície e que possuem semelhança geológica com a rocha reservatório em subsuperfície. Com isso é possível empregar uma grande variedade de técnicas que permitam a melhor caracterização do sistema fraturado e assim construir modelos de simulação que permitam análises preditivas para cenários de produção. Os dados de campo adquiridos podem também ser empregados para os modelos de subsuperfície considerando uma integração multiescala (Santos et al, 2015).

Dentre exemplos de afloramentos análogos no Brasil, destacam-se os calcários laminados da Formação Crato na Bacia do Araripe que está localizada nas regiões sul do estado de Ceará, oeste do estado de Pernambuco a leste do Piauí, Figura 1 mostra o mapa da região do Araripe. Esta Formação é de grande importância por ser considerado análogo de reservatórios fraturados de bacias marginais brasileiras (Miranda, 2015; Rodrigues et al, 2016; Catto et al, 2016).

Figura 1 – Mapa da região da chapada do Araripe.



Fonte: Museu Nacional UFRJ (2013).

Diversos estudos relacionados com a caracterização e modelagem geológica, tratamento estatístico dos dados relativos às fraturas da Formação Crato (Neumann et al., 2008; Miranda, et al., 2012; Miranda et al., 2015; Santos, et al., 2015; Santos et al, 2016; Miranda et al, 2016; Santos, 2017; Miranda, et al., 2018) vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de subsidiar a construção de modelo de simulação de reservatórios baseado em dados de superfície com aplicação a cenários de subsuperfície. Estes trabalhos envolveram uma metodologia de aquisição de dados de fraturas empregando a técnica de *scanline* (Ortega et al., 2006) que envolve, de forma bastante simples, a contagem e medição de aberturas de fraturas e de espaçamento entre estas de forma direta na superfície do afloramento.

A caracterização de áreas análogas a reservatórios fraturados são recorrentes em diversas pesquisas, pois permite obter os dados de forma econômica, estes são coletados em superfície e estudados com o intuito de se obter uma maior compreensão dos fenômenos relacionados a características que refletem o comportamento em subsuperfície, reduzindo as incertezas na modelagem dos reservatórios (Beckera et al, 2018).

O presente trabalho está inserido na área de engenharia/geologia aplicada à caracterização e modelagem de reservatórios naturalmente fraturados baseados em dados de afloramentos análogos por envolver uma metodologia aplicada a etapa de tratamento dos dados coletados em campo, caracterização geológica e obtenção de informações utilizadas para simulações numéricas.

Vários estudos têm sido desenvolvidos abordando a coleta e o tratamento de dados em campo de sistemas fraturados. Algumas das técnicas empregadas para aquisição destes dados envolvem processos manuais que podem envolver um tempo elevado de coleta, imprecisões e

incertezas nas medidas. De acordo com este contexto mostra-se importante o desenvolvimento de uma metodologia que a partir dos dados de fraturas coletados em campo permita caracterizar o meio fraturado e definir informações que sejam empregadas na construção de modelos para simulação, tais como abertura, espaçamento, topologia, comprimento das fraturas, intensidade das fraturas, etc.

1.1 OBJETIVO GERAL

Visando a problemática existente da obtenção e tratamento dos dados coletados em campo em superfícies análogas de reservatórios, o presente trabalho têm como objetivo construir uma ferramenta de aquisição de imagens de superfícies de meios fraturados (afloramentos, testemunhos, bloco de mão, etc) que envolva a quantificação de dados de fraturas empregando a técnica de *scanline* linear e análise topológica. Para isso foi construído um protótipo que coleta imagens/vídeo utilizando Raspberry Pi para controlar a câmera GoPro e um programa em MATLAB, nomeado de TopoScan, desenvolvido neste trabalho para realização do processamento das imagens e obtenção dos dados das fraturas.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Como objetivos específicos destacam-se:

- Construir um protótipo a partir do Raspberry Pi para controle da câmera GoPro, utilizando o API GoPro, em linguagem de programação Python, para implementação da lógica que define o instante de início e termino da aquisição de imagens/vídeos. Calibrar a câmera, reduzindo alguns efeitos indesejados adquiridos na imagem, devido a câmera ou a forma da obtenção;
- Implementar um programa em MATLAB que permite marcar os comprimentos e as aberturas das fraturas, e consequentemente aplicar processamento de imagem e visão computacional para caracterização de sistemas fraturados utilizando a técnica *scanline* linear e análise topológica;
- Validar e calibrar o programa, a partir de rede de fraturas criada artificialmente com aberturas e comprimentos controlados, mostrando a viabilidade, os benefícios e as limitações da utilização desta nova ferramenta para a interpretação dos dados coletados em campo. Com a adoção dos cenários artificiais, também fazer o estudo da relação topológica das fraturas;

- Com as informações obtidas pelo TopoScan (coordenadas e aberturas) construir malhas de elementos finitos para os padrões topológicos X, Y, I e XYI, e empregar programa em elementos finitos CODE_BRIGHT (COupled DEformation, BRine, Gas and Heat Transport) (OLIVELLA, *et al.*, 1994) para simulação de fluxo monofásico de todos os padrões topológicos de forma a obter a permeabilidade equivalente, identificando a relação entre os padrões topológicos utilizados para validação;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESERVATÓRIOS NATURALMENTE FRATURADOS

As redes de fraturas são heterogêneas e complexas representando grande dificuldade em termos financeiros e de praticidade para obtenção de dados e construção de modelos (Day-Lewis et al., 2017). Porém as fraturas são importantes não só na área de reservatórios de petróleo, mas também em geoengenharia e fundações de barragens, pois tem ligação direta com a permeabilidade e porosidade pois são agentes facilitadores da passagem do fluido (Richeng et al, 2018).

As fraturas são arranjadas como famílias a depender de sua direção e ângulo de mergulho e apresentam características como idade (período de geração), morfologia, intensidade, densidade, entre outras. Dentre as propriedades geométricas destacam-se o comprimento, abertura e espaçamento (Sanderson & Nixon, 2015), bem como a topologia destas fraturas. Estes aspectos podem influenciar diretamente sobre o campo de permeabilidades global do maciço rochoso naturalmente fraturado.

O fraturamento pode influenciar no fluxo de fluido de uma rocha, impactando na porosidade e permeabilidade no meio fraturado ou apenas na permeabilidade, essa alteração do maciço rochoso, cria uma significativa anisotropia na permeabilidade. Discussões sobre os efeitos das fraturas sobre a permeabilidade e porosidade do meio têm sido apresentadas em trabalhos como Muñoz (2005), Bourbiaux et al (2005).

Existem trabalhos que buscam quantificar a permeabilidade do meio através de modelos matemáticos que envolvem informações da rede de fraturas. Por exemplo, Richeng et al (2018) apresentam uma formulação para a permeabilidade das redes de fraturas a partir de características fractais. Já em trabalhos como o de (Huang et al., 2017), utiliza-se um modelo de redes de fraturas discretas (DFN) para a obtenção da permeabilidade do meio fraturado a partir de métodos determinísticos e estatísticos. Os parâmetros utilizados na construção destes modelos podem ser adquiridos em campo a partir da amostragem em uma dimensão (*scanlines*, furos de sondagem), amostragem por duas dimensões (janela, circular) ou três dimensões (volume de rochas).

Desta forma inúmeras técnicas vêm sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas para coleta, caracterização e processamento dos dados de sistemas fraturados, permitindo que vários

trabalhos utilizem as informações das redes de fraturas incorporando-as nas simulações de reservatórios de petróleo.

Por exemplo, em seu trabalho, Falcão et al (2018) emprega uma análise de fluxo de fluido com geomecânica para determinação de campos de permeabilidade e porosidade equivalentes empregando geometrias e características de fraturas provenientes da secção de uma célula de simulação de reservatórios. O foco foi obter um upscaling das propriedades de porosidade e permeabilidade a partir de uma escala fina. Vale destacar que os autores adotaram diferentes técnicas para representar as fraturas no meio, em uma análise em elementos finitos.

Estudos de reservatórios fraturados têm sido desenvolvidos tanto em termos experimentais quanto voltado a simulação numérica como pode ser observado em trabalhos como os de Rosen & Shen (1989), Firoozabadi & Ishimoto (1991), Putra *et al.* (1999), Babadagli (2001), Bourbiaux *et al.* (2005), Geiger *et al.* (2007), Tatomir (2007) e Oian *et al.* (2007).

Em seu trabalho, Tatomir (2007) discutem sobre os três principais modelos para simulação numérica de meios fraturados sendo estes os modelos discretos, os multi-contínuos e os híbridos.

Nos modelos discretos as fraturas são consideradas como estruturas discretas. Com esse modelo, existe a possibilidade de simular o fluxo de fluidos e processos de transporte de forma muito semelhante à natureza (Reichenberger *et al.* 2004). Desenvolvimentos empregando modelo de fratura discreta também são referenciados por Tatomir (2007).

No entanto, a aplicabilidade de modelos discretos continua sendo limitada a problemas de campo que requerem a determinação precisa das características das redes de fraturas em seu completo detalhe. Assim, em muitos problemas práticos de campo vale a pena usar modelos contínuos quando as condições necessárias, para adotar esta abordagem, sejam atendidas. A solução para isso é usar os dados geoestatísticos gerados juntamente com os dados determinísticos para a modelagem numérica.

Uma alternativa para o tratamento das fraturas no modelo de elementos finitos é o emprego de técnicas de descontinuidades fortes embebidas na malha. Esta formulação, apresentada por Beserra (2015), possibilita a introdução de uma descontinuidade de alta permeabilidade em uma malha de elementos finitos regular tornando desnecessária a

discretização excessiva da malha. Nesta abordagem, a fratura embebida na malha regular apresenta-se como uma região preferencial de fluxo, ou seja, configura uma descontinuidade no meio poroso com permeabilidade definida na forma de um contínuo equivalente local.

2.2 TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

As técnicas utilizadas para coleta de dados em campo vêm evoluindo de forma a tornar o processo mais simples e rápido. Têm se lançado mão de imagens de satélite e fotografias aéreas coletadas a partir de veículos não tripuláveis (UAVs) (Bisdorn et al, 2017; Masoud & Koike, 2011; Harwin & Lucieer, 2012) e tecnologias LIDAR (Wilson, et al., 2011; Beckera, et al, 2018). Porém mesmo essas técnicas ainda necessitam de pessoas para medições manuais que verifiquem se algumas descontinuidades não são interpretadas de forma inadequada, devido a problemas relacionados a resolução dos equipamentos e a forma de coleta dos dados.

Em seu trabalho Bisdorn et al. (2017) utiliza veículo aéreo não tripulado (UAV) para obter imagens do afloramento da bacia Potiguar no Brasil, onde as imagens 2D servem como modelo de afloramento para base de modelos no estudo de tensões e determinação da permeabilidade com aplicação à modelagem de reservatórios. Porém, no trabalho citado, as imagens têm densidade de 0,6 – 2,9 cm/pixel, para voos com altitude de 20 a 100m. Esta resolução depende da altura do voo do (UAV) como também da qualidade imagem obtida pela câmera.

O trabalho de Vasuki et al. (2014) também utilizou UAVs para obtenção de imagens de superfícies de rochas em alta resolução que permite o mapeamento de falhas geológicas usando dados fotométricos adquiridos a partir das imagens. A altura do voo do UAV foi de 20-40 m da superfície, resultando em imagens com resolução de 1cm/pixel.

As formas citadas para coleta de dados em campo têm melhorado significativamente permitindo que grandes extensões de área sejam analisadas em intervalo pequeno de tempo, mesmo que em algumas situações esses dados não sejam precisos para aplicação de algumas técnicas de caracterização geológica ou introduzam vários vieses. Por exemplo a técnica descrita no trabalho Ortega et al. (2006), utiliza uma régua comparadora 0,05 e 5mm para obtenção das aberturas das fraturas, impossibilitando que, a partir da forma habitual de coleta, se identifique nas imagens de UAVs as fraturas com estas dimensões de aberturas, pois na literatura se obtêm 0,6 - 2,9 cm/pixel (Bisdorn et al., 2017; Vasuki et al., 2014).

2.2.1 Raspberry Pi

A tecnologia Raspberry Pi vem permitindo a construção de diversos protótipos em diversas áreas com baixo custo. Na bibliografia não há trabalhos utilizando o Raspberry Pi na área de coleta de dados de sistemas fraturados, porém muitos trabalhos estão indiretamente ligado a este tema como, por exemplo: construção de veículos aéreos e terrestres (Paques, 2016; Bertorelli, 2015), *data logger* (Carre & Williamson, 2018; Pasquali et al, 2017), aquisição de vídeos e imagens (Anandhalli & Baligar, 2017; Williams et al, 2014).

O Raspberry Pi tem sido utilizado também para processamento de imagens em tempo real (Silva et al, 2016; Anandhalli & Baligar, 2017; Sajjad, et al., 2017), acrescentando a possibilidade de adicionar técnicas para construção de mosaicos, redução de ruídos, detecção de linhas e bordas, que tornem os dados obtidos pré-processados, permitindo que a caracterização possa ser feita no campo, no momento da coleta.

O Raspberry Pi conta com diversos trabalhos nas mais diversas áreas: Kuziek et al, (2017) utilizou na área de saúde para apresentar estímulos para experiências com EEG (Eletroencefalograma); Pasqualia et al, (2017) utilizou o Raspberry Pi como *data logger* e monitoramento do comportamento de invertebrados nos árticos em condições extremas naturais; Shah & Haradi, (2016) desenvolveram um sistema IoT (Internet das coisas) utilizando biometria com o Raspberry Pi. Diversos outras aplicações utilizando o Raspberry Pi têm sido desenvolvidas recentemente, mostrando que é possível inserir esta tecnologia em inúmeras áreas, necessitando apenas de criatividade.

Segundo raspberry.org o Raspberry Pi consiste de um mini-computador com sistema operacional Linux do tamanho de uma cartão de crédito de baixo custo que pode ser conectado em um monitor ou TV a partir de uma conexão HDMI, utilizado com teclado e mouse a partir das conexões USB. Tem tornado possível que pessoas de qualquer idade explorem e aprendam a programar em linguagem scratch ou Python, como também editem seus textos, reproduzam vídeos e jogos.

O Raspberry Pi é um computador modesto em sua configuração, onde a versão 2 tem 1GB de memória RAM e processador ARM quad-core de 900Mhz, para alimentação necessita de uma fonte de 5V e 2A. O sistema operacional é armazenado em um cartão MicroSD, tem portas Ethernet, USB, áudio e HDMI. Além das conexões presentes em computadores convencionais, conta com conectores para câmera e DSI display, além de conector GPIO

(General Purpose Input/Output) ou entrada e saída de uso geral. A conexão GPIO é um grande diferencial para a prototipação de equipamentos, pois pode ser entrada de um sensor, um sinal de outro computador ou dispositivo, como também a saída pode controlar desde de um LED ou enviar dados para outro dispositivo ou sensor. A Figura 2 mostra o Raspberry Pi modelo B, permitindo identificar as conexões e portas disponíveis.

Figura 2 – RaspberryPi 2 Model B.



Fonte: raspberrypi.org.

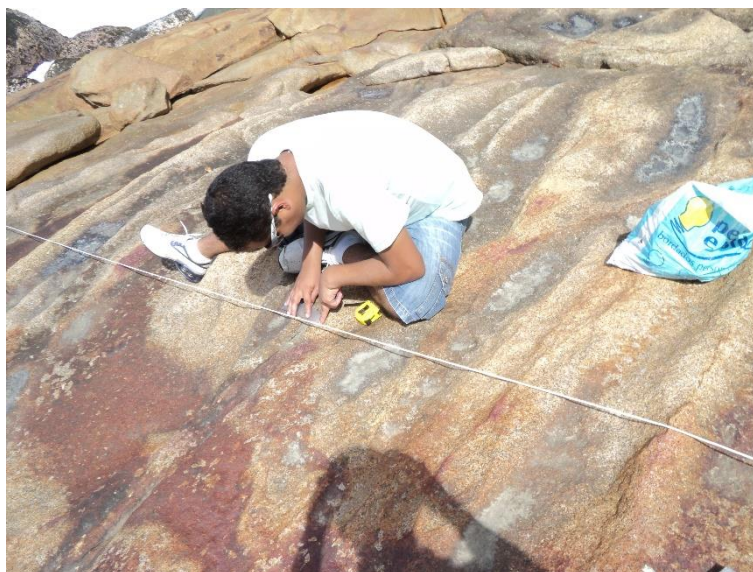
O Raspberry Pi, por ter um sistema baseado em Linux, permite criar scripts para atividades específicas em diversas linguagens, sendo Python a mais comum é Python por se tratar de uma linguagem simples, prática e Open Source, e que conta com inúmeros pacotes que podem ser importados e utilizados nas mais diversas áreas. O Python conta com diversos módulos para o Raspberry Pi como o RPi.GPIO que é responsável pelo controle dos canais do GPIO. Existem também o módulo picamera que controla a câmera do Raspberry Pi, possibilitando obter vídeos e imagens, entre tantos outros que dependem da aplicação desejada. Com esta tecnologia de baixo custo, há a possibilidade de construção de protótipos que possam facilitar a obtenção de dados em campo de sistemas fraturas de forma precisa, rápida, baixo custo e customizada para cada situação.

2.3 SCANLINE

Uma técnica que pode ser utilizada na caracterização geológica de meios fraturados é a *scanline* linear (1D), desenvolvida por Ortega et al. (2006) que coleta características das fraturas ao longo de uma linha de aquisição, sendo estas medidas de abertura, espaçamento e quantidade de fraturas. Utiliza-se uma régua graduada 0,05 e 5mm como comparador para

obtenção das aberturas das fraturas medidas. Em situações onde as aberturas das fraturas têm dimensões reduzidas, não visível a olho nu, uma lupa é utilizada como auxiliar a observação. O método de *scanline* linear permite obter parâmetros que, tratados estatisticamente, podem ser utilizados para gerar redes de fraturas discretas para inserção em modelos de reservatórios (Priest, 2004; Santos, 2017). A Figura 3 mostra a forma como os dados das aberturas são coletados utilizando a técnica *scanline* linear.

Figura 3 – Aplicação da técnica *scanline*.



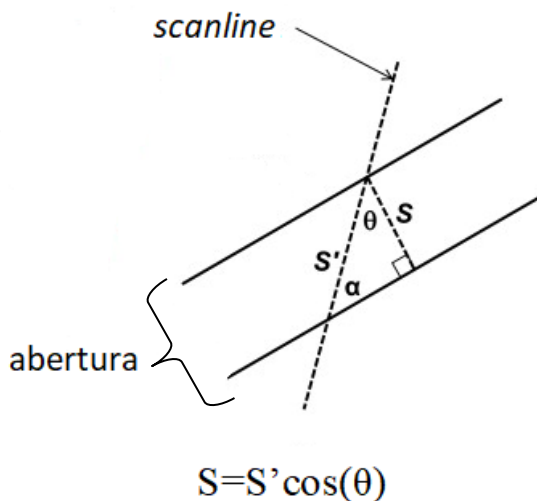
Fonte: Autor.

A técnica *scanline* permite obter a densidade de fraturas como também a frequência acumulada das aberturas. A frequência acumulada das aberturas é melhor representada pela lei de potência em escala log-log (Ortega et al., 2006; Walsh et al., 1991). Um maior número de fraturas que a *scanline* intercepta permite que os coeficientes obtidos reproduzam melhor o comportamento da lei de potência.

A *scanline* linear introduz alguns problemas de vieses: a) viés de orientação, a técnica proposta no trabalho de Terzaghi (1965), que inicialmente foi utilizada para corrigir o espaçamento apenas entre as fraturas, na técnica *scanline* proposta por Ortega et al. (2006) essa correção também permitiu corrigir as aberturas das fraturas, Figura 4. Esse viés pode ser minimizado utilizando a linha do método o mais perpendicular possível às famílias de fraturas; b) de tamanho, devido ao problema de não se conseguir captar algumas fraturas com tamanhos pequenos com a *scanline*, ficando desta forma subrepresentadas; c) de truncamento devido aos equipamentos utilizados ou da visão humana não permitirem que algumas fraturas

sejam detectáveis, por exemplo Bonnet (2001); d) viés de censura, que está relacionado com a região de obtenção com vegetação ou camadas de rochas sobrepostas, podendo ser reduzido mas não resolvido. Estes problemas foram tratados no trabalho de Santos et al (2015).

Figura 4 – Correção de Terzaghi para abertura.



Fonte: Sanderson & Nixon, (2015)

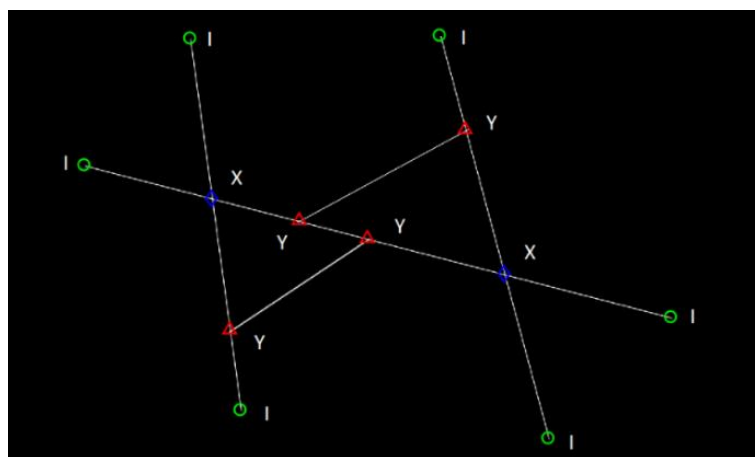
Devido aos diversos vieses atrelados a técnica *scanline* linear, outras informações da superfície devem ser obtidas, como por exemplo a conectividade das fraturas e suas terminações (Hardebol & Bertotti, 2012).

2.4 TOPOLOGIA DAS FRATURAS

As fraturas são frequentemente distribuídas desordenadamente no meio por causa de suas origens geotectônicas e podem ser desconectadas ou conectadas entre si, formando uma rede global ou clusters de redes separadas. Desta forma a conectividade das fraturas tem importância nas propriedades da matriz da rocha que pode ser estudada a partir da topologia, com os padrões de nós isolados (I), de ramificação (Y ou T) e de cruzamento (X) fornecendo uma base para descrever a topologia que pode ser utilizada para identificar erros e vies de medidas e minimizá-los. A proporção normalizada de nós I, Y e X permite caracterizar topologicamente uma rede de fraturas, a partir de um gráfico ternário com a porcentagem de cada nó, como também obter outras informações: número de linhas, número de ramos, número médio de conexões, número de conexões por ramificação, conectividade e probabilidade de nó conectado ou isolado (Sanderson & Nixon, 2015).

A Figura 5 representa os padrões topológicos descritos anteriormente. Esta imagem foi gerada a partir do programa TopoScan, construído neste trabalho para processamento dos dados coletados em campo. A simbologia utilizada para os padrões foi baseada no trabalho de Sanderson & Nixon (2015).

Figura 5 – Padrões topológicos, nós (I) círculos verdes, nós (Y) triângulos vermelhos e nós (X) diamantes azuis.



Fonte: Autor.

2.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Após a coleta dos dados estes são analisados manualmente ou com diferentes softwares, sendo alguns destes softwares encontrados na bibliografia como:

- FraNEP (Fracture Network Evaluation Program) programa construído em Visual Basic for Applications no Microsoft Excel TM utilizado para obter características geométricas de uma única fratura como também da rede de fraturas, a entrada do programa consiste das coordenadas das fraturas, informações da área de estudo e dos conjuntos de fraturas (Zeeb et al., 2013);

- FracPAQ é um programa construído em MATLAB projetado para quantificar padrões de fraturas em duas dimensões (2D), que obtêm as estimativas para os atributos de fraturas individuais (comprimentos e orientações) e atributos de todo o conjunto (permeabilidade e conectividade). Nele as entradas podem ser a partir de imagens ou arquivos de texto padrão ASCII (Healy et al., 2016);

- Digifract é o software implementado em Python e utiliza a ferramenta GIS (Sistema de informação geográfica) para obtenção dos dados em campo, a partir de imagens de

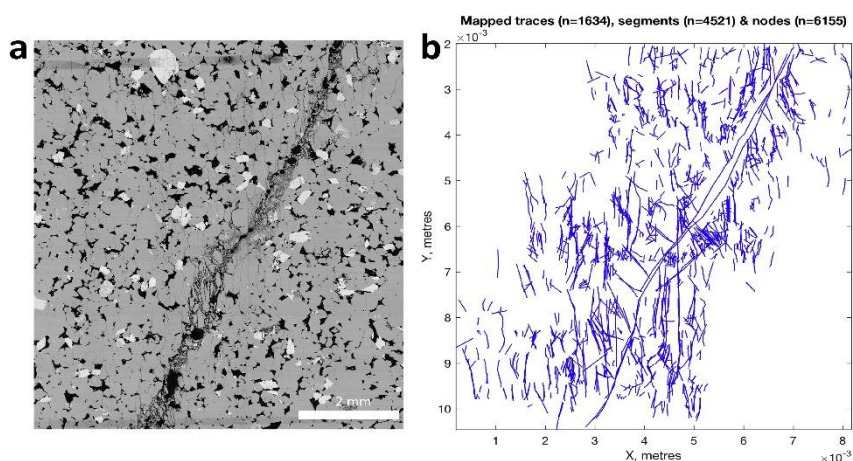
afloramentos as geometrias são carregadas no GIS e atribuído informações como preenchimento e orientação das fraturas (Hardebol & Bertotti, 2012).

Para mapeamento de uma região utilizando formas convencionais há problemas de tempo e esforço quando feito manualmente e problemas relacionados aos dados coletados devido a tecnologia empregada não permitir que os dados tenham uma grande precisão. A forma de coleta mais comum é a partir de imagens de satélite ou UAVs de voos altos.

Para o processamento e caracterização geológica as fraturas inseridas nas imagens, são em grande parte vetorizadas por outros softwares (por exemplo Adobe Illustrator, Engauge Digitizer) como os utilizados no trabalho de Healy et al. (2016), e obtidas as coordenadas para serem utilizadas nos programas (por exemplo FracPac e FraNEP).

Algumas técnicas de detecção de linhas e de bordas para obtenção das fraturas diretamente de imagens já foram utilizadas (Healy et al., 2016; Vasuki et al., 2014), porém ruídos nas imagens e problemas nos algoritmos de identificação de linhas e bordas (Abdou & W., 1979; Bowyer et al, 2001), provocam a identificação de algumas fraturas que não existem, como também descontinuidades de uma fratura que é continua. No trabalho de Healy et al. (2016) é informado que fraturas obtidas a partir de imagens são menos confiáveis que as vetorizadas e obtida as coordenadas, a Figura 6 mostra a situação da identificação de diversas fraturas com ruídos pelo FracPAQ.

Figura 6 – Resultado da identificação das fraturas do FracPac.



Fonte: Healy et al. (2016)

2.6 PROCESSAMENTO DE IMAGEM

Processamento de imagem é um recurso utilizado para obter uma outra imagem ou valores numéricos a partir de uma imagem inicial de entrada, essa é a etapa que permite que as informações que se deseja obter fiquem mais realçadas para ser possível obter na etapa da visão computacional as informações (Marengoni & Stringhini, 2009).

O processamento de imagem pode ser dividido em: transformação de brilho (histograma, binarização, etc); transformações geométricas (distorções); métodos de filtragem espacial ou de frequência (suavização, filtros, etc). A técnica utilizada para realçar as informações que se deseja obter depende de cada aplicação. Por exemplo uma técnica utilizada para realçar imagens com muito ruído não é a mesma para realçar imagens escuras. Não existe alguma transformação “universal” para resolver todos os problemas de realce de imagens. Logo é necessário utiliza-los em sequência ou repetidas vezes para obtenção do resultado satisfatório.

Grande parte das técnicas de processamento de imagem, conta com a utilização de operadores sobre pixels, matrizes ou kernels e são aplicados a pixels e seus vizinhos de uma imagem para obter os efeitos desejados (Gonzalez & Woods, 2010). A equação (2.1) mostra de forma geral a filtragem no domínio espacial.

$$h(x, y) = T[g(x, y)] \quad (2.1)$$

onde $g(x, y)$ representa os pixels originais, T o kernel ou matriz que opera sobre os pixels da imagem original e $h(x, y)$ é o resultado desta operação.

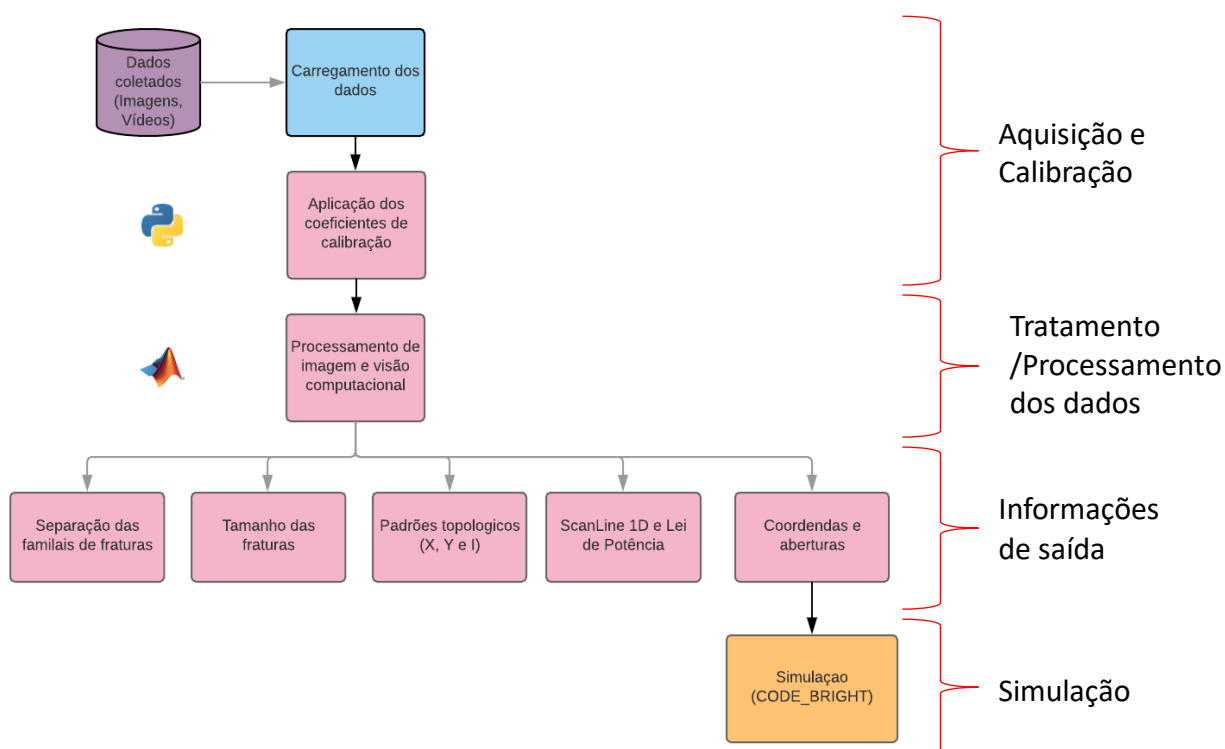
A visão computacional é responsável por receber valores numéricos ou imagens e sair com as informações que seriam possíveis de serem obtidas com a visão humana, ou seja, uma forma da computação replicar um dos sentidos mais complexos existentes nos seres humanos a partir de hardwares e softwares. De forma geral é utilizado a segmentação para deixar evidente características da imagem que serão reconhecidas e rastreadas (Marengoni & Stringhini, 2009)

Os diversos algoritmos de segmentação baseiam-se na propriedade de descontinuidade e similaridade. A descontinuidade visa encontrar a partir de mudanças bruscas de intensidade, por exemplo as bordas. A similaridade utiliza-se da abordagem de divisão da imagem em regiões semelhantes com critérios predefinidos (Gonzalez & Woods, 2010).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo descreve-se a metodologia do trabalho dividindo-a nas atividades de desenvolvimento do sistema e algoritmo de aquisição e tratamento dos dados de fraturas que envolve a obtenção dos dados, construção do programa e caracterização bem como o detalhamento da formulação matemática empregada pelo programa em elementos finitos para a simulação de fluxo monofásico em meio fraturados. Essa descrição permite acompanhar o fluxo natural de trabalho, desde da obtenção dos dados até a simulação a partir das informações obtidas do meio. O fluxograma da Figura 7 mostra de forma simplificada a etapas da metodologia empregada neste trabalho.

Figura 7 – Fluxograma dos processos utilizados na metodologia do trabalho.



Fonte: Autor.

3.1 METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS DE FRATURAS

3.1.1 Aquisição de Dados

Para a aquisição de dados de imagem, optou-se pela câmera GoPro HERO+, com resolução das imagens de 8MP, vídeos em Full HD e ainda conta com uma rede via Wi-Fi

própria. Essa conexão permite a comunicação com outros dispositivos que tenham WI-Fi a partir de um software da GoPro, como também é possível controlar a câmera a partir de um API GoPro escrito na linguagem Python (KonradIT, s.d.). O software próprio da GoPro não permite o controle de forma programada diferentemente do API GoPro escrito na linguagem Python.

Alguns testes foram feitos visando a obtenção de imagens/vídeos de forma a utilizar o RaspberryPi como controlador da câmera GoPro utilizando o API GoPro escrito na linguagem Python. Foi estabelecida uma conexão a partir da rede Wi-Fi gerada pela própria GoPro e um adaptador Wi-Fi USB conectado ao RaspberryPi. O esquema simplificado da Figura 8 mostra a forma de comunicação entre os equipamentos.

Figura 8 – Esquema da comunicação entre os equipamentos.



Fonte: Autor.

A GoPro tem um ótimo foco assim pode-se obter imagens nítidas, porém tem lente grande angular de 170 graus conhecido como efeito “olho de peixe” que torna as imagens curvadas com distorção positiva radial. Este efeito gera um aumento ou diminuição dos objetos inseridos nas imagens. A Figura 9 mostra a imagem do piso do laboratório obtida a partir da GoPro, mostrando a curvatura da imagem.

Figura 9 – Imagem do piso do laboratório obtida pela câmera GoPro.



Fonte: Autor.

Mesmo com o ponto negativo da curvatura das imagens, a GoPro foi utilizada porque permite ser controlada a distância pela Wi-Fi, conta com um API escrito em Python que possibilita a construção de qualquer lógica de controle, grande autonomia da bateria e distancia focal pequena, que permite obter imagens bem próximas da superfície sem causar o efeito borrão.

Foi utilizado a câmera fabricada oficial do Raspberry Pi, porém, esta tem foco de um metro ao infinito, impossibilitando de adquirir imagens com menos de um metro da superfície e sua resolução é baixa, 5MP. Devido ao grande número de benefícios foi escolhida a GoPro, o problema da curvatura da câmera foi corrigida com a calibração.

A própria empresa GoPro disponibiliza um software chamado GoPro Studio disponível para os sistemas operacionais Windows e Mac OS. Esse software permite edições de vídeos e imagens como: modificar o zoom, balanço de branco, contraste, saturação, esquema de cores, e até mesmo no ângulo de abertura da filmagem. Esse programa foi utilizado para reduzir o efeito “olho de peixe”, porém os resultados não foram satisfatórios.

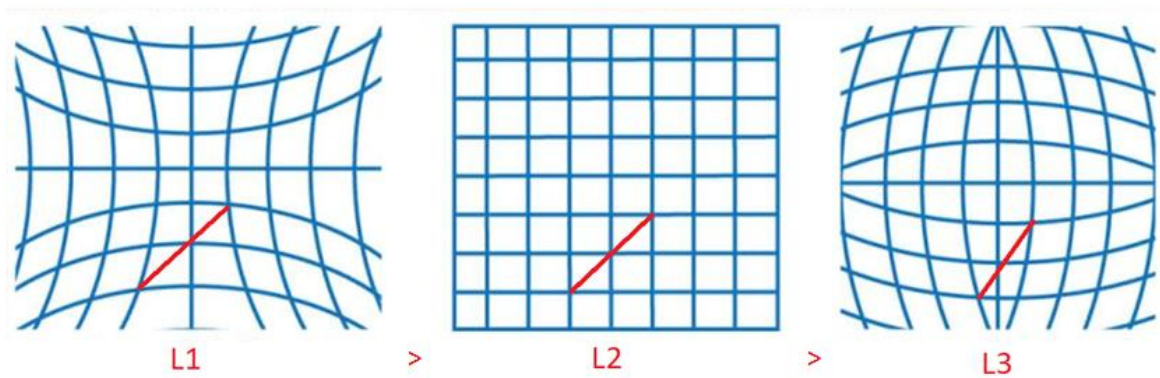
Visando resolver o problema da curvatura das imagens da câmera GoPro, foi utilizada a calibração de câmera disponível na linguagem de programação Python e pacote OpenCV, que possibilita obter os coeficientes de distorção e parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera, permitindo corrigir a curvatura das imagens. De acordo com a documentação do OpenCV há dois tipos de distorção: a radial e tangencial (OpenCV, s.d.).

A biblioteca OpenCV (Open Source Computer Vision Library) é uma biblioteca de programação multiplataforma que foi inicialmente desenvolvida pela Intel, com o foco em

desenvolvimento de aplicativos na área de visão computacional e aplicações em tempo real. Atualmente é disponibilizado em diversas linguagens: C++, Python e Java para sistemas operacionais Windows, Linux, Mac OS, iOS e Android (OpenCV, s.d.). A biblioteca OpenCV tem inúmeros algoritmos implementados de visão computacional e aprendizado de máquina e a cada dia tem aumentando esse número devido à grande quantidade de colaboradores.

A distorção radial é responsável por transformar as linhas retas em curvas, Figura 10. Para resolver a distorção radial utilizam-se das equações (3.1) e (3.2).

Figura 10 – Distorção radial nas imagens.



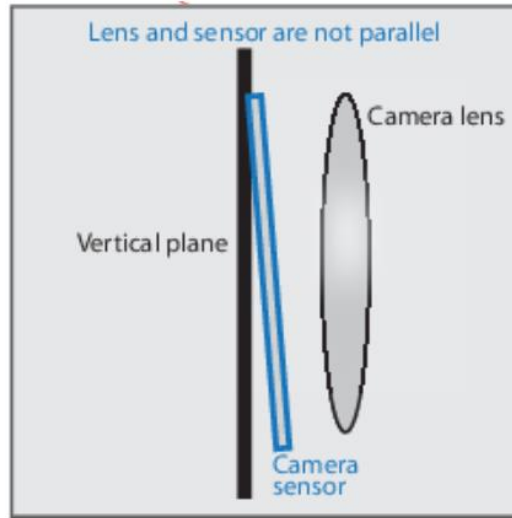
Fonte: MathWorks.

$$x_{corrected} = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (3.1)$$

$$y_{corrected} = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (3.2)$$

Outro tipo de distorção é a tangencial, que ocorre devido ao não alinhamento perfeito da lente da câmera com o plano de imagem, Figura 11, cuja resolução se dá através das equações (3.3) a (3.5).

Figura 11 – Distorção tangencial.



Fonte: MathWorks.

$$x_{corrected} = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \quad (3.3)$$

$$y_{corrected} = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \quad (3.4)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (3.5)$$

Desta forma é necessário obter os cinco parâmetros de distorção radial e tangencial, equação (3.6), além dos parâmetros intrínsecos da câmera equação (3.7) para calibração da câmera e correção das imagens.

$$Coefficients = (k_1, k_2, k_3, p_1, p_2) \quad (3.6)$$

onde k_1, k_2, k_3 são coeficientes radiais de distorção da lente p_1, p_2 são coeficientes da distorção tangencial da lente

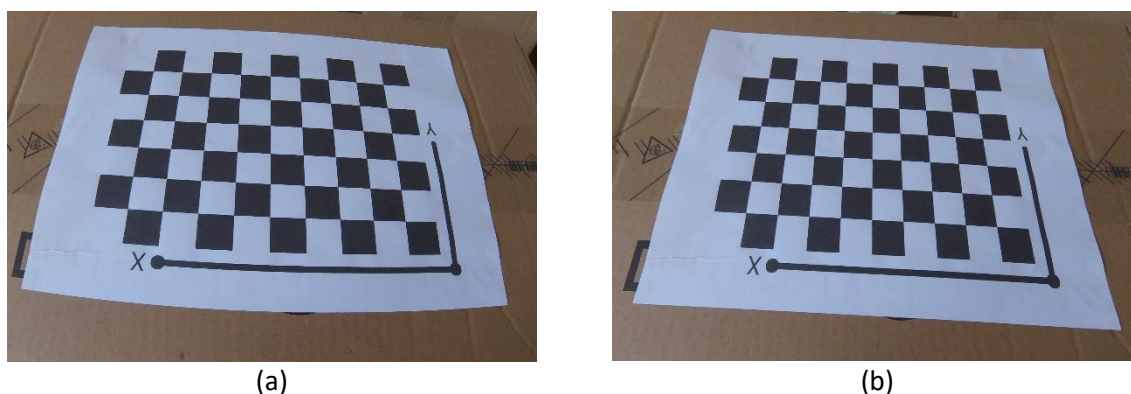
Os parâmetros intrínsecos da câmera são distâncias focais nos eixos x e y (f_x, f_y) como também os centros ópticos em x e y (c_x, c_y). Estes parâmetros são também chamados de matriz da câmera.

$$camera = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Para calibração da GoPro foram utilizadas 17 imagens do padrão de tabuleiro de xadrez em diferentes ângulos de forma a obter pontos 3D do mundo real e os correspondentes em 2D,

onde os pontos 2D são obtidos facilmente nas imagens a partir das arestas. A partir das diversas imagens do tabuleiro de xadrez, os parâmetros intrínsecos e extrínsecos são obtidos, possibilitando a correção das imagens. O código em Python utilizado é encontrado nos tutoriais OpenCV, camera *calibration* (OpenCV, s.d.), como também as equações descritas acima. Uma entre as 17 fotos utilizadas para calibração é mostrada na Figura 12 (a) com a sua corresponde após aplicação da calibração 3.6 (b).

Figura 12 – Lado esquerdo (a), imagem antes da calibração, lado direito (b), após a calibração.



Fonte: Autor.

Após a calibração é perceptível que a curvatura da imagem foi reduzida, permitindo obter o tamanho dos objetos inseridos na imagem com real tamanho. A abordagem da utilização Raspberry Pi controlando a GoPro torna possível a implementação em Python de uma lógica mais complexa que não permite ser construída apenas com uma câmera convencional.

Por fim, vale destacar que os drones comerciais apenas permitem controlar o voo e a câmera, impossibilitando que algum tratamento venha a ser implementado nas imagens/vídeos coletados. Diante dos aspectos favoráveis da utilização do Raspberry Pi, a etapa de aquisição de dados utilizou esse equipamento para permitir que novos horizontes para as mais diversas aplicações sejam pensadas e construídas.

3.1.2 Tratamento/Processamento dos Dados

Após a coleta dos dados, imagens de campo, surge a necessidade da adoção de outras ferramentas para processamento e interpretação dos dados adquiridos, obtendo informações acerca da região estudada. É importante destacar que as imagens coletadas precisam ter um

objeto de referência com dimensão real conhecida.

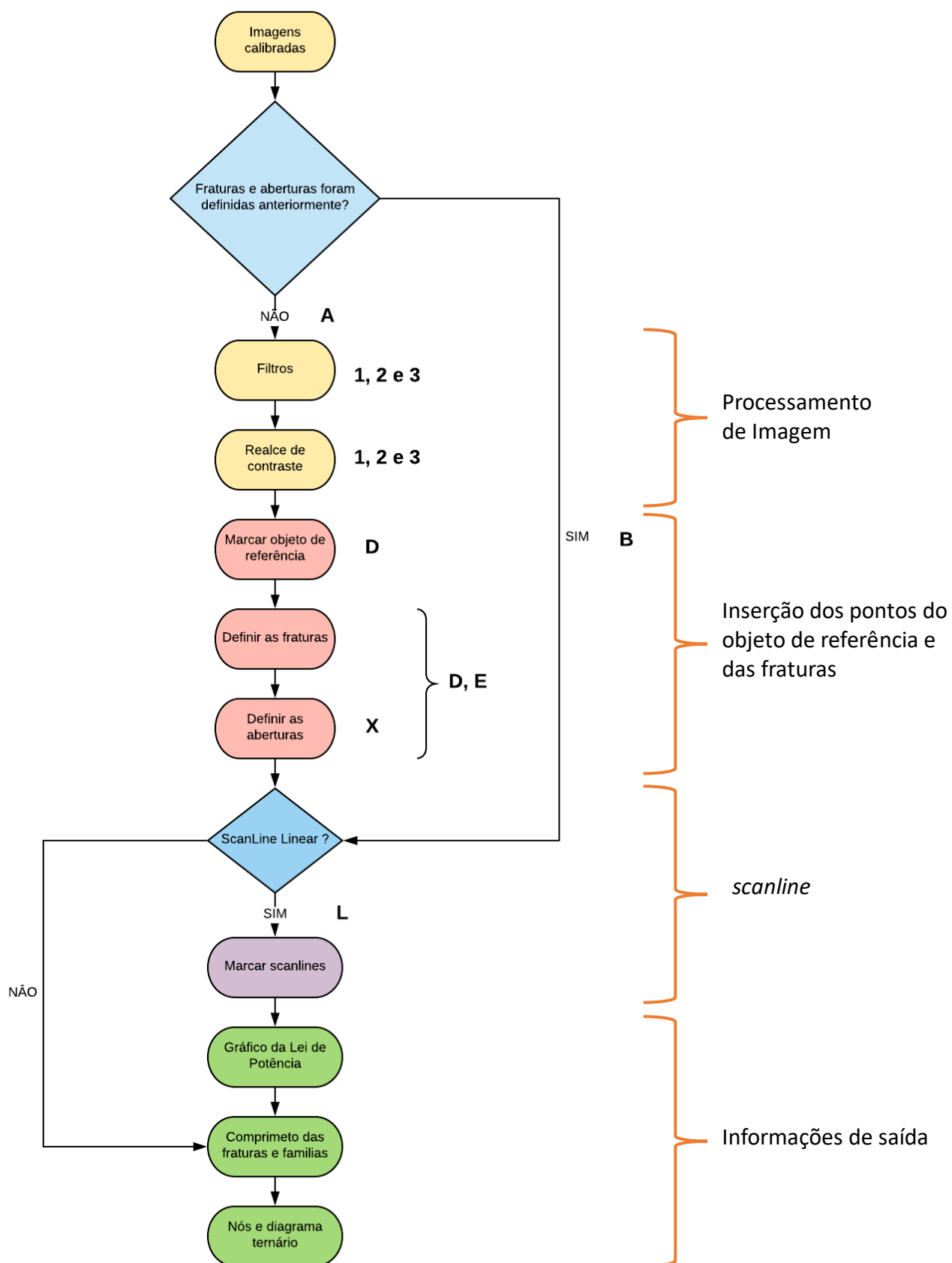
Qualquer câmera utilizada para coleta de imagens deve ser calibrada mesmo não tendo lente “olho de peixe” como o caso da GoPro, pois a curvatura e não paralelismo da camera com o plano, causa nas imagens erros no momento de identificação do tamanho do objeto de referência como também das aberturas e comprimentos das fraturas. O código em Python utilizado na seção 3.1.1 possibilita a calibração de qualquer câmera.

A calibração da câmera precisa ser feita apenas uma vez, seguindo a metodologia da aquisição de diferentes ângulos do tabuleiro de xadrez para identificação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera. Os coeficientes de correção da câmera são aplicados a cada nova imagem, reduzindo a curvatura e possibilitando que as dimensões dos objetos inseridos nas imagens possam ser encontrados corretamente, pelo TopoScan.

O MATLAB disponibiliza um API para comunicação bidirecional entre ele e Python, permitindo aproveitar o melhor de cada linguagem em apenas um programa. O código em MATLAB chama o *script* em Python para carregamento dos coeficientes da calibração da câmera e aplica-o, reduzindo a curvatura e salvando uma nova imagem para continuidade do programa em MATLAB.

A Figura 13 mostra o fluxograma do programa TopoScan, permitindo identificar de forma detalhada o fluxo das etapas. Para tornar mais amigável a utilização do software, foi construída uma interface gráfica (GUI Graphical User Interface), que mostra e solicita informações ao usuário acerca das etapas de escolha: da imagem para processamento, ângulo entre as famílias, inserção das fraturas e aberturas, número e marcação das *scanlines*, etc. O tutorial da utilização do TopoScan está em Anexo, onde há detalhes que descrevem detalhadamente as etapas que o usuário irá se deparar na utilização do programa.

Figura 13 – Fluxograma do programa construído no MATLAB.

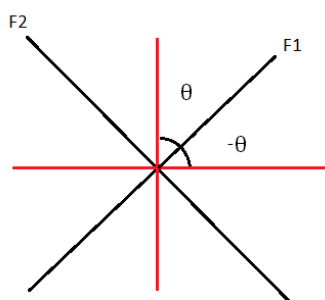


Fonte: Autor.

A parte de processamento de imagem conta com alguns filtros do domínio espacial: mediana, gaussiano e de desvio padrão e técnicas de contraste: aumento de contraste, histograma e histograma adaptativo. Utilizados para redução dos ruídos e realce das imagens respectivamente. Essa abordagem foi implementada no programa para permitir ao usuário escolher qual filtro e realce de contraste permite obter uma imagem com melhor visualização das fraturas.

Para identificação das famílias é necessário definir a variação de ângulo a qual pertencem as fraturas da mesma família. Observa-se na Figura 14 que esse ângulo é considerado no sentido horário e anti-horário. Para uma situação da Figura 15, que há apenas duas famílias, e o ângulo é de $\theta=45^\circ$.

Figura 14 – Ângulo para identificação das famílias de fraturas.



Fonte: Autor.

A partir da situação acima, verifica-se que a equação (3.8) descreve de forma simples e direta a relação entre as famílias de fraturas e a variação de ângulo a que elas pertencem. Essa abordagem foi implementada no programa, permitindo identificar as famílias de fraturas, separando-as e obtendo seus comprimentos, para fraturas com tamanho maior que a imagem, esta é desconsiderada na classificação das famílias, pois não é possível obter seus comprimentos.

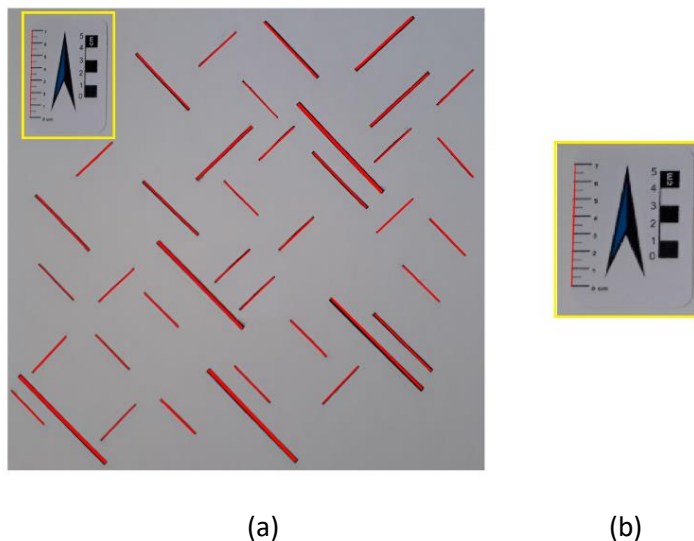
$$Nf = \frac{90^\circ}{\theta} \quad (3.8)$$

onde Nf é o número de famílias

A Figura 15 (a) mostra uma imagem após a marcação dos comprimentos e aberturas das fraturas. As linhas vermelhas representam as fraturas inseridas pelo usuário, permitindo identificar quais fraturas já foram adicionadas.

A régua 15 (b) mostra o objeto de referência utilizado para obter o fator real de cm/pixel da imagem, esse fator tem a função de corrigir as dimensões das fraturas, aberturas e comprimentos, para a escala real. A equação (3.9) mostra os parâmetros utilizados para obter o fator real.

Figura 15 – Marcação das fraturas e aberturas.



$$Fator_Real = \frac{tamanho_objeto(cm)}{distancia_imagem(pixel)} \quad (3.9)$$

O programa implementado utiliza a abordagem de que a cada marcação dos pontos dos comprimentos e das aberturas que representam as fraturas é traçada uma linha na imagem original a que o usuário está visualizando e três imagens são salvas em *background*. A primeira imagem com largura de 1 pixel é utilizada para identificar os cruzamentos das fraturas, a segunda com largura de 3 pixels para identificar os términos das fraturas e a terceira com largura de N pixels de acordo com a abertura das fraturas definida pelo usuário.

Os valores de 1 pixel e 3 pixels nas imagens, foram escolhidos devido a melhor configuração encontrada para identificação dos pontos de cruzamento e fim das fraturas condizentes com a realidade. Um exemplo das imagens com 1 pixel e 3 pixels utilizadas para identificação de cruzamento e término das fraturas é mostrado nas Figuras 16 e 17, foram aplicada nessas imagens o complementar das originais para permitir melhor visualização.

Figura 16 – Imagem com as fraturas de 1 pixel de largura.

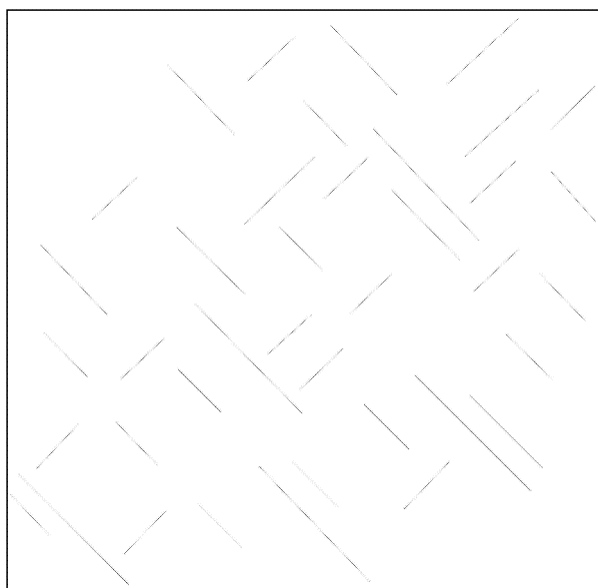
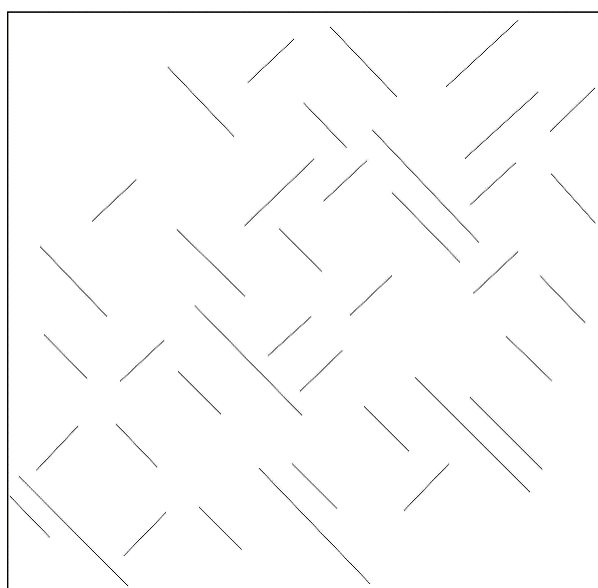


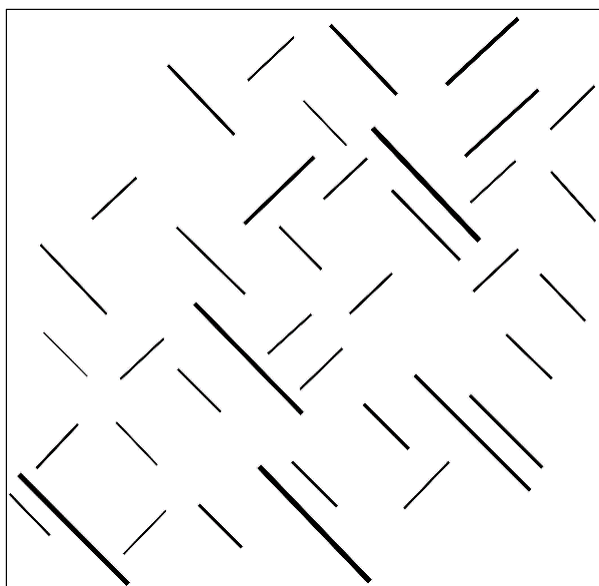
Figura 17 – Imagem com as fraturas de 3 pixels de largura.



Após o usuário definir os pontos de início e fim das fraturas pede-se para marca mais dois pontos referentes a abertura das fraturas. Internamente o programa calcula a distância relativa a esses pontos e faz a conversão para pixels que devem ser escritos na imagem com N pixels de largura. Um exemplo desta imagem é mostrado na Figura 18, onde foi aplicado o complementar das originais para uma melhor visualização. A imagem com N pixels de largura

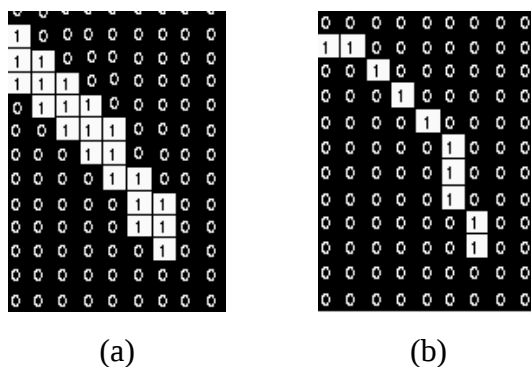
após aplicação de algumas técnicas morfológicas permite obter as informações para utilização da técnica *scanline*.

Figura 18 – Imagem com as fraturas de N pixels de largura.



Para identificação dos elementos topológicos nas imagens que são representados por cruzamentos e fim das fraturas, utilizou-se o método para converter as imagens com cores para a escala binária e aplicar a transformação morfológica *skeletonization*. O método de *skeletonization* consiste em obter uma imagem binária com os objetos da imagem representados por linhas de apenas um pixel de largura. A Figura 19 mostra um pequeno bloco da imagem com 3 pixels de largura (a) e a respectiva imagem após a transformação morfológica (b).

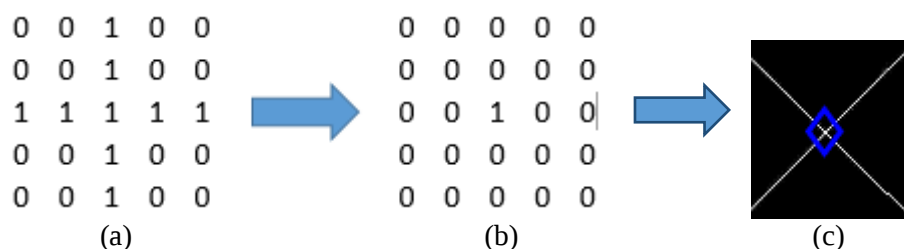
Figura 19 – Transformação morfológica *skeletonization*.



Fonte: Autor.

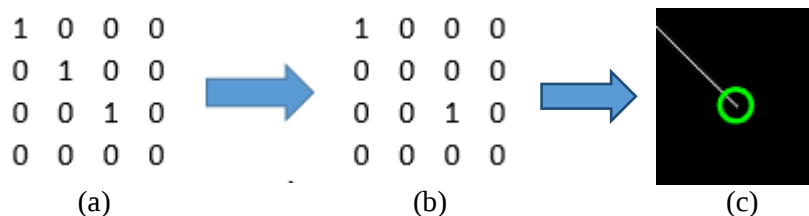
Sequencialmente duas outras transformações morfológicas são aplicadas para identificação de cruzamentos, *branchpoints*, e identificação de fim de pontos, *endpoints*. As Figuras 20 e 21 representam as transformações morfológicas aplicadas para obter o cruzamento e o fim de pontos (MathWorks, 2017). Há várias possibilidades de configuração de pixels que representem os pontos finais e cruzamentos, as Figuras 20 (a) e 21 (a) mostram uma das várias possíveis, já as Figuras 20 (b) e 21 (b) mostram as saídas após as a identificação do cruzamento ou termino das fraturas, que permitem identificar o padrão X e I. Algumas formas de arrumação dos pixels tornam mais difícil e complexa a sua identificação dos pontos que realmente condizem com o cruzamento e o termino das fraturas.

Figura 20 – Representação em binário de uma imagem no cruzamento de linhas.



Fonte: Autor.

Figura 21 – Representação em binário de uma imagem para o fim de linhas.

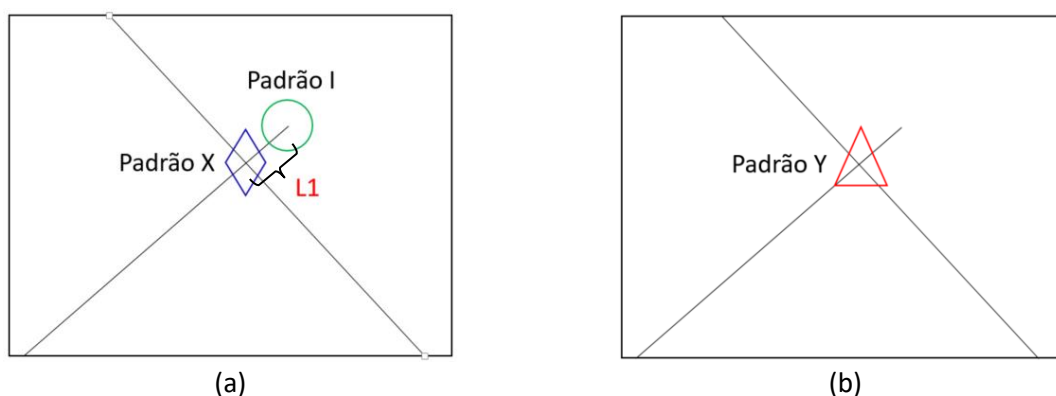


Fonte: Autor.

Devido ao grande número de possibilidades de arrumação dos pixels, alguns pontos encontrados apenas com as técnicas morfológicas *branchpoints* e *endpoints* não condizem com o verdadeiro cruzamento e termino das fraturas, que em grande parte das vezes gera pontos em duplicata, para solucionar esse problema foi necessário a filtragem de limiar de distância, que permite desconsiderar os pontos repetidos. Para pontos da mesma natureza (cruzamento e termino) a distância entre os pontos vizinhos foi calculada e a partir de uma distância limiar definida, os pontos foram excluídos, pois os pontos em duplicata mostram-se muito próximos um dos outros. A distância limiar definida foi encontrada a partir de testes recursivos, com os melhores resultados de exclusão de pontos não condizentes com a realidade das fraturas.

A Figura 22 mostra o caso que deve analisado, pois é identificado como cruzamento (X) e fim (I) ao mesmo tempo, onde essa situação pode vir a ocorrer devido a não precisão da marcação dos pontos de início e fim das fraturas ou até mesmo ser um padrão (Y). Para identificação do padrão (Y) a distância entre os pontos de cruzamento (X) e terminal (I) foi calculada e para uma distância limiar os pontos X se tornava Y e o I era desconsiderado.

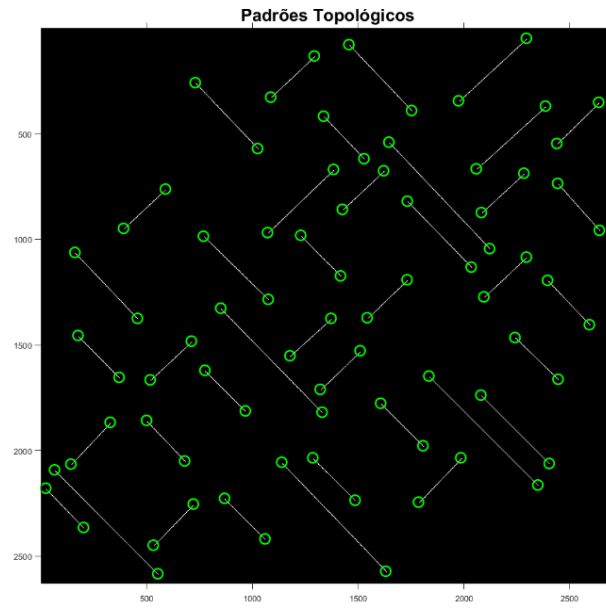
Figura 22 – Representação da detecção do cruzamento e fim ao mesmo tempo.



Fonte: Autor.

Os pontos de cruzamento (X), derivação (Y) e fim (I) encontrados pelas técnicas descritas, são utilizados para marcação visual, Figura 23, permitindo validar os padrões obtidos, também são contabilizados pelo TopoScan para construção gráfica do diagrama ternário. Pontos de termino apenas são contabilizados se estiverem dentro da imagem. Para expressar os padrões X, Y e I no diagrama ternário é necessário realizar a normalização de acordo com as equações (3.10) a (3.12).

Figura 23 – Padrões topológicos obtidos pelo TopoScan.



$$X = \frac{N_X}{N_X + N_Y + N_I} \quad (3.10)$$

$$Y = \frac{N_Y}{N_X + N_Y + N_I} \quad (3.11)$$

$$I = \frac{N_I}{N_X + N_Y + N_I} \quad (3.12)$$

onde N_X , N_Y e N_I são os números de elementos X, Y e I.

Empregou-se o detector de bordas Sobel na imagem N pixels de largura, Figura 18, após aplicação de Sobel uma imagem é gerada com os contornos das fraturas com um pixel, Figura 24.

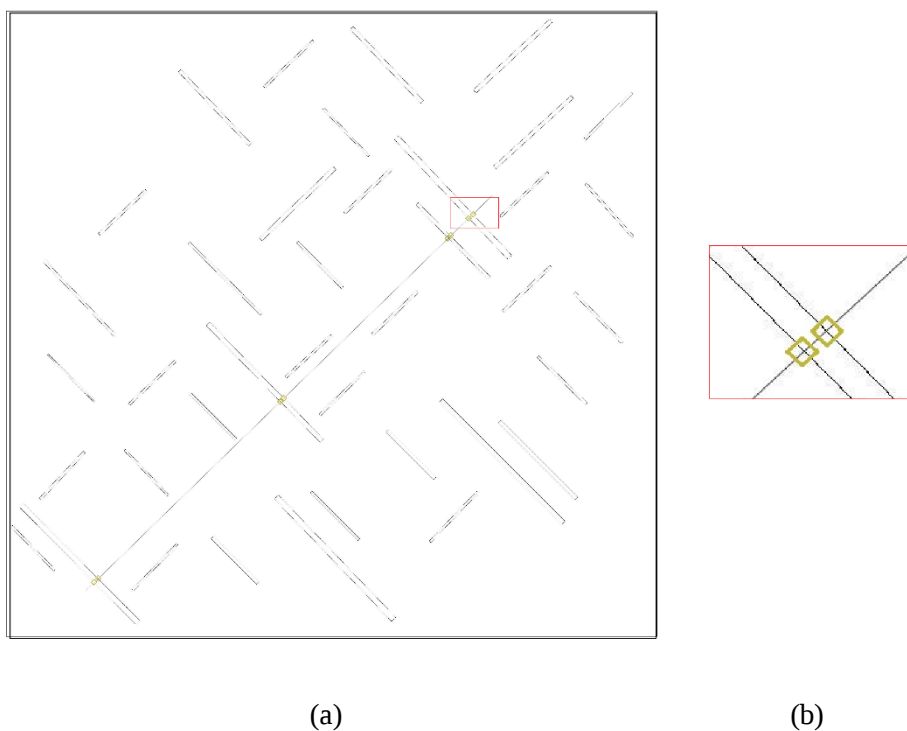
Figura 24 – Contorno da imagem com as fraturas de N pixels de largura.



A inserção de cada *scanline* gera uma nova imagem que sobrepõe as linhas às bordas das fraturas. Os pontos de interseção das linhas da *scanline* com as fraturas são encontrados a partir da transformação morfológica de cruzamento de pontos, *branchpoints*, e os pontos duplicados são filtrados a partir de uma distância limiar definida, a mesma abordagem utilizada para encontrar os cruzamentos da imagem com 3 pixels de largura. A Figura 25 (a), mostra a linha da *scanline* sobreposta com as bordas das fraturas, pontos de cruzamento, em zoom são mostrados dois pontos de cruzamento na Figura 25 (b).

As aberturas e distâncias entre as fraturas são calculadas pela distância entre dois pontos e multiplicado pelo fator de escala real, permitindo obter os tamanhos em escala real. Com os dados de abertura e distância entre as fraturas é plotado o gráfico da lei de potência, para cada *scanline*, foi utilizado o código implementado no trabalho de Santos, et al. (2015) para construção dos gráficos da lei de potência.

Figura 25 – Esquema que mostra pontos de cruzamento, linha *scanline* e aberturas.



Fonte: Autor.

3.1.3 Caracterização (Informações de Saída)

Na caracterização o programa TopoScan tem como saída: separação das famílias de fraturas de acordo com o intervalo de ângulo definido e os seus respectivos tamanhos das fraturas, gráficos da lei de potência da *scanline* linear, padrões topológicos, diagrama ternário, coordenadas, aberturas das fraturas e intensidade de faturamento P22.

As coordenadas e as aberturas das fraturas são salvas pelo TopoScan, para serem utilizadas na montagem da malha de elementos finitos para simulação hidráulica, permitindo encontrar o a permeabilidade equivalente do meio.

3.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO DE FLUIDO EM MEIO NATURALMENTE FRATURADO

O programa *in house* em elementos finitos CODE_BRIGHT foi utilizado para modelar numericamente o escoamento de água em sistemas naturalmente fraturados para identificação da permeabilidade equivalente do meio, considerando a injeção de água em uma face de um domínio bidimensional e a produção de fluido na face jusante, através da aplicação de um

gradiente de pressão.

A seguir descreve-se de forma geral a formulação matemática do programa para a solução do problema de escoamento monofásico.

3.2.1 Formulação matemática do problema de fluxo monofásico

O fenômeno de fluxo monofásico em meios porosos é governado pela equação de fluxo para a fase que preenche os vazios do reservatório proveniente da combinação da equação de conservação de massa do fluido e a lei de Darcy.

Portanto, a equação geral adotada é:

$$\phi \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w) + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{q}_w) = 0 \quad (3.13)$$

sendo ϕ a porosidade do meio, ρ_w o peso específico da água e $\mathbf{q}_w$ o vetor de fluxo de Darcy. O fluxo de Darcy pode ser escrito em termos da pressão de água nos poros p_w , da viscosidade da água μ_w , do vetor de aceleração da gravidade $\mathbf{g}$ e do tensor de permeabilidade intrínseca do meio $\mathbf{k}$. Logo:

$$\mathbf{q}_w = -\frac{\mathbf{k}}{\mu_w}(\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}) \quad (3.14)$$

3.2.2 Formulação de elementos finitos com descontinuidades fortes incorporadas

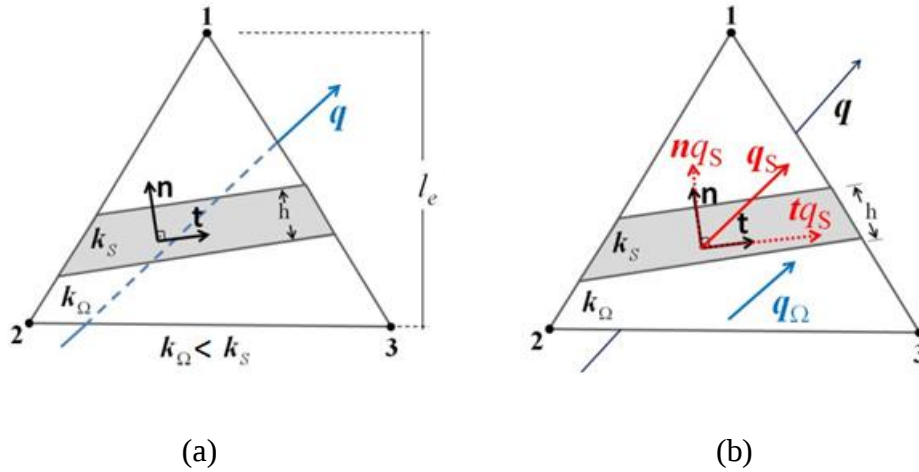
Neste item descreve-se de forma resumida a formulação apresentada por Beserra (2015) para o tratamento de fraturas como descontinuidades de alta permeabilidade embebidas (inseridas) em uma malha de elementos finitos regular.

Como discutido anteriormente, essa estratégia permite a adoção de malhas sem necessidade de refinamento nas regiões onde as fraturas estão localizadas, tal como é feito em outras abordagens. Isto reduz consideravelmente o tempo de processamento.

Esta formulação foi também empregada no trabalho de Falcão et al (2018), dentre diversas outras técnicas que também foram usadas para simular o comportamento hidromecânico de fraturas em um problema Benchmark de reservatório naturalmente fraturado.

A Figura 26 mostra esquematicamente os aspectos relacionados com a inserção da descontinuidade em um elemento finito regular. Beserra (2015) indica que o tensor de permeabilidade do elemento passa a ser anisotrópico com a permeabilidade maior na direção da fratura. Verifica-se que a fratura terá uma abertura h .

Figura 26 – Esquema da aproximação de descontinuidades forte: (a) elemento finito com fratura embebida; (b) tratamento do vetor de fluxo na descontinuidade.



Fonte: Beserra (2015).

Admite-se a simplificação do problema ao se considerar que não há fluxo entre a parede da descontinuidade e a parte contínua do elemento finito seccionado. Assim a componente normal $\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_s$ do vetor de fluxo é nula e o fluxo passa a ser admitido unidirecional. Desta forma:

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_s &= 0 \\ \mathbf{t} \cdot \mathbf{q}_s &= q_s \end{aligned} \quad (3.15)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} q_s &= -K_s \nabla p \\ \text{onde } K_s &= \frac{k_s}{\mu} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Beserra (2015) mostra também que, para garantir a igualdade entre a transmissividade do elemento na direção da fratura e a da fratura incorporada, a permeabilidade (K_s) deve ser multiplicada por um fator geométrico h/l_e que consiste na razão entre a espessura h da fratura

e a dimensão da aresta do elemento finito na qual o fluxo sai. Desta forma, pode-se escrever o vetor de fluxo na fratura como:

$$\mathbf{q}_s = -\frac{h}{l_e} K_s \mathbf{t} \otimes \mathbf{t} \nabla p \quad (3.17)$$

$$K_s = \frac{h^2}{12} \quad (3.18)$$

Sendo $\mathbf{t}$ o vetor que define a direção da descontinuidade.

Já o vetor de fluxo na parte contínua do elemento finito será definido em termos do tensor de permeabilidade $\mathbf{K}_\Omega$ da matriz rochosa e do gradiente de pressão:

$$\mathbf{q}_\Omega = -\mathbf{K}_\Omega \nabla p \quad (3.19)$$

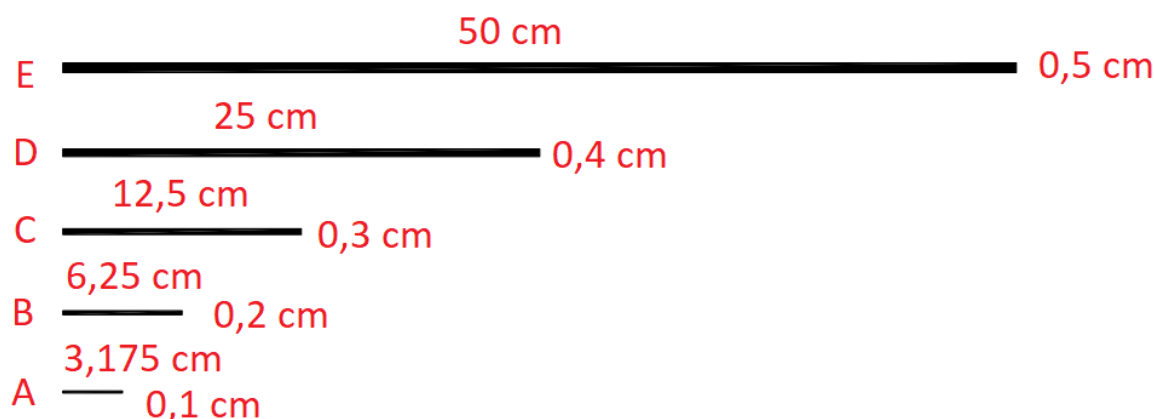
Tem-se portanto um problema de meio contínuo equivalente local, empregando para isso uma abordagem de descontinuidades fortes embebidas, onde o fluxo no elemento finito com descontinuidade incorporada será definido em termos do gradiente de pressão e de um tensor de permeabilidade efetivo (ou equivalente) $\mathbf{K}_{ef}$. Este tensor consiste na soma dos fluxos da descontinuidade e do meio contínuo. Logo:

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= -\mathbf{K}_{ef} \nabla p \\ \mathbf{K}_{ef} &= \left(\mathbf{K}_\Omega + \frac{h}{l_e} K_s \mathbf{t} \otimes \mathbf{t} \right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

4 VALIDAÇÃO E RESULTADOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS DE FRATURAS

Para validação do programa foram utilizadas quatro imagens de redes de fraturas construídas artificialmente a partir de cinco elementos retangulares de diferentes comprimentos e larguras, representados nas imagens pelas letras A, B, C, D e E, em cor preta, Figura 27.

Figura 27 – Tipos de fraturas criadas para construção dos padrões topológicos.



Fonte: Autor.

Foram confeccionadas, entre as quatro, uma imagem com padrão predominante X, outra predominante Y, a terceira predominante I e a última com os três padrões simultâneos XYI. Desta forma definiu-se um meio com fraturas de comprimento e aberturas controladas, tendo seus valores definidos previamente, permitindo avaliar os ajustes, erros e padrões encontrados pelo programa. A seguir detalha-se cada um destes casos, considerando a aplicação da metodologia e algoritmos desenvolvidos neste trabalho.

4.1 PADRÃO I

A imagem com padrão I utilizada para validação do algoritmo é mostrada na figura 28, e compreende três padrões de fraturas mostrado pelas letras A, B e C. Após a marcação das fraturas e aberturas, quatro *scanlines* para cada família foram traçadas na imagem, mostrado na figura 29, embora seja possível fazer quantas *scanlines* desejar. Para cada *scanline* foi

traçado o gráfico da lei de potência em log-log e escala linear, figuras 30 a 37, onde as quatro primeiras figuras são referentes ao set A da família 1, e as quatro ultimas referente ao set B da família 2.

Figura 28 – Sistema fraturado construído para validação com predominância de padrões I.

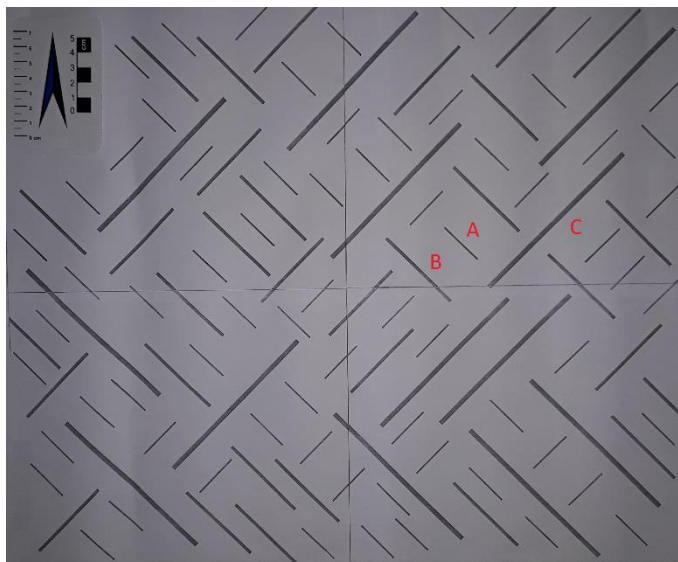


Figura 29 – Scanlines para imagem dos padrões I processados no TopoScan.

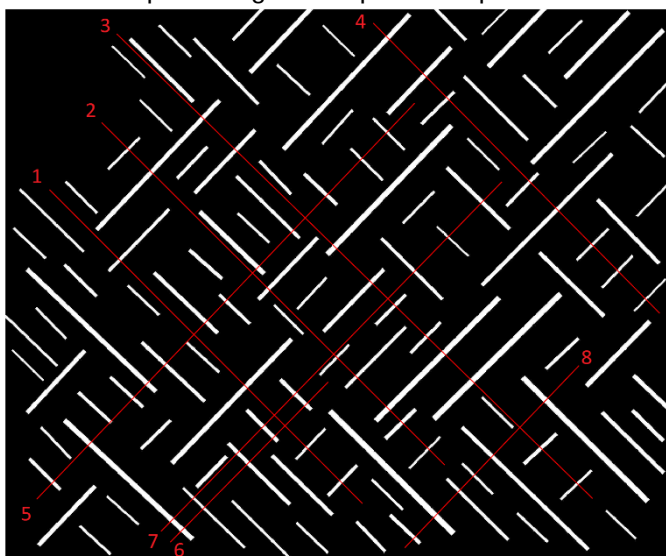


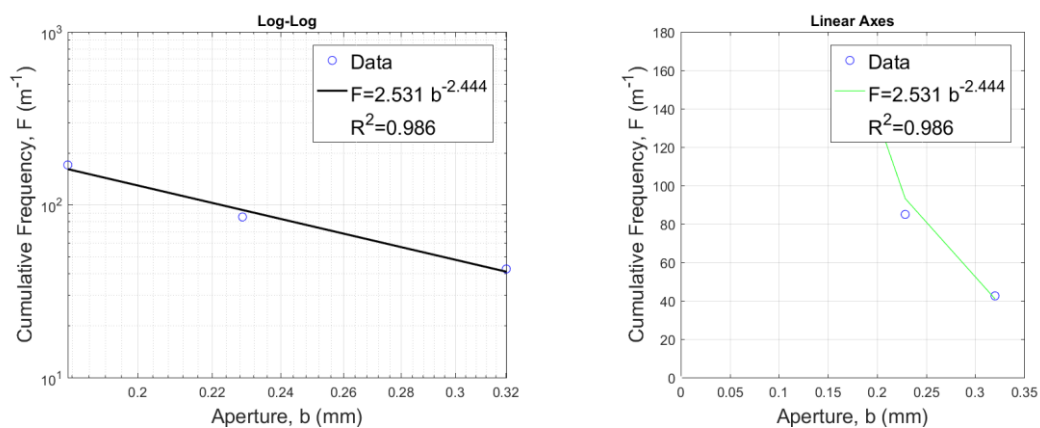
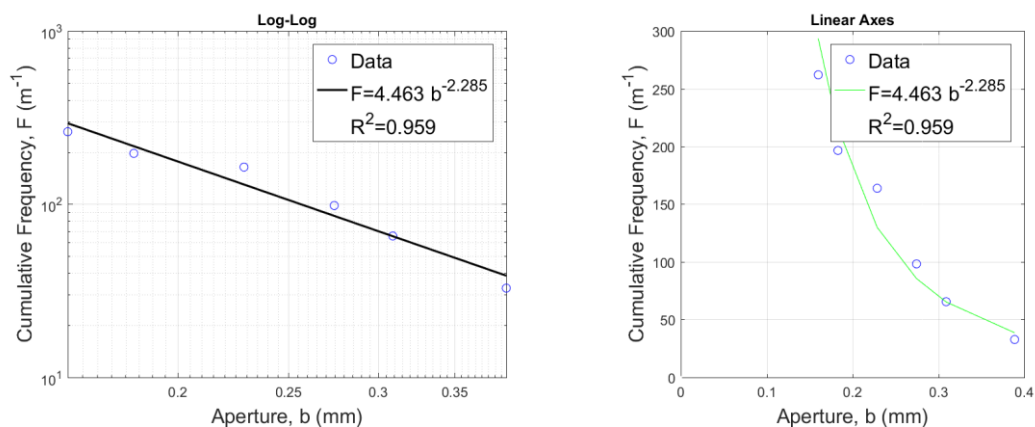
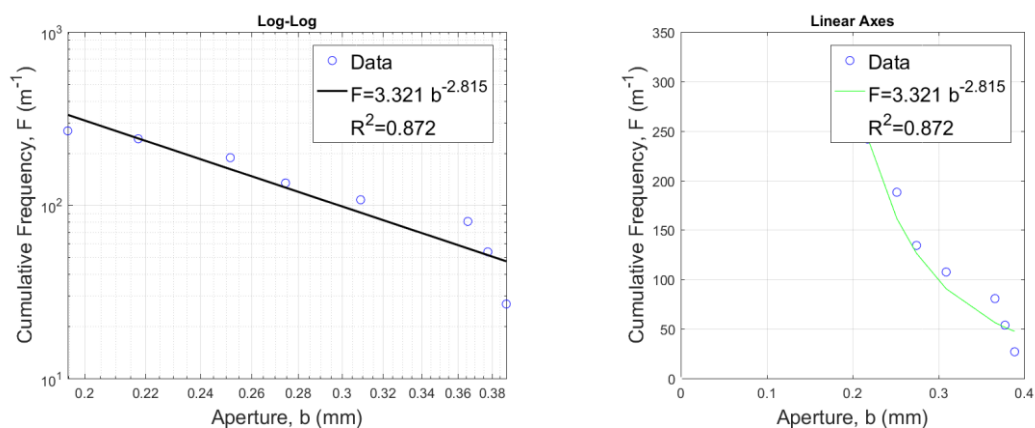
Figura 30 – Lei de potência set A, *scanline 1*.Figura 31 – Lei de potência set A, *scanline 2*.Figura 32 – Lei de potência set A, *scanline 3*.

Figura 33 – Lei de potência set A, scanline 4.

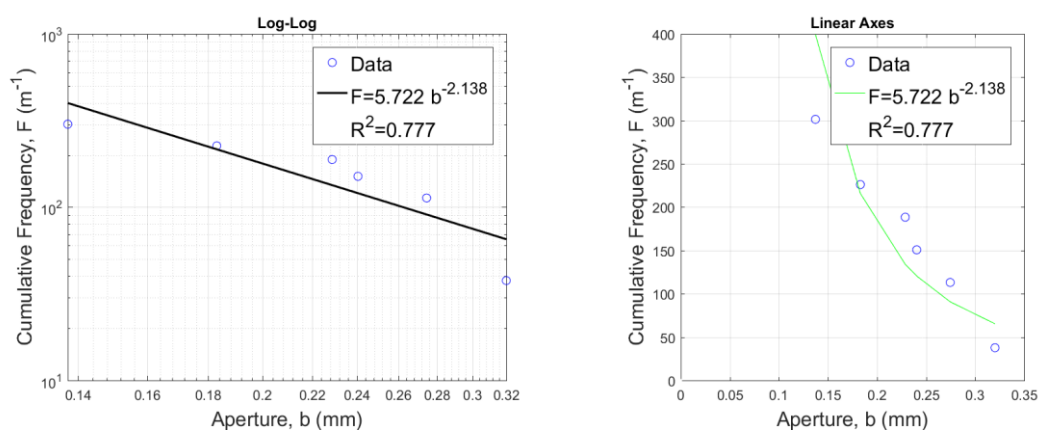


Figura 34 – Lei de potência set B, scanline 5.

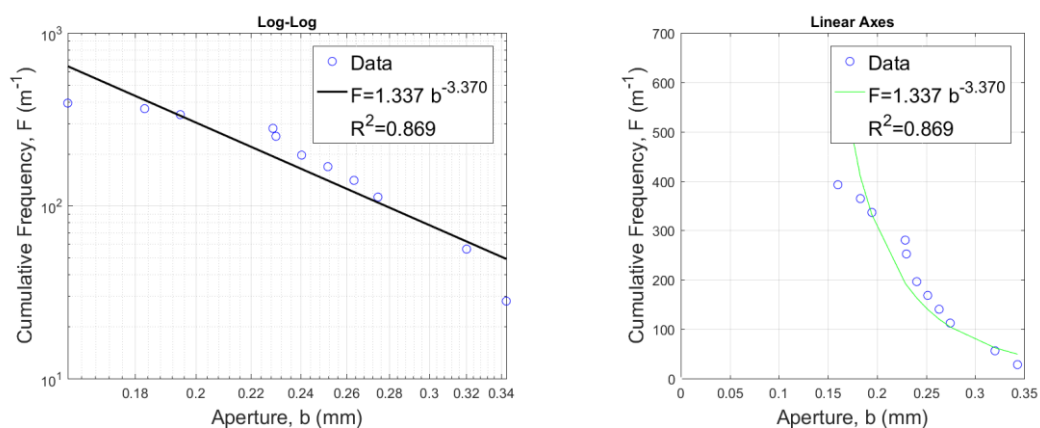


Figura 35 – Lei de potência set B, scanline 6.

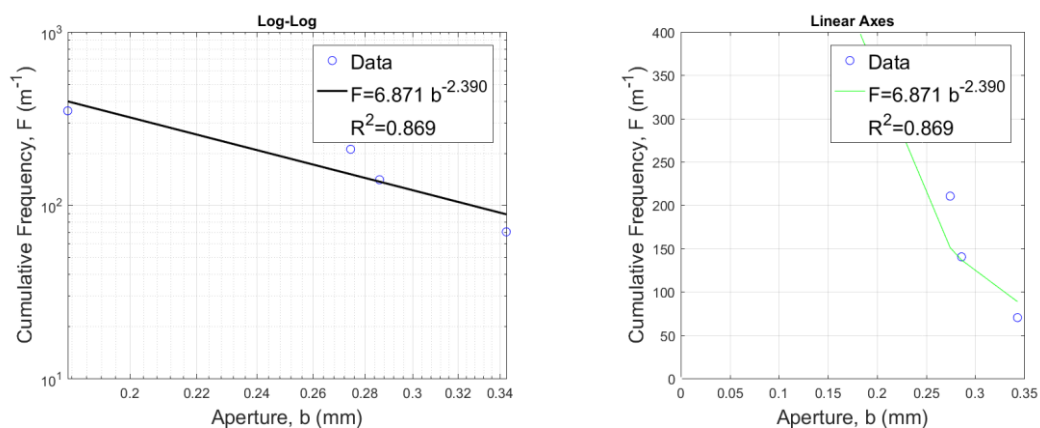
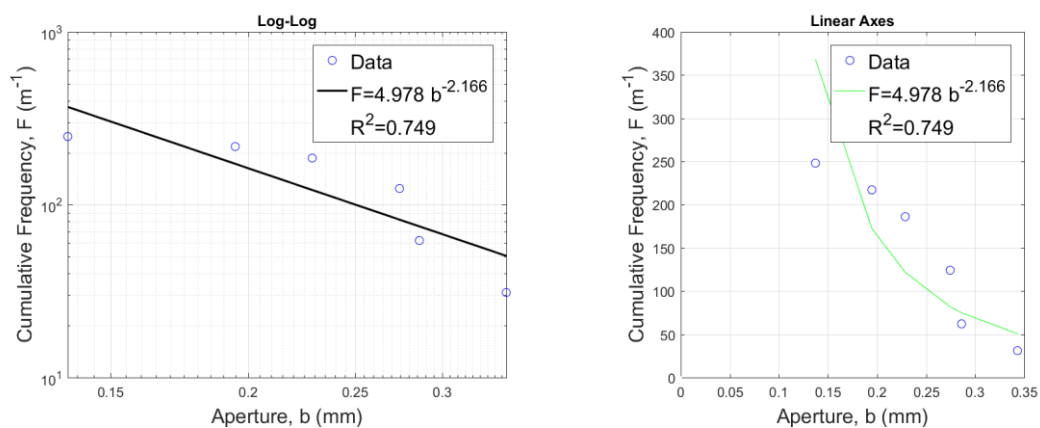
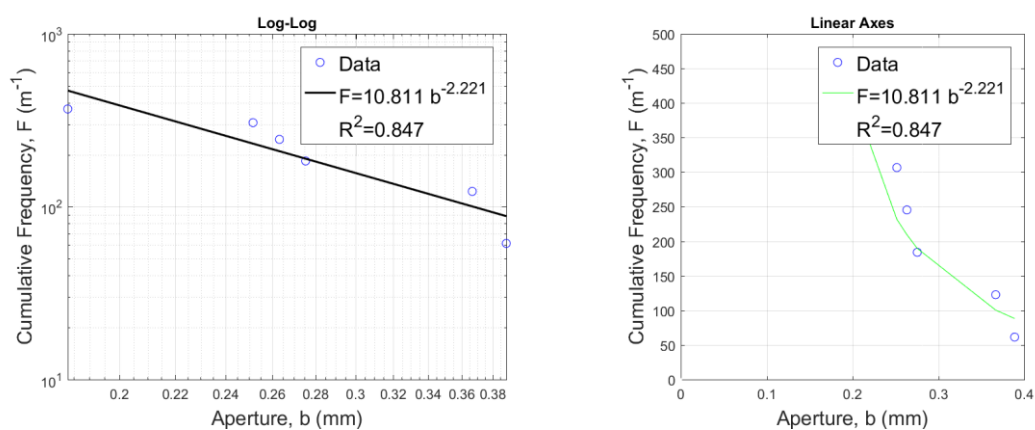
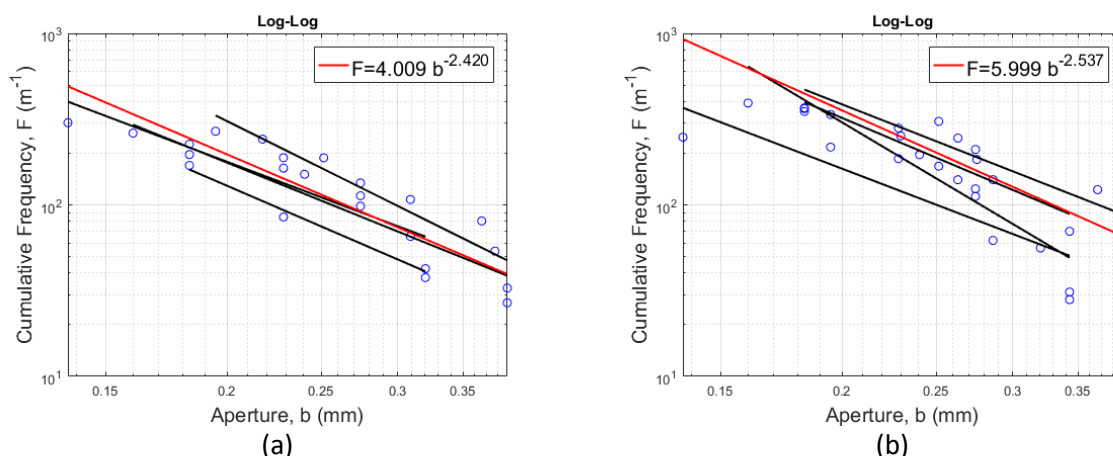


Figura 36 – Lei de potência set B, *scanline* 7.Figura 37 – Lei de potência set B, *scanline* 8.

A partir da média das constantes de proporcionalidade e do expoente da lei de potência, Figuras 30 a 33, foi construída graficamente para o set A, família 1, a curva que representa de forma mais confiável a relação entre a frequência acumulada e as aberturas Figura 38 (a). Para o set B, família 2, também foi construído o gráfico da lei de potência média, Figura 38 (b).

Figura 38 – Lei de potência média set A (a) e set B (b).



A partir da lei de potência média, a constante de proporcionalidade e o expoente possibilitam identificar para determinada abertura qual a frequência acumulada, ou seja, quantas fraturas com abertura definida existem ao longo de uma linha com um metro de comprimento. Os coeficientes da lei de potência também são importantes na modelagem de parâmetros intrínsecos de reservatórios, por exemplo os campos de permeabilidade e identificação do intervalo de confiança para os parâmetros coletados em campo (Santos, et al., 2015).

A Figura 39 mostra o boxplot dos erros relativos das aberturas e comprimentos, sendo esta análise de grande importância uma vez que permite quantificar a precisão da técnica utilizada pelo programa apenas para uma medida, porém para melhor identificação dos erros é necessário a utilização desta mesma imagem diversas vezes pelo TopoScan.

Vale ressaltar que grande parte do problema de obtenção dos tamanhos surge no momento das marcações dos pontos das aberturas e comprimentos. Isso principalmente devido à dificuldade visual de marcação de pontos de aberturas e comprimentos pequenos. As técnicas de detecção de linhas e bordas não permitem obter de forma coerente as fraturas diretamente da imagem, devido a esse motivo a abordagem da marcação dos pontos das aberturas e comprimentos ainda é necessária para identificação das fraturas.

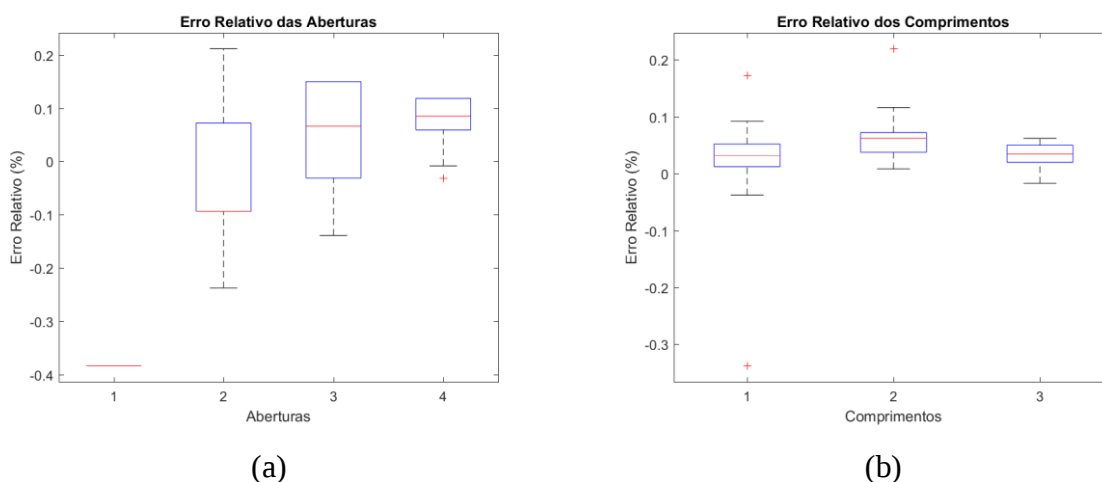
No boxplot as aberturas e os comprimentos foram representados pelos elementos constituintes na criação da rede de fraturas, A, B, C, D e E. Na Figura 39 (a) para a menor abertura, A, a mediana é de aproximadamente -37%, com pequena dispersão dos erros, devido ao número pequeno de aberturas deste tipo identificadas pela marcação. Por outro lado a abertura B e C têm uma mediana bem menor que A, mas uma dispersão que tende a diminuir

a medida que as aberturas aumentam. Foi encontrada uma fratura tipo D, porém esta não foi utilizada na construção do padrão I, onde esse problema ocorreu devido à marcação de aberturas com dimensões maiores que a do tipo C, no momento da inserção das aberturas no TopoScan.

Na Figura 39 (b) percebeu-se que a dispersão é baixa e que os erros são bem menores que os encontrados para as aberturas. Por exemplo, para o comprimento do tipo A, a mediana é cerca de 1%. Os erros são menores para os comprimentos devido a maior facilidade na marcação de tamanhos maiores.

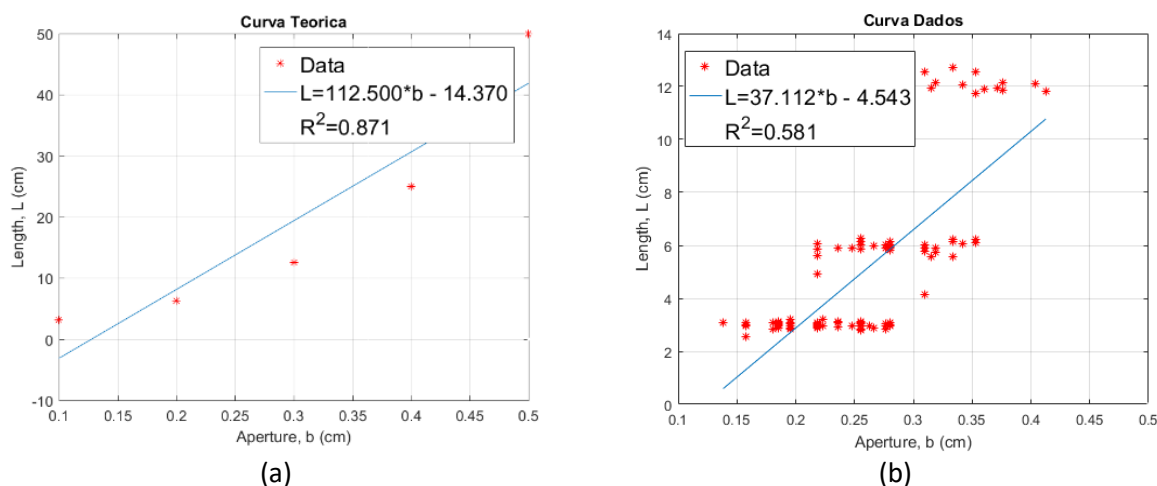
Vale ressaltar que esses erros mostrados são apenas para uma medida, para melhor identificação dos erros deve-se utilizar o TopoScan um grande número de vezes nesta mesma imagem. O erro que tem maior importância é entre a permeabilidades equivalente prática e a real, na parte de simulação esse estudo foi feito com as aberturas identificadas pelo programa e a real.

Figura 39 – Boxplot dos erros relativo das aberturas (a) e dos comprimentos (b).



A Figura 40 mostra os gráficos da curva teórica e dos dados encontrados pelo programa, as aberturas e comprimentos padronizados para construção dos padrões topológicos. O gráfico da Figura 40 (a) mostra os pontos de abertura e comprimento padronizados com ajuste linear, 40 (b) mostra os pontos obtidos pelo programa também com o ajuste linear, esta confirma que a dispersão dos comprimentos é bem menor que a das aberturas.

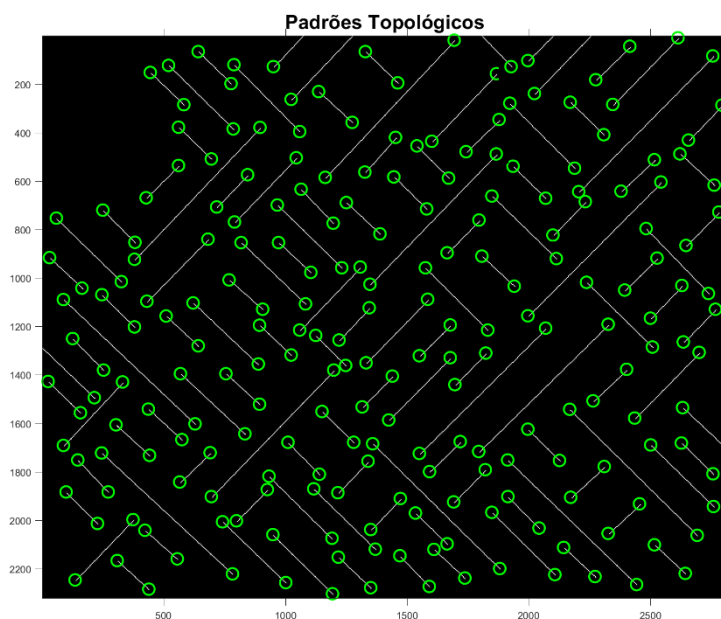
Figura 40 – Curva teórica (a) e curva com os dados reais (b) da abertura x comprimento das fraturas.



As famílias foram separadas de acordo com o intervalo de ângulo definido pelo usuário. Na situação da Figura 28, existem apenas duas famílias ($N_f = 2$) a angulação é definida pela equação (3.8), $\theta = 45^\circ$. A partir do fornecimento do ângulo os comprimentos são separados e inseridos em uma tabela, onde cada coluna representa as famílias e as linhas os comprimentos. Devido ao grande número de fraturas a tabela com os comprimentos não foi adicionada nesta parte.

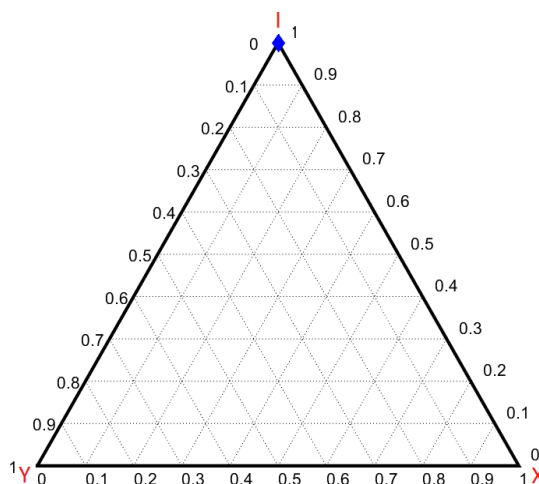
Na Figura 41 é mostrado os padrões topológicos identificados pelo programa. Empregou-se a identificação por círculos verdes para fraturas com topologia tipo I. Nesse caso todos os padrões foram perfeitamente identificados.

Figura 41 – Padrões topológicos, predominância I.



A partir da contagem dos padrões encontrados na Figura 41 e normalização de acordo com as equações (3.10) a (3.12) foi gerado o gráfico do diagrama ternário mostrado na Figura 42. Essa Figura mostrou a predominância de padrões I, ou seja, as fraturas não são conectadas e pode-se teorizar que a região deverá apresentar baixa permeabilidade global, se considerar uma matriz de rocha pouco permeável.

Figura 42 – Diagrama ternário mostrando predominância do padrão I.



4.2 PADRÃO X

Seguindo a mesma forma de apresentação dos resultados obtidos para o padrão I, a Figura 43 mostra a imagem do sistema fraturado com predominância de padrões X. Foi utilizado apenas o tipo E de fratura para construção desse padrão. As *scanlines* utilizadas são mostradas na Figura 44. A partir das *scanlines* foram construídos oito gráficos da lei de potência em escala log-log e escala linear, Figuras 45 a 52, sendo as quatro primeiras figuras referentes ao set C da família 1, E45N, e as quatro ultimas referente ao set D da família 2, N45O.

Figura 43 – Sistema fraturado construído para validação com predominância de padrões X.

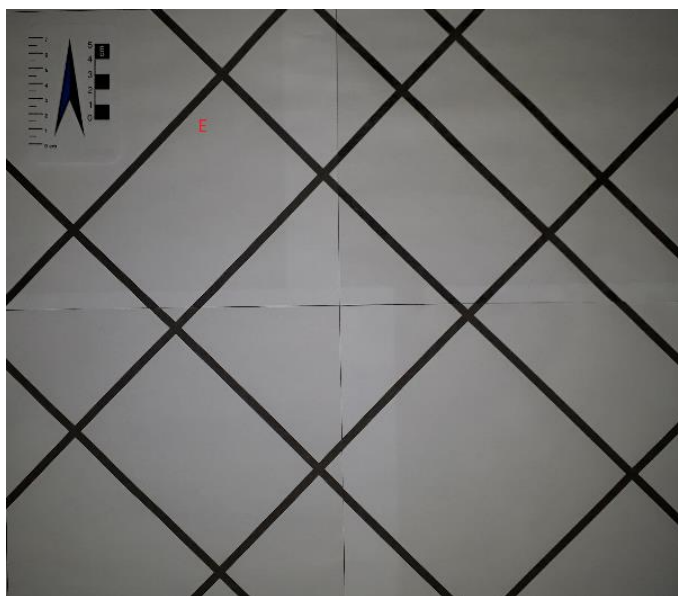


Figura 44 – *Scanlines* para imagem dos padrões X processados no TopoScan

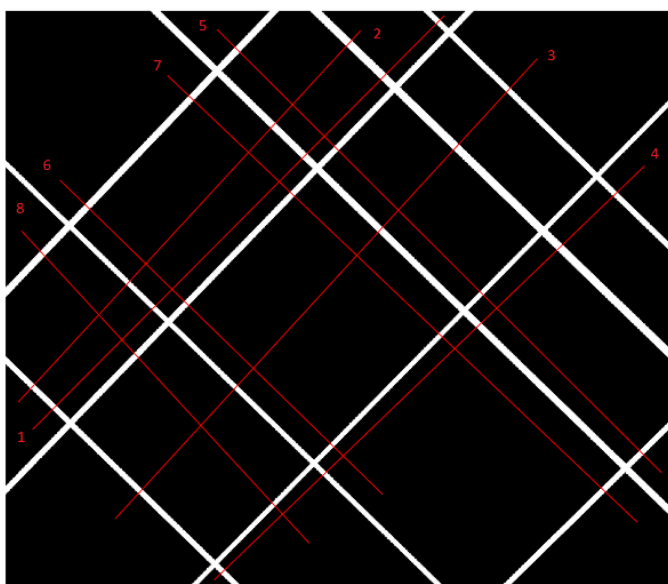


Figura 45 – Lei de potência set C, *scanline 1*.

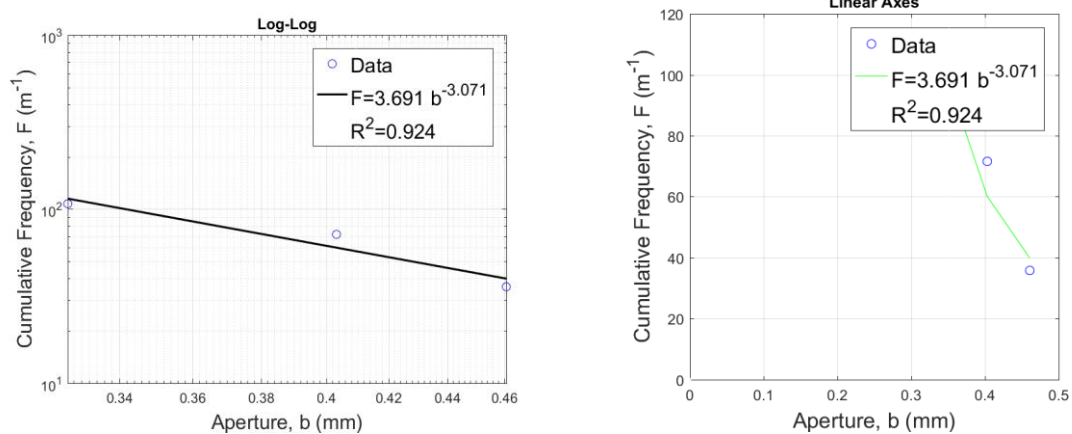


Figura 46 – Lei de potência set C, *scanline 2*.

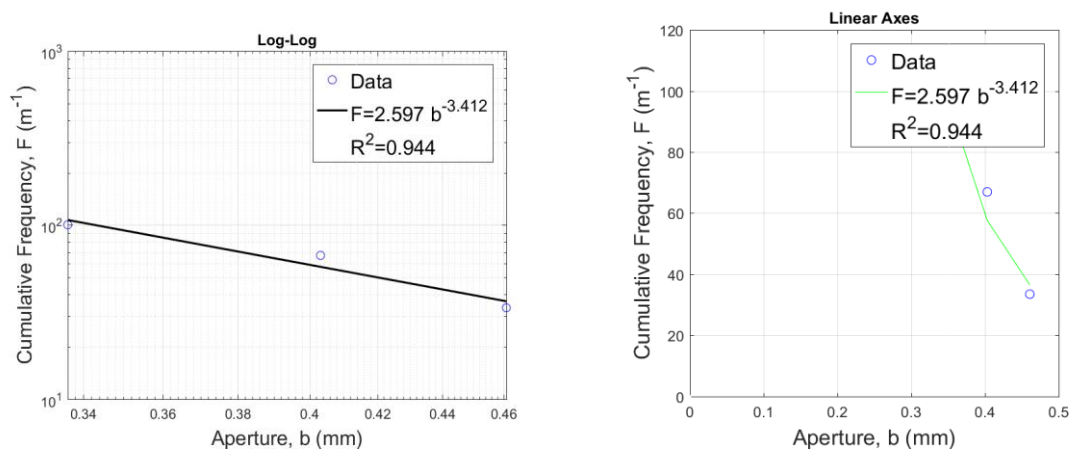


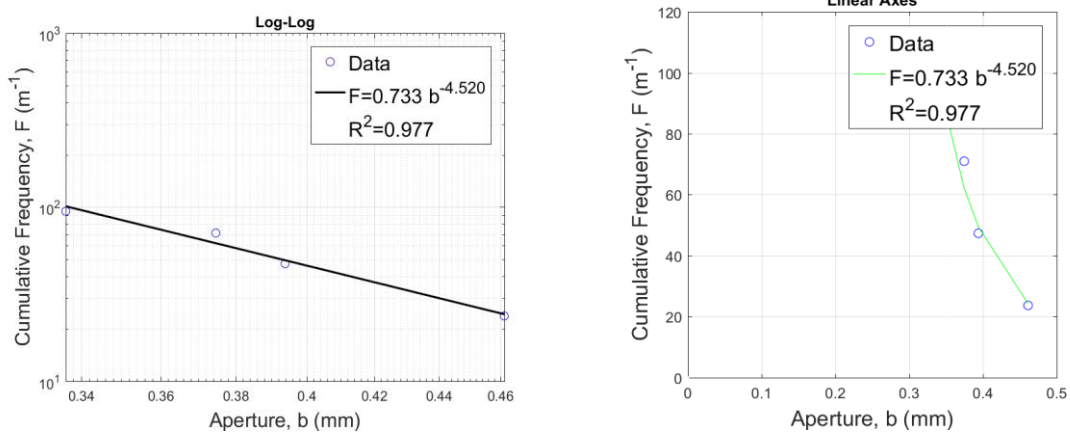
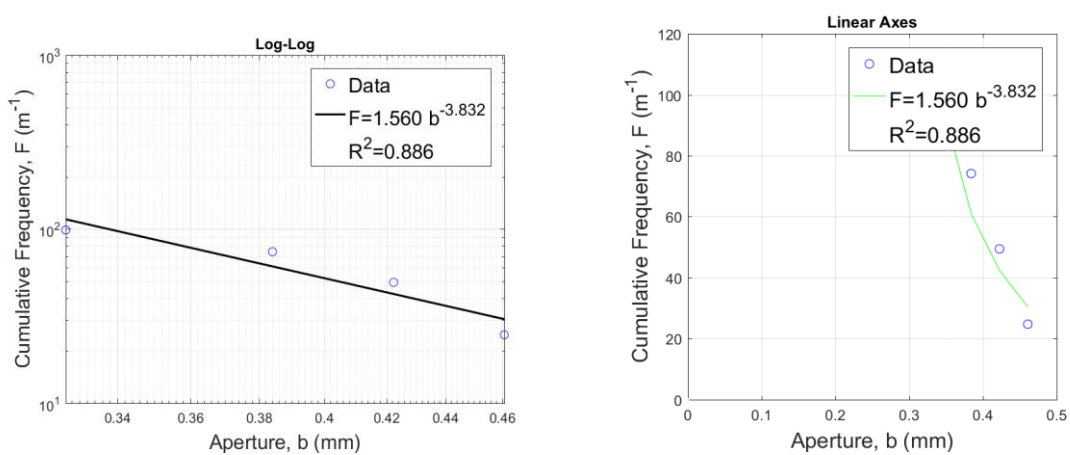
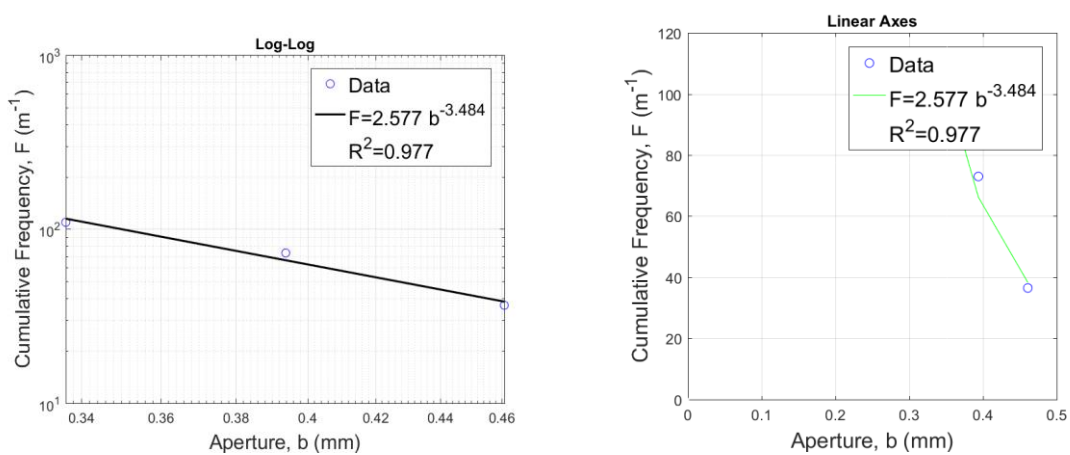
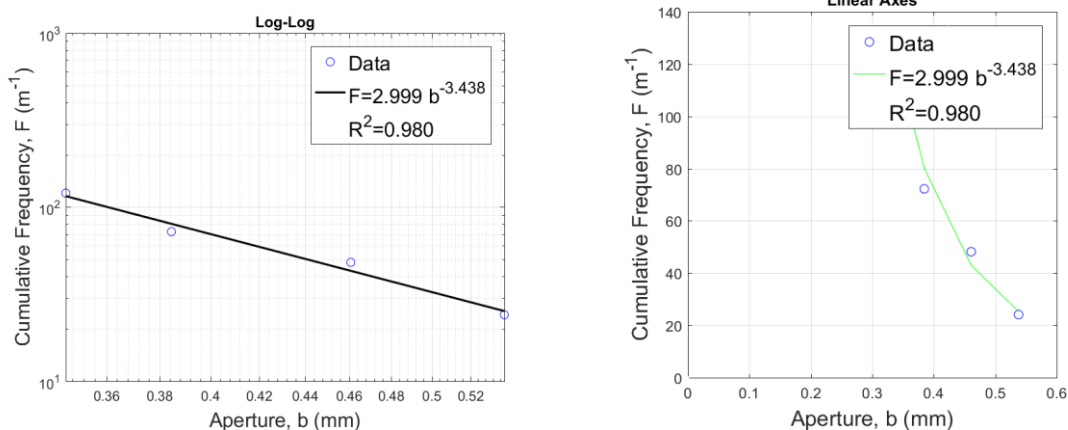
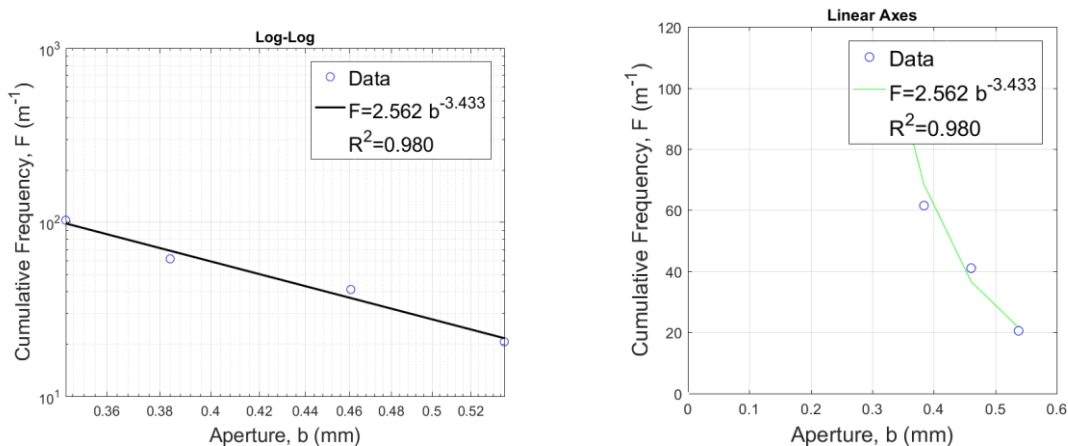
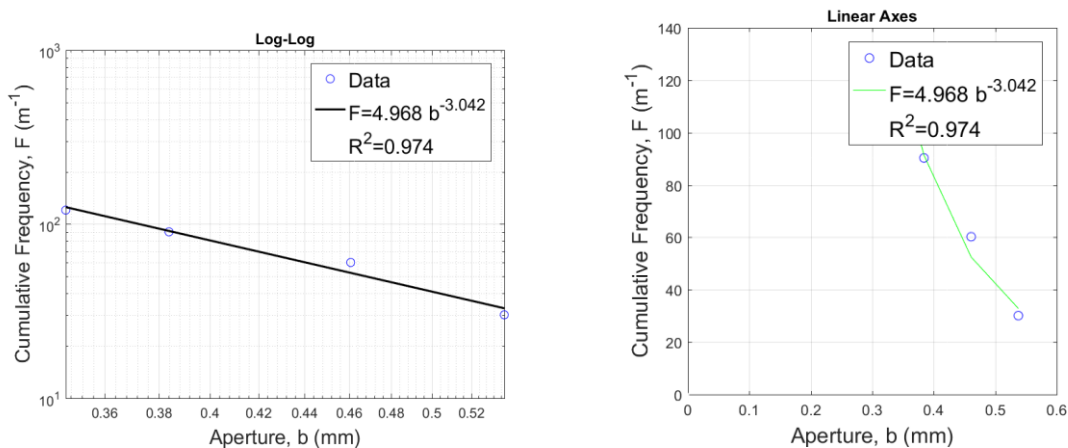
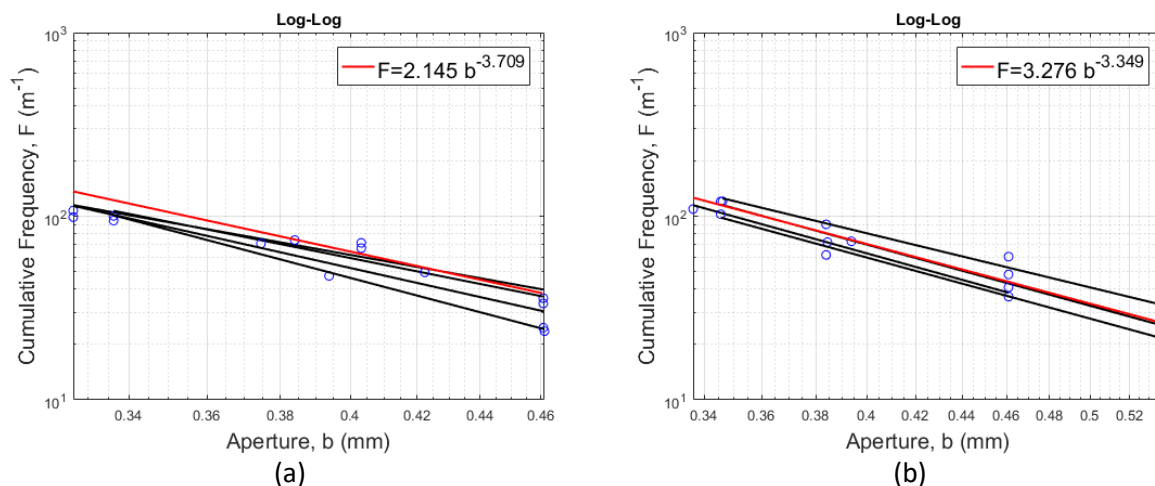
Figura 47 – Lei de potência set C, *scanline* 3.Figura 48 – Lei de potência set C, *scanline* 4.Figura 49 – Lei de potência set D, *scanline* 5.

Figura 50 – Lei de potência set D, *scanline* 6.Figura 51 – Lei de potência set D, *scanline* 7.Figura 52 – Lei de potência set D, *scanline* 8.

A média das constantes de proporcionalidade e do expoente da lei de potência de cada set, permitiu a construção dos gráficos das Figuras 53 (a) e 53 (b). A lei de potência média permite representar de forma mais confiável a relação entre a frequência acumulada e as

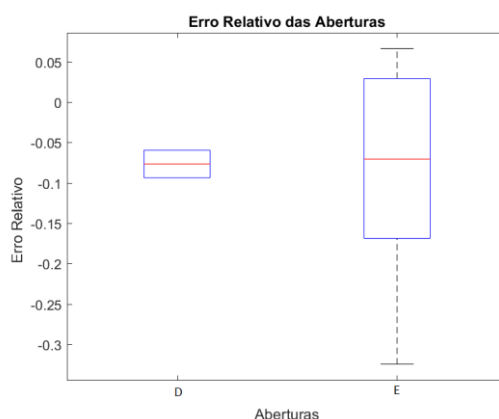
aberturas. A importância da obtenção dos coeficientes da lei de potência para as scanlines foi mencionado no caso anterior.

Figura 53 – Lei de potência média set C (a) e set D (b).



A Figura 54 mostra apenas o boxplot dos erros relativo das aberturas, como o comprimento das fraturas não foram possíveis de serem identificados, pois as fraturas se estendem além da imagem e o boxplot dos comprimentos não foi obtido. A Figura 43 conta apenas com um tipo de abertura em sua construção, porém o boxplot mostra que encontrou os tipos D e E. Isso ocorreu devido ao mesmo problema do caso I, a marcação dos pontos, porém neste caso ocorreu devido a inserção aberturas menores.

Figura 54 – Boxplot dos erros relativos das aberturas das fraturas.

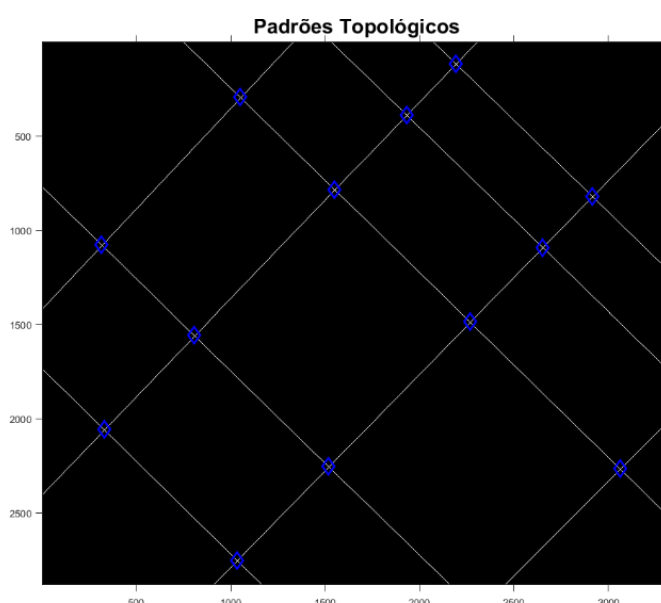


A tabela com o comprimento das fraturas não foi possível de ser criada, devido as mesmas terem dimensões maiores que a imagem. Isto se deve ao fato de que o programa TopoScan apenas calcula distâncias para pontos dentro da imagem, o que pode ser tratado

como um problema prático de amostragem em campo, que leva a problemas de censoring nos dados de scanlines expressos graficamente através de leis de potência. Na prática, fraturas de grande abertura e, conseqüentemente, grandes comprimentos, muitas vezes são subamostradas ou não amostradas dentro da janela de observação no campo.

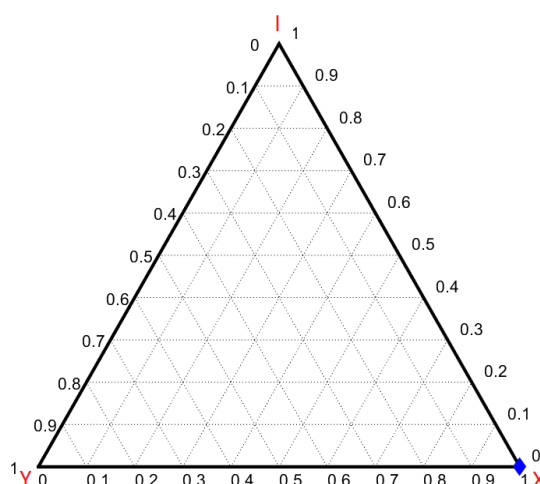
A Figura 55 mostra os padrões topológicos identificados pelo programa, tendo sido empregado o diamante azul representa a topologia X. Fica perceptível na imagem que todos os cruzamentos foram reconhecidos. Para fraturas com término fora dos limites da imagem ainda não há simbologia que os represente.

Figura 55 – Padrões topológicos, predominância X.



A contagem dos padrões encontrados na Figura 55 foram normalizados, com as equações (3.10) a (3.12). Os padrões normalizados foram utilizados na construção do gráfico do diagrama ternário mostrado na Figura 56. Este gráfico mostra de forma simplificada a dominância de padrões X, como previsto, além de permitir a teorização de que a permeabilidade equivalente tenderá a apresentar um valor elevado em relação ao caso do item anterior.

Figura 56 – Diagrama ternário predominância X.



4.3 PADRÃO Y

A mesma ordem de informações apresentadas para os outros padrões foram utilizadas. A Figura 57 mostra a imagem com o padrão Y, as fraturas dos tipos B, C, D e E, foram utilizadas para construção desse padrão. Também, assim como nos casos anteriores, foram realizadas 4 *scanlines* para cada família de fraturas conforme mostrado na figura 58. Cada *scanline* permitiu plotar o gráfico da lei de potência em log-log e escala linear, Figuras 59 a 66, sendo as quatro primeiras figuras são referentes ao set E da família 1, e as quatro ultimas referente ao set F da família 2.

Figura 57 – Sistema fraturado simulado para validação com predominância de padrões Y.

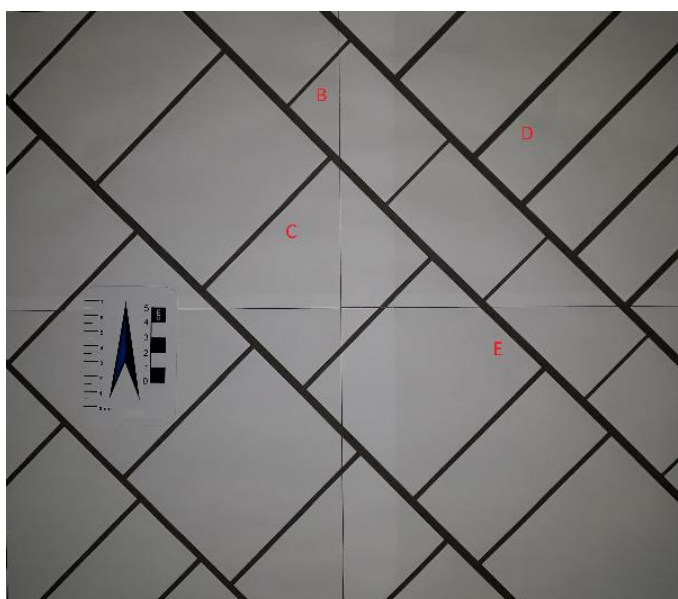


Figura 58 – Scanlines para o padrão Y.

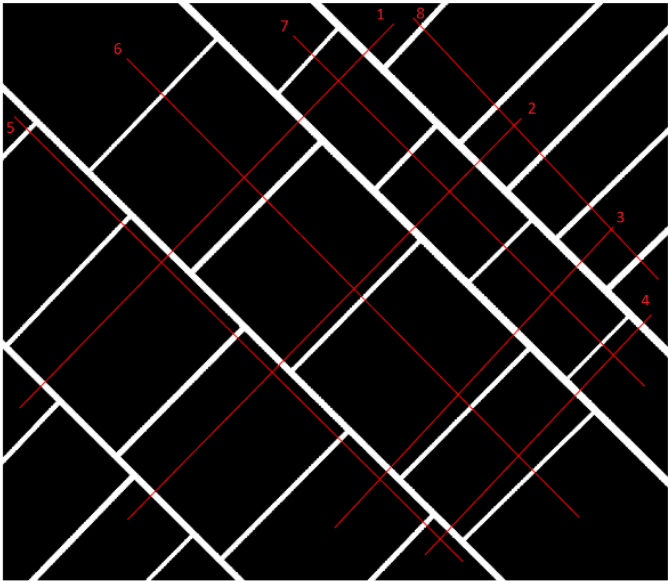


Figura 59 – Lei de potência set E, scanline 1.

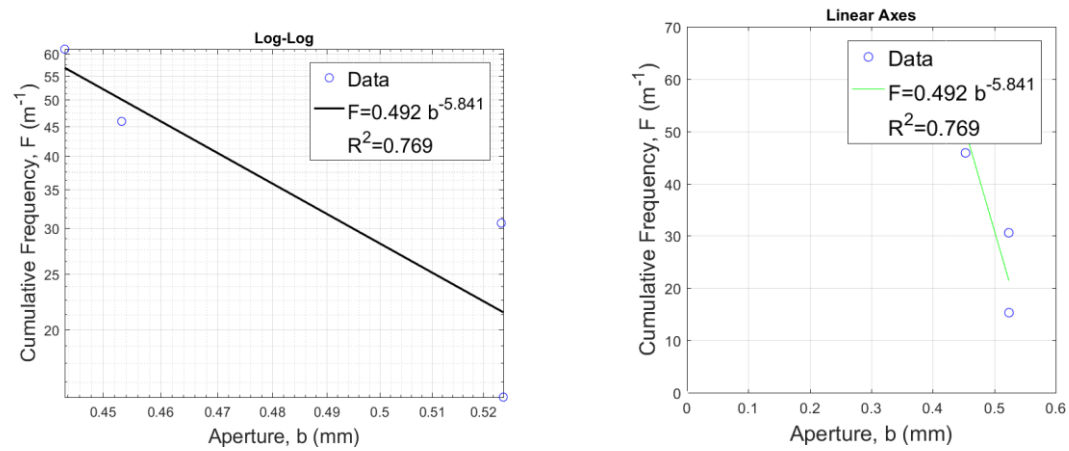


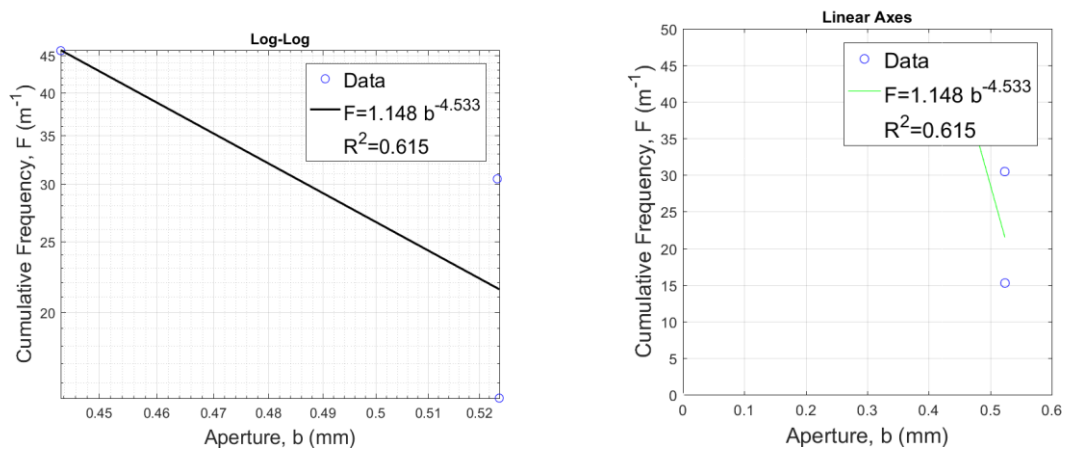
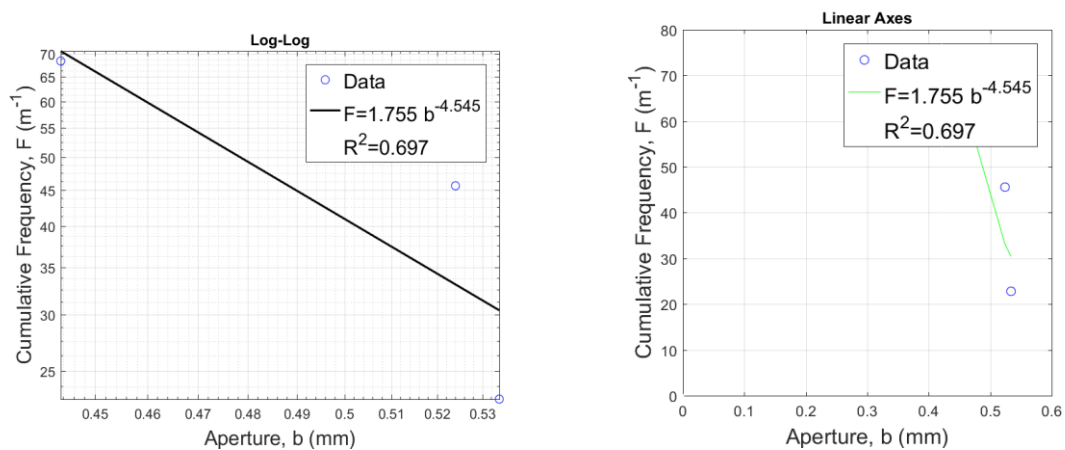
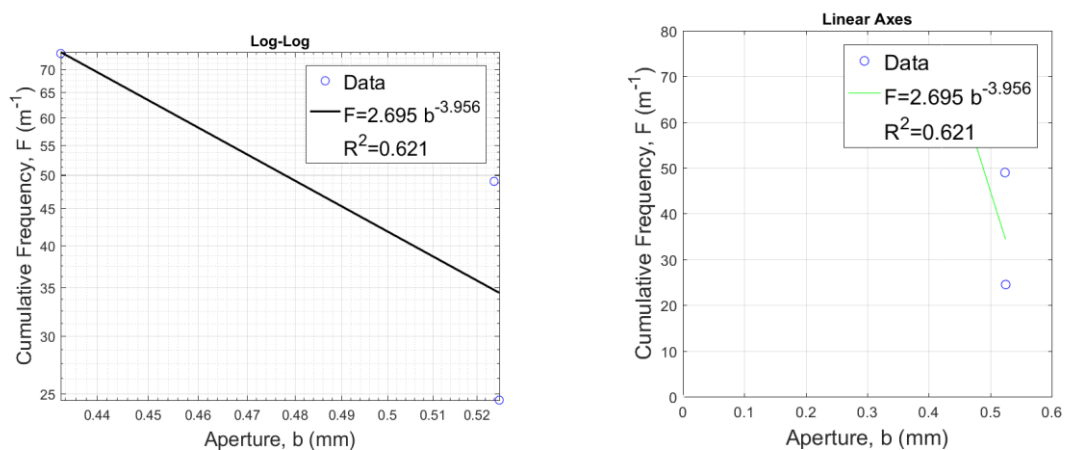
Figura 60 – Lei de potência set E, *scanline 2*.Figura 61 – Lei de potência set E, *scanline 3*.Figura 62 – Lei de potência set E, *scanline 4*.

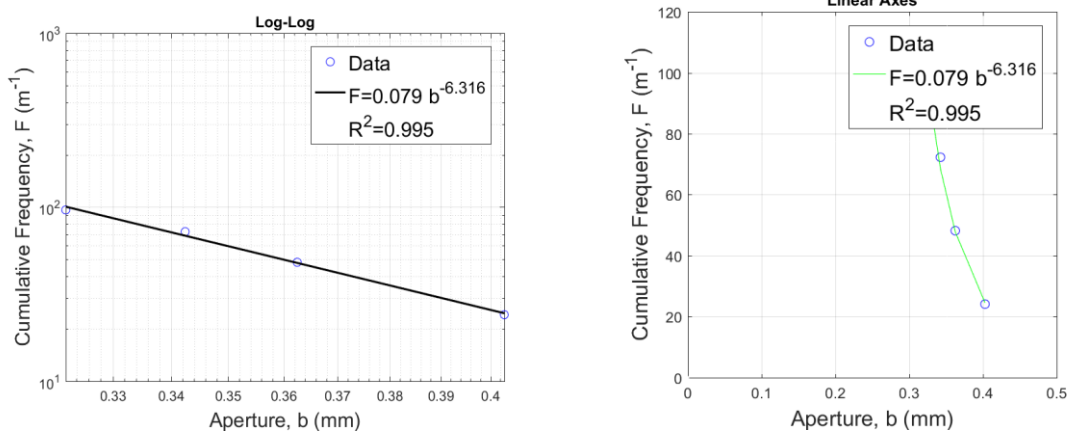
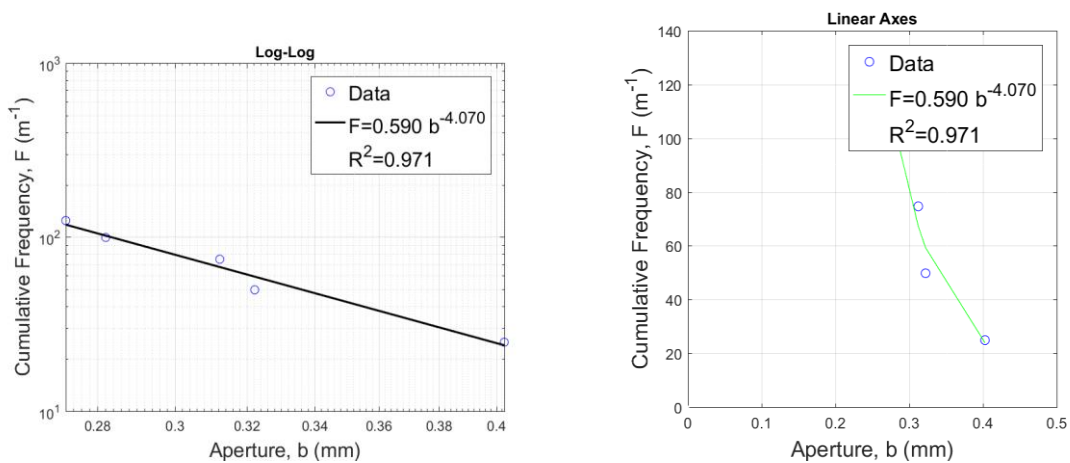
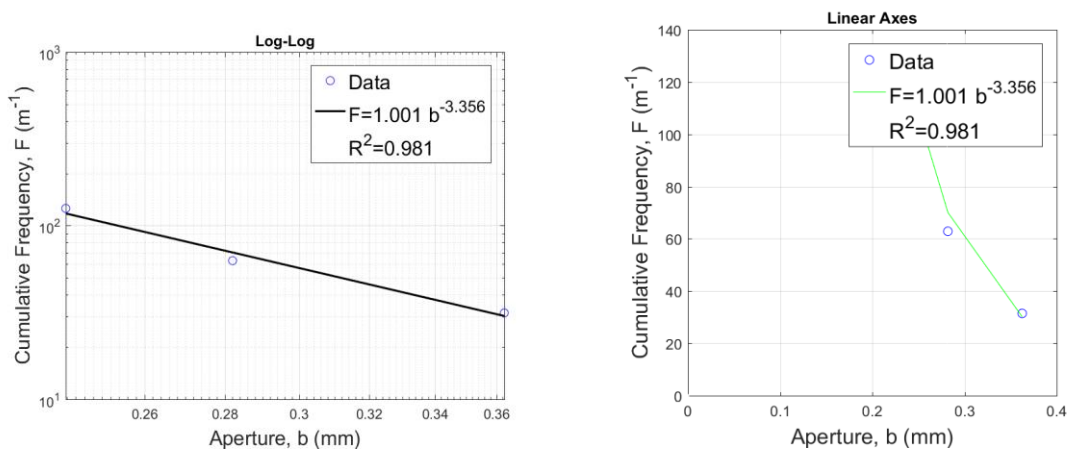
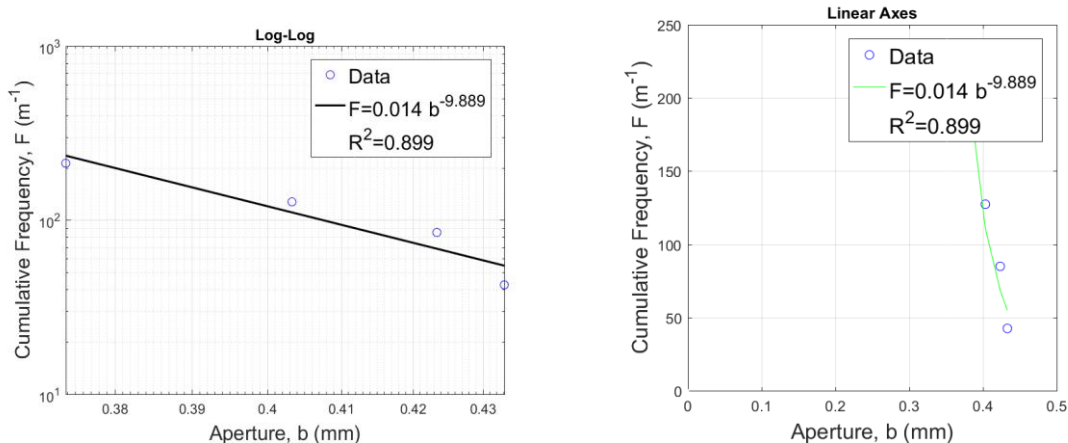
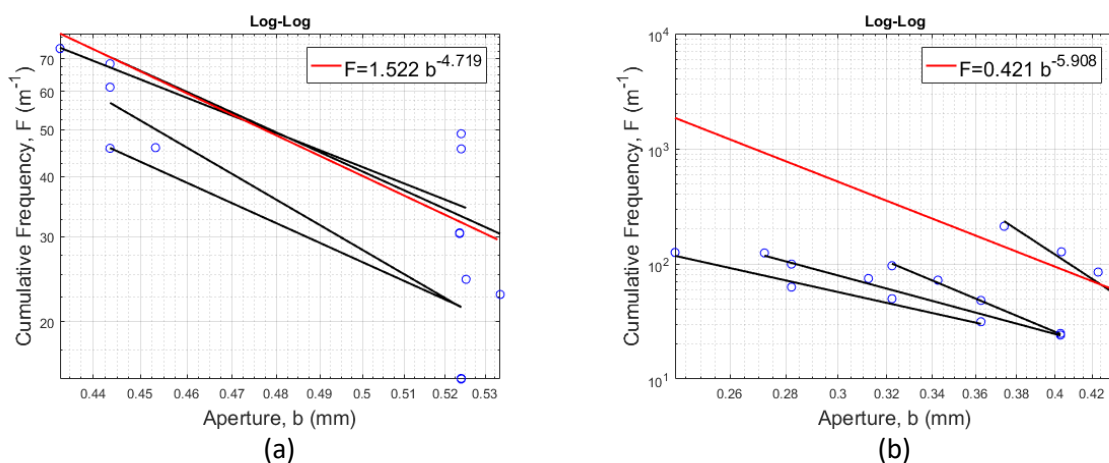
Figura 63 – Lei de potência set F, *scanline* 5.Figura 64 – Lei de potência set F, *scanline* 6.Figura 65 – Lei de potência set F, *scanline* 7.

Figura 66 – Lei de potência set F, *scanline* 8.

Da mesma forma que o caso anterior, foram definidos os sets, C e D, família 1 e 2, que estão a E45N e N45O. Para cada set quatro *scanlines* foram inseridas, a partir dos dados de abertura e espaçamento os gráficos de lei de potência foram construídos, Figuras 59 a 66.

A partir da média das constantes de proporcionalidade e dos expoentes da lei de potência dos mesmos sets, permitiu construir um gráfico com a lei de potência média, Figura 67.

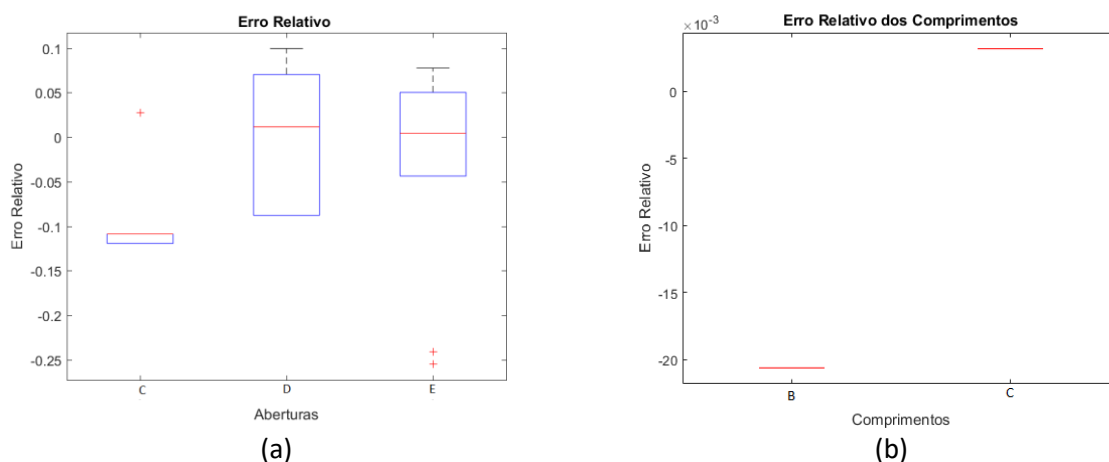
Figura 67 – Lei de potência média set E (a) e set F (b).



O boxplot dos erros relativos das aberturas e comprimentos é mostrada na Figura 68. Há um ponto fora da caixa na Figura 68 (a), onde esse ponto representa um erro discrepante, *outliers*, para o tipo C. Na construção da Figura 57 foi utilizado quatro tipos de fraturas B, C, D e E, porém para o boxplot 68 (a) apenas três aberturas foram encontradas, esse problema também ocorreu para os outros padrões I e X, devido a mesma problemática causada pela marcação das aberturas pequenas. Há também uma grande dispersão para as aberturas como nos outros casos.

Na Figura 68 (b) o boxplot representou dois comprimentos, B e C. A mediana, o 1º e 3º quartil, são praticamente iguais, devido a mínima dispersão dos erros. As outras fraturas com tamanhos, tipo D e E, maiores que a janela da imagem, não foram representados no boxplot.

Figura 68 – Boxplot dos erros relativo das aberturas (a) e dos comprimentos (b) das fraturas.



A Tabela 1 mostra os comprimentos das fraturas dado um ângulo que as define como da mesma família. A angulação de $\theta = 45^\circ$, foi definida, pois apenas duas famílias são mostradas na Figura 57. Todos os comprimentos pertencem à mesma família 1, as outras fraturas da família 2 têm suas dimensões além da janela da imagem, por isso não foram mostradas na Tabela 2.

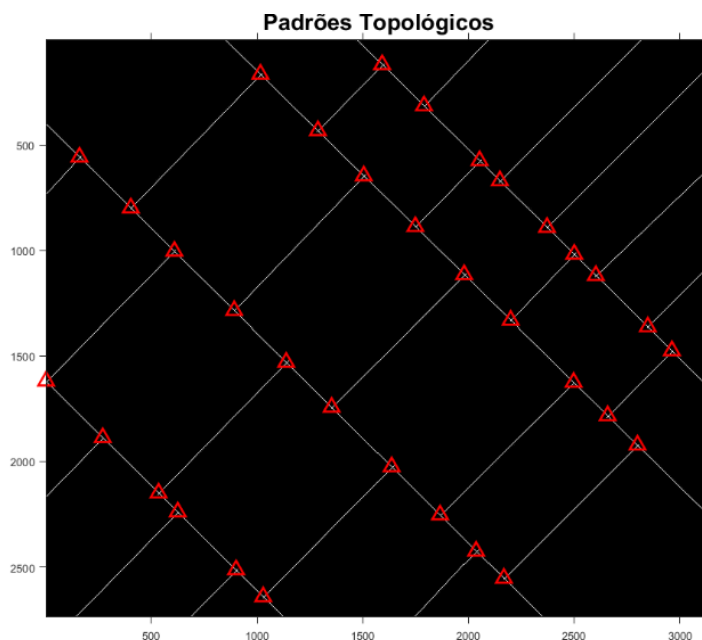
Tabela 1 – Separação das famílias por colunas com os comprimentos das fraturas.

Comprimento fraturas família 1 (cm)
12,79
12,85
12,72
12,82
12,79
6,43
6,49
6,46
6,43
12,50
12,56
12,46

Fonte: Autor.

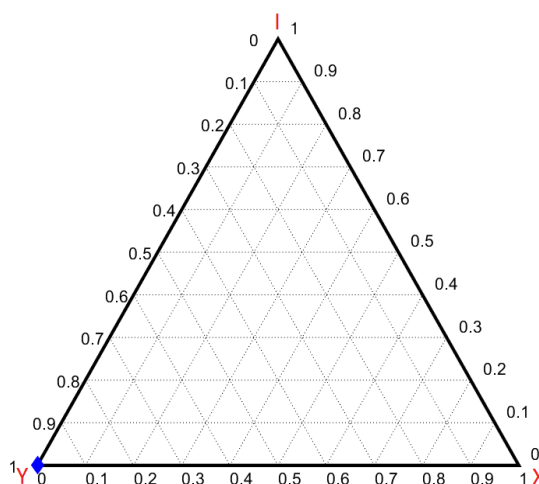
Os padrões reconhecidos pelo programa TopoScan são mostrados na Figura 69, utilizou-se a simbologia de triângulos vermelhos representam os padrões Y, todos foram identificados precisamente.

Figura 69 – Padrões topológicos, predominância Y.



Mediante os dados obtidos, construiu-se o diagrama ternário, mostrado na figura 70 indicando unicamente o padrão topológico Y. Com essa topologia de fraturas, percebe-se uma interconexão entre estas, gerando-se assim uma rede de fraturas. Neste caso, assim como para o cenário de topologia X, espera-se que a permeabilidade equivalente do meio fraturado também seja elevada em relação ao caso de topologia I.

Figura 70 – Diagrama ternário com os padrões topológicos para o padrão Y.



4.4 PADRÃO XYI

Os resultados são apresentados seguem o mesmo formato dos casos anteriores. A imagem com padrão XYI é mostrada na Figura 71. As *scanlines* que permitiram a construção dos gráficos da lei de potência das Figuras 73 a 80, são mostradas na Figura 72. Dois sets foram definidos para cada família de fraturas, G e H.

Figura 71 – Sistema fraturado simulado para validação com predominância de padrões XYI.

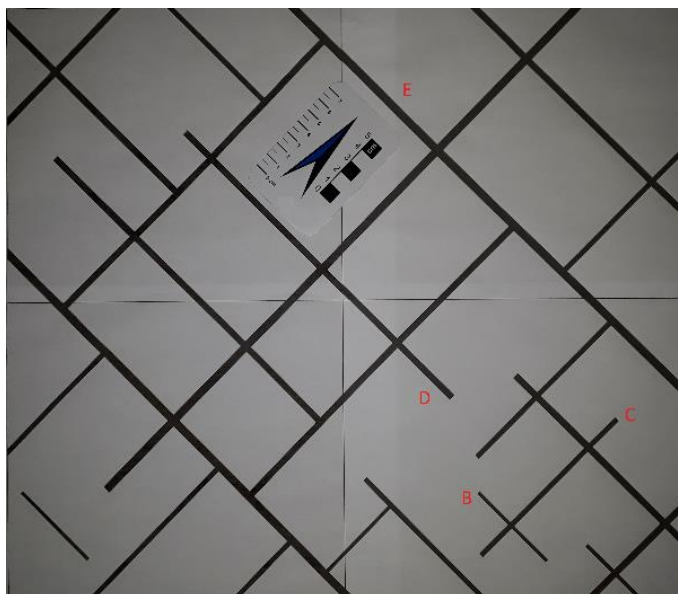


Figura 72 – Scanlines para o padrão XYI.

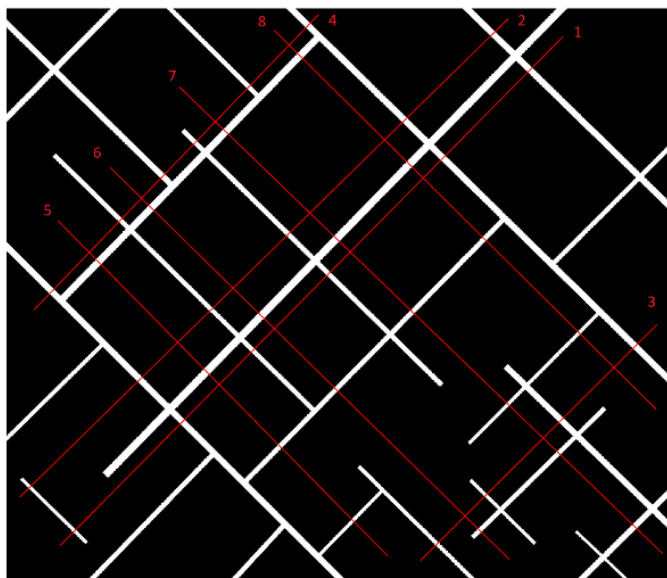


Figura 73 – Lei de potência set G, scanline 1.

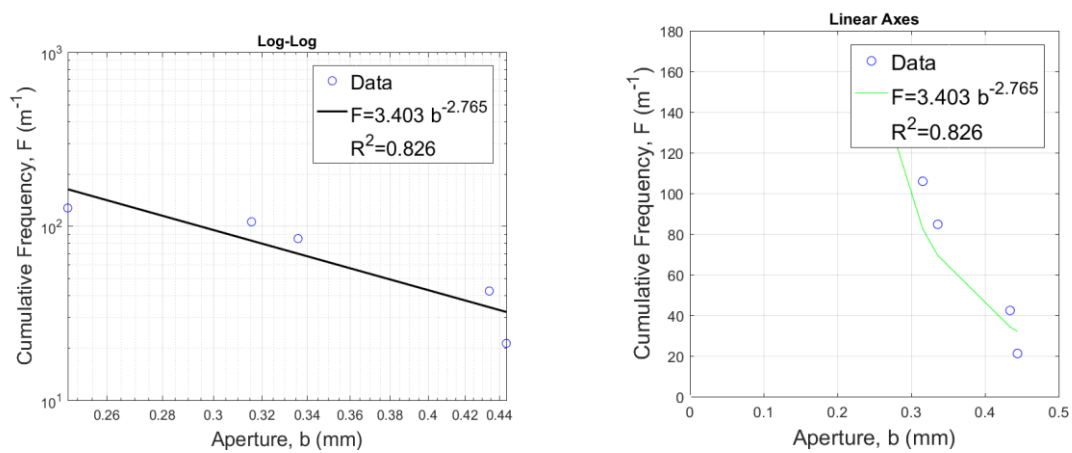


Figura 74 – Lei de potência set G, scanline 2.

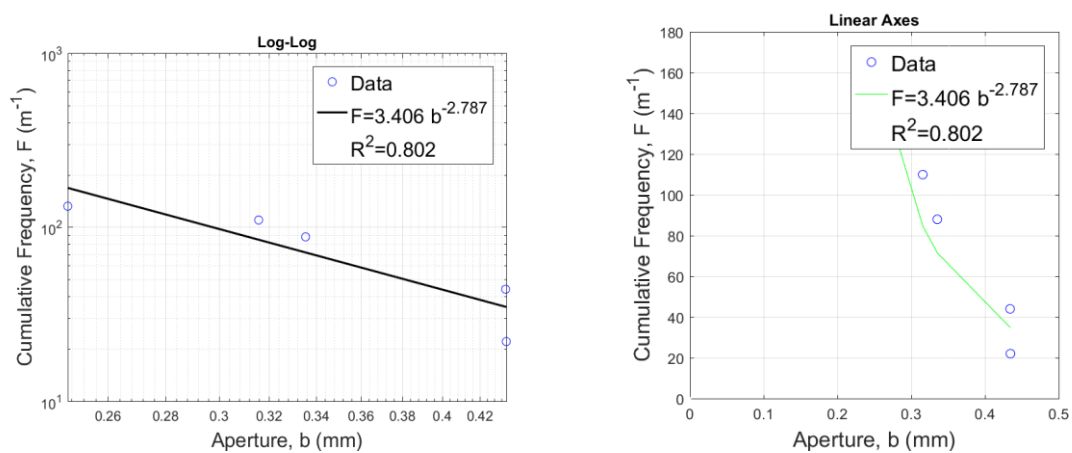


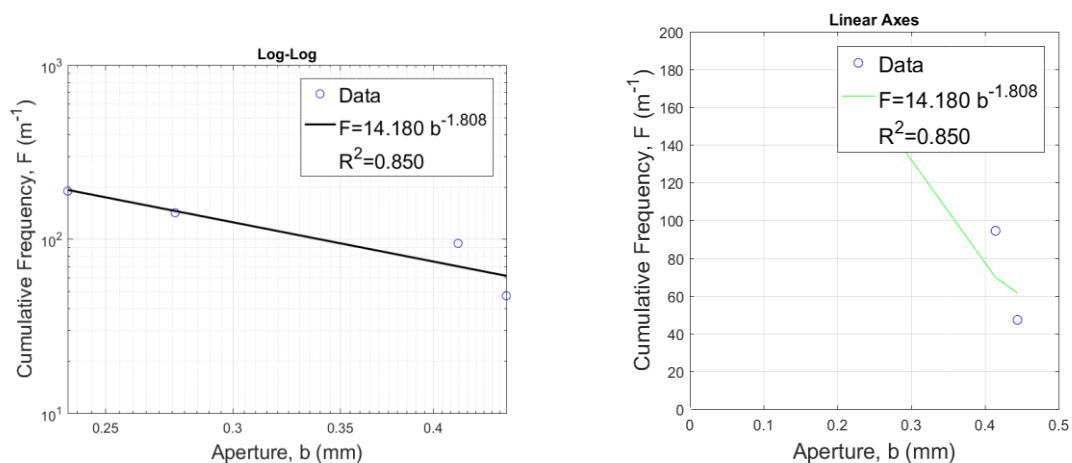
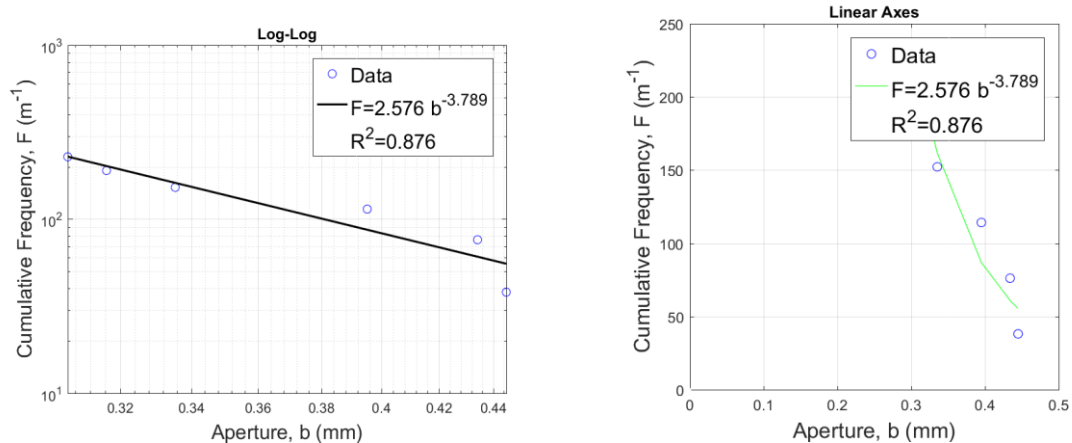
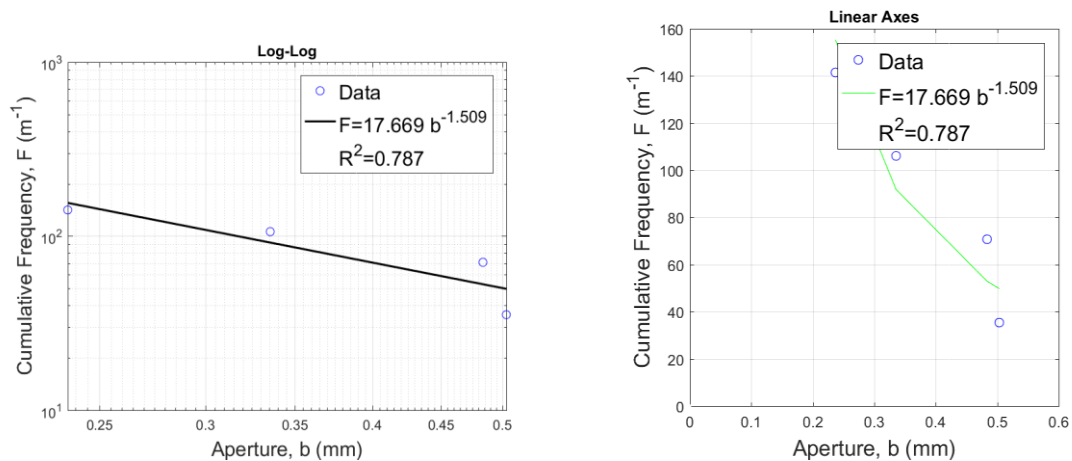
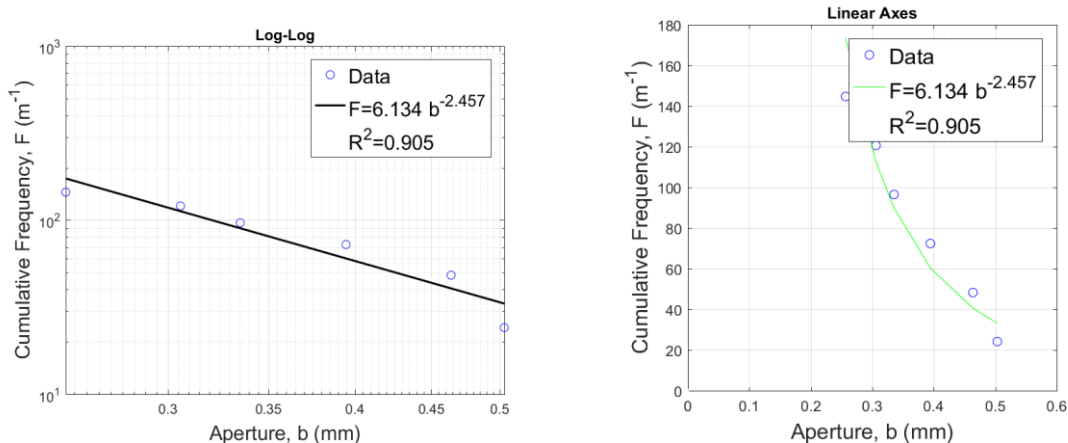
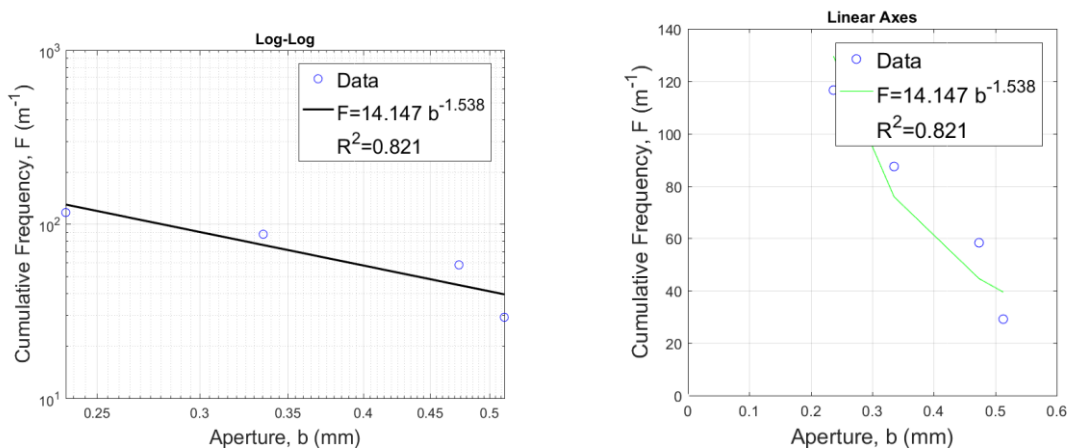
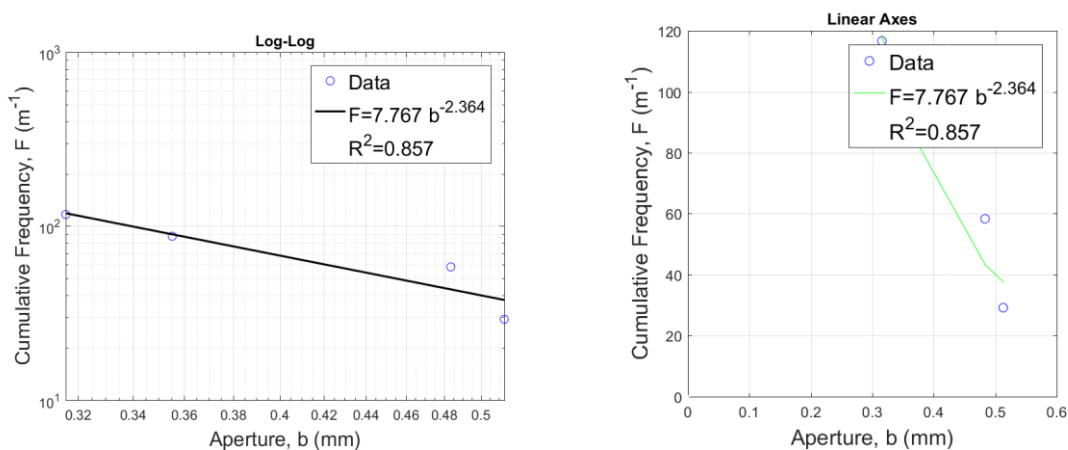
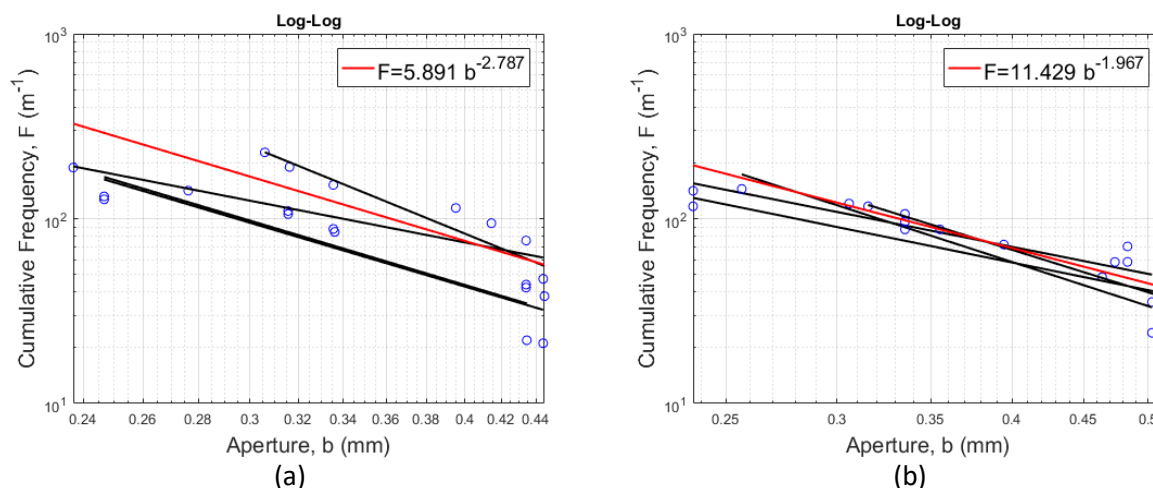
Figura 75 – Lei de potência set G, *scanline* 3.Figura 76 – Lei de potência set G, *scanline* 4.Figura 77 – Lei de potência set H, *scanline* 5.

Figura 78 – Lei de potência set H, *scanline* 6.Figura 79 – Lei de potência set H, *scanline* 7.Figura 80 – Lei de potência set H, *scanline* 8.

As constantes de proporcionalidade e os expoentes da lei de potência do mesmo set, foram utilizados para obter uma lei de potência média Figura 81 (a) e (b).

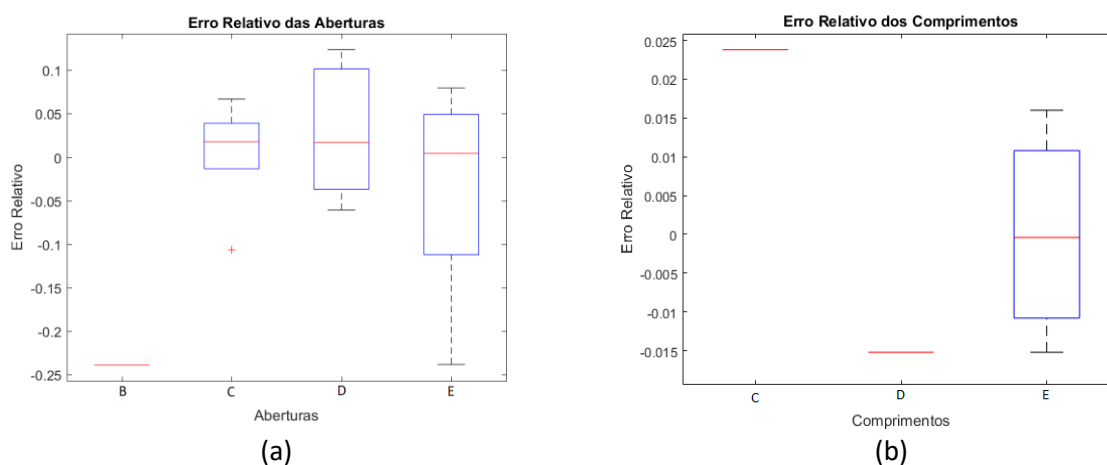
Figura 81 – Lei de potência média set G (a) e set H (b).



A Figura 82 (a) mostra o boxplot dos erros relativos das aberturas. Ocorreu a mesma problemática do caso Y, a não identificação da abertura tipo B, porém no caso I, o tipo B foi identificado. Isso mostra que o programa TopoScan foi implementado de forma correta, apenas a marcação dos pontos gerou a não identificação da abertura do tipo B. A mediana das abertura tipo C e D estão em torno de 2 a 3%, para o tipo E a mediana tem um valor maior, cerca de 10%.

Para a Figura 82 (b), a dispersão para a fratura do tipo E, parece ser grande, mas a escala comprova que o primeiro quartil, tem valor pequeno, cerca de -1% da mesma forma o terceiro quartil é 1%. Todas as medianas para os comprimentos são bem menores que as das aberturas.

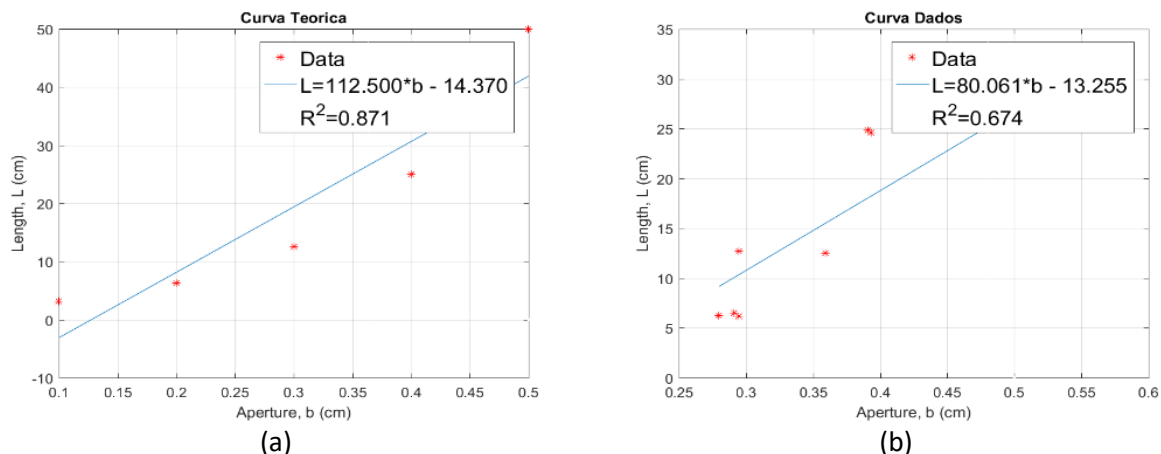
Figura 82 – Boxplot dos erros relativo das aberturas (a) e do comprimento (b) das fraturas.



A Figura 83 (a) mostra os cinco pontos das aberturas e comprimento das fraturas criadas para construção dos casos, com o respectivo ajuste linear. Os dados obtidos pelo programa

TopoScan, comprimento e abertura, também foram plotados e aplicado o ajuste linear, Figura 83 (b).

Figura 83 – Curva teoria (a) e curva com os dados reais (b) da abertura x comprimento das fraturas.



Com o ângulo que foi definido pelo usuário, $\theta = 45^\circ$, o programa TopoScan identificou duas famílias de fraturas ($N_f = 2$), a partir da equação (1.1), e as separou na Tabela 2 que contém os comprimentos das fraturas de acordo com as famílias.

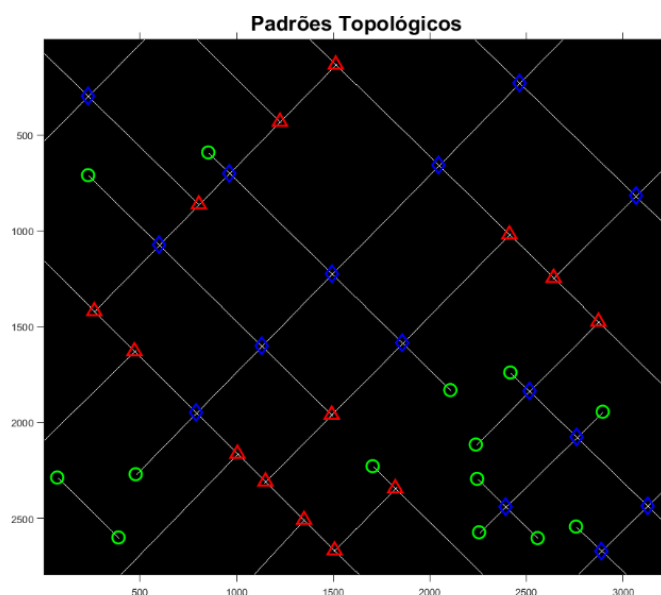
Tabela 2 – Separação das famílias por colunas com os comprimentos das fraturas.

Comprimento fraturas família 1 (cm)	Comprimento fraturas família 2 (cm)
25,38	24,60
12,53	24,86
12,69	6,22
25,16	6,15
6,48	-

Fonte: Autor.

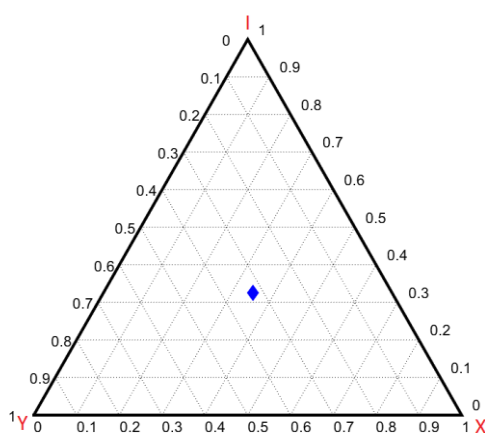
Nos casos anteriores havia apenas um padrão, pois foram construídos para terem dominância de padrão I, X e Y. Já esse caso XYI foi construído para ter elementos iguais dos três padrões. A Figura 84 mostra os padrões topológicos identificados pelo programa TopoScan, a simbologia segue os padrões dos casos anteriores círculos verdes para I, triângulos vermelhos para Y e diamante azul para X.

Figura 84 – Padrões topológicos, com número de padrões iguais.



Os padrões encontrados na imagem 84 foram contabilizados e normalizados pelo programa TopoScan com as equações (1.2) a (1.4) e obtido $X = 0,3488$, $Y = 0,3256$ e $I = 0,3256$. Esses valores foram utilizados para a construção do diagrama ternário, Figura 85. Esse diagrama possibilita identificar que na região estudada há aproximadamente iguais padrões de X, Y e I, ou seja, permite teorizar que para esse padrão a permeabilidade equivalente está entre as permeabilidades dos padrões X e I.

Figura 85 – Diagrama ternário com número iguais de padrões X, Y e I.



5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A partir das informações obtidas pelo programa TopoScan das imagens das Figuras 28, 43, 57 e 71, foram construídas quatro malhas de elementos finitos para simulação de fluxo de fluido em meios fraturados utilizando o programa CODE_BRIGHT com a formulação matemática descrita na seção 3. Nesta etapa para cada padrão topológico I, X, Y e XYI foi obtida a permeabilidade equivalente do meio considerando a vazão calculada ao final da simulação, no regime estacionário.

Para todos os casos foi calculado a medida de intensidade de faturamento P22 que consiste em uma medida geológica dada pela divisão de área das fraturas pela área total de análise. Buscou-se a construção dos padrões (I, X, Y e XYI) com o P22 aproximadamente iguais entre si, para possibilitar identificar a relação entre a topologia das fraturas e permeabilidade equivalente do meio fraturado, de forma igualitária. Desta forma, permite-se a comparação entre as diferentes configurações topológicas quanto ao fluxo de fluido e permeabilidade equivalente obtida.

De forma geral a intensidade de faturamento representa a relação entre o número identificado ou segmentos ou área de fraturas pela medida linear, área ou volume de uma dada scanline (Miranda, 2015). A Figura 86 mostra as diversas variações possíveis para a intensidade de faturamento.

Figura 86 – Nomenclatura da intensidade de faturamento.

		<i>Dimensão da Fratura</i>			
		0	1	2	3
<i>Dimensão da região de amostragem</i>		Número	Comprimento	Área	Volume
	1	P_{10}	P_{11}		
	2	P_{20}	P_{21}	P_{22}	
	3	P_{30}		P_{32}	P_{33}

Fonte: (Dershovitz & Herda, 1992)

As malhas foram construídas com um *script* em MATLAB que carrega as coordenadas de cada fratura (terminações) e as aberturas, obtidas pelo TopoScan. As aberturas são utilizadas para obter a permeabilidade das fraturas.

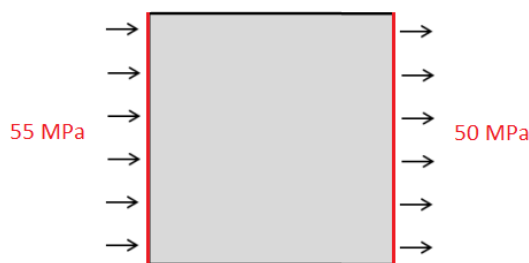
A matriz foi considerada isotrópica e de baixa permeabilidade. Já para a fratura, sua permeabilidade intrínseca pode ser determinada por diferentes modelos relacionados com a rugosidade das suas paredes e até grau e material de preenchimento. Neste trabalho admitiu-se a equação para cálculo da permeabilidade da fratura considerando placas planas (paredes sem rugosidade), através da equação proposta em (Bear, 1988).

$$K = \frac{h^2}{12} \quad (5.1)$$

onde h é abertura das fraturas em m e κ é a permeabilidade em m^2 .

O problema hidráulico analisado consistiu na injeção de água na face esquerda e produção na face direita do domínio, com as pressões de 55 e 50 MPa, respectivamente, conforme mostrado na Figura 87. A pressão inicial do meio foi de 50 MPa. As dimensões das malhas dependem do tamanho da imagem como também do auto ajuste das fraturas mais externas.

Figura 87 – Condições de contorno horizontal.



Fonte: Autor.

Para todos os padrões também foi imposta uma outra condição de contorno com injeção na parte superior e produção na parte inferior, com pressões de 55 e 50 Mpa respectivamente, e pressão inicial de 50 MPa, como mostrado na Figura 88. Essa condição foi utilizada para obter a permeabilidade equivalente no sentido vertical, identificando se havia anisotropia nos padrões topológicos.

Figura 88 – Condições de contorno vertical.



Fonte: Autor.

Todos os casos também foram simulados com as condições de contorno horizontal, utilizando as aberturas das fraturas definidas na construção dos padrões topológicos, e obtida a permeabilidade equivalente real. Essa permeabilidade permite calcular o erro relativo causado pelas aberturas encontradas no TopoScan.

A compressibilidade do fluido para todos os casos foi $4,5 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$. Para os padrões (I, X, Y e XYI) é mostrado na Tabela 3, os parâmetros da matriz que foram utilizadas na simulação.

Tabela 3 – Propriedades dos materiais.

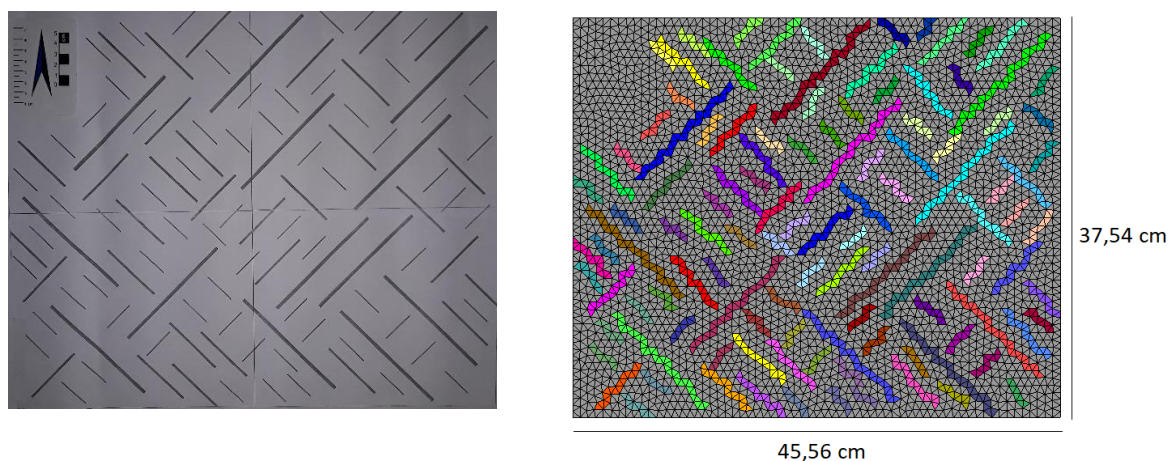
Parâmetros	Valores
Permeabilidade intrínseca da matriz (m^2)	$1,0 \times 10^{-16}$
Porosidade da matriz	0,0758

Fonte: Autor.

5.1 PADRÃO I

A Figura 89 mostra a malha com 3455 nós e 6652 elementos, e os parâmetros da matriz rochosa utilizados na simulação são mostrados na Tabela 3. As permeabilidades das fraturas foram obtidas a partir das aberturas, conforme a equação (5.1). Para este padrão foi calculado a partir do TopoScan o $P_{22} = 9,05\%$.

Figura 89 – Malha de elementos finitos triangulares com predominância do padrão topológico I.



A Figura 90 mostra a evolução da distribuição de pressão de líquido para três tempos distintos ao longo da simulação para a condição de contorno horizontal, e a Figura 91 mostra o mesmo que a Figura 90 porém para condição de contorno vertical.

É perceptível nas Figuras 90 e 91 que há descontinuidades em relação a distribuição de pressão devido às fraturas permitirem que o fluido escoe de forma mais rápida, em relação a matriz, por serem o caminho preferencial de fluxo.

Figura 90 – Evolução da pressão do líquido, caso I com condição de contorno horizontal.

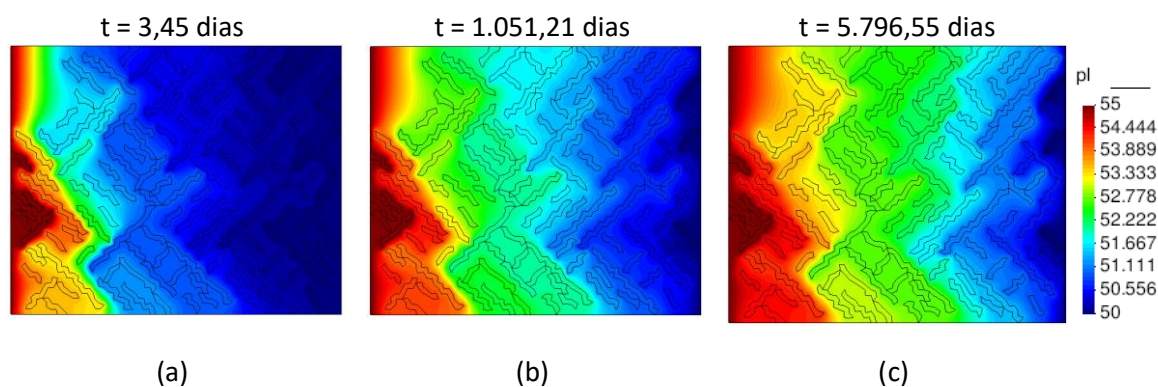
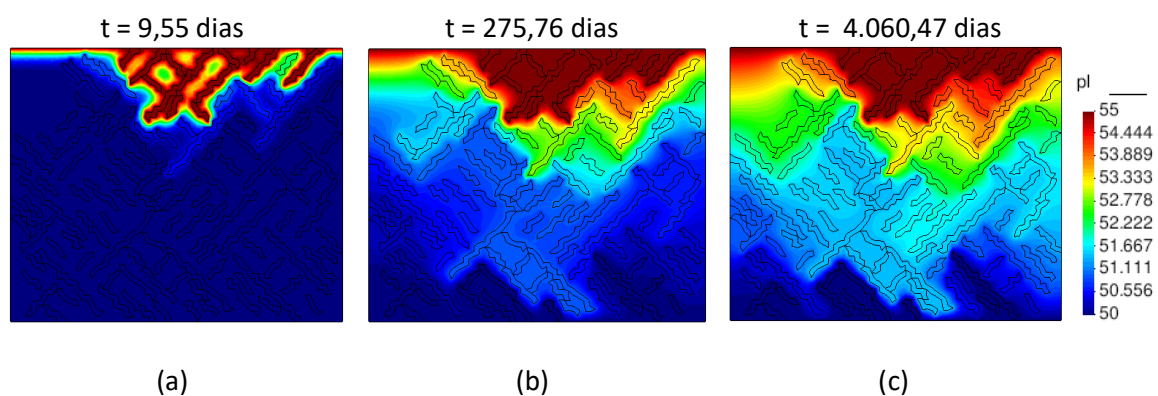


Figura 91 – Evolução da pressão do líquido, caso I com condição de contorno vertical.



A Figura 92 (a) mostra os vetores de fluxo no estado estacionário para a condição de contorno horizontal e a Figura 93 (a) também mostra o fluxo para o estado estacionário porém com a condição de contorno vertical. Uma parte da Figura 92 (a) é mostrada em destaque na Figura 92 (b) e da mesma forma para a Figura 93, a qual se vê o comportamento das vetores de fluxo, buscando o caminho de maior permeabilidade que são as fraturas.

Figura 92 – Vetores de fluxo para $t = 5.796,55$ dias, condição de contorno vertical.

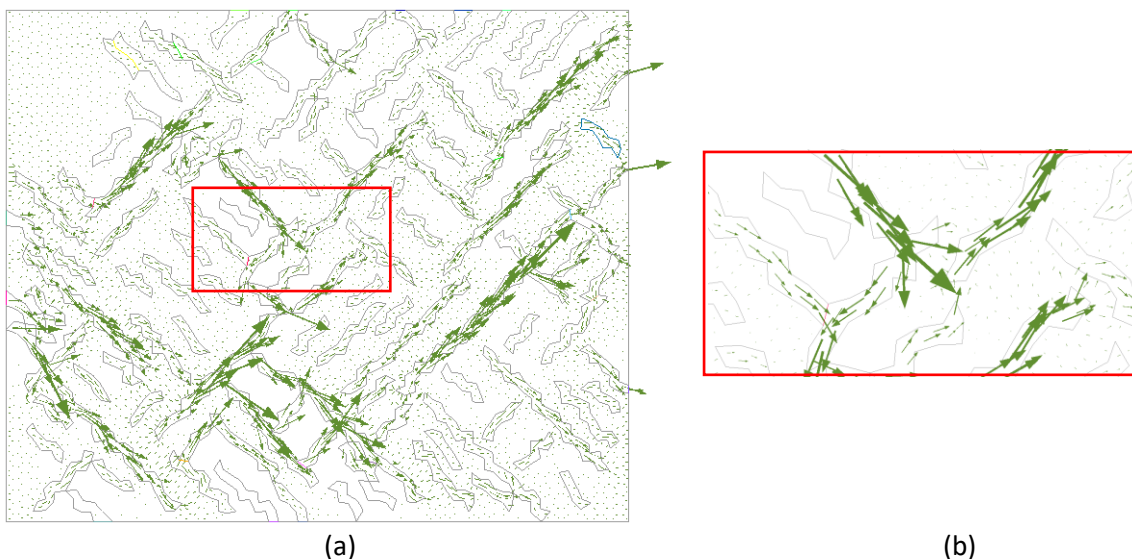
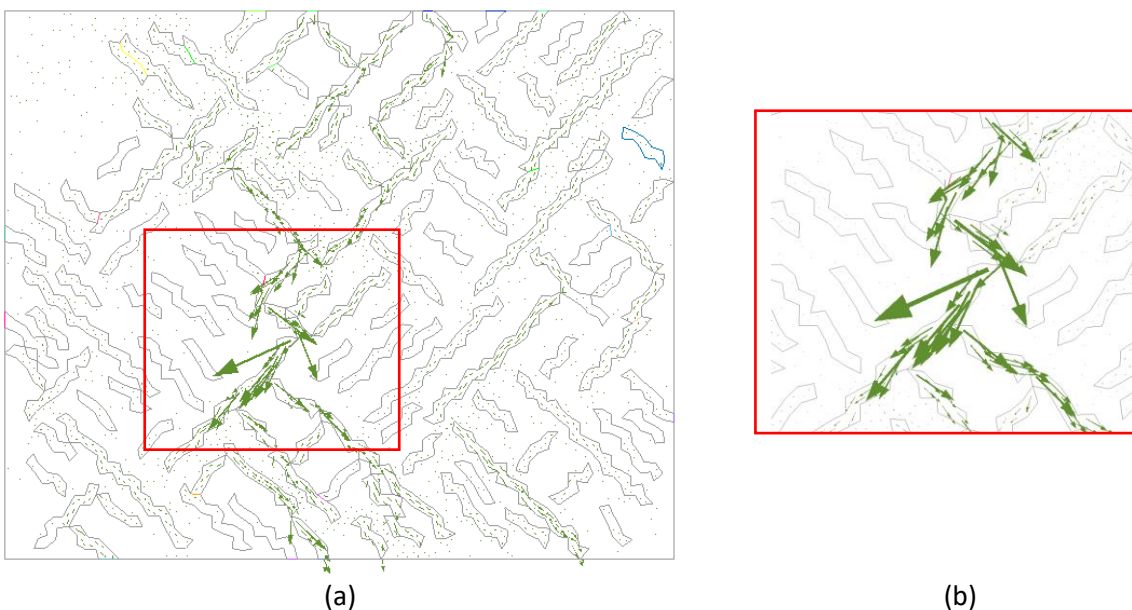


Figura 93 – Vetores de fluxo para $t = 4.060,47$ dias, condição de contorno vertical.



Para o padrão I, fraturas isoladas, com a condição de contorno horizontal, a permeabilidade equivalente obtida a partir da simulação foi de $4,55 \times 10^{-15} m^2$, sendo essa

mais próxima da permeabilidade da matriz (10^{-16}) do que das permeabilidade das fraturas ($\sim 10^{-12}$ a 10^{-13}) em virtude da configuração das fraturas sem conexão. Isto mostra a importância da formação de uma rede de fraturas sobre o regime de fluxo. Mesmo havendo muitas fraturas no meio, a permeabilidade global não será necessariamente alta dependendo diretamente também do grau de interconexão destas.

Para a condição de contorno vertical, a partir da simulação, foi obtida a permeabilidade equivalente de $1,16 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, mostrando um valor maior ao obtido para a condição de fluxo horizontal. Isso mostra que o padrão I é anisotrópico para a permeabilidade equivalente.

A terceira simulação considerou as condições de contorno horizontal e as aberturas reais dos tipos de fraturas utilizados para a construção dos padrões topológicos, para obtenção da permeabilidade real e identificação do erro relativo entre a permeabilidade obtida com as aberturas encontrada pelo TopoScan.

Define-se aqui como aberturas reais aquelas empregadas na construção do modelo que consistem nas larguras dos retângulos que representam as fraturas. A diferença para o valor de aberturas usadas nos modelos anteriormente apresentados é que estes adotaram as aberturas medidas via programa TopoScan.

Portanto, dada a simulação numérica, a permeabilidade equivalente encontrada a partir da simulação com as aberturas reais foi de $4,55 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, mostrando que o erro relativo é 0%, considerando duas casas decimais.

A Figura 94 (a) mostra três pontos distintos ao longo da malha escolhidos para estudo da evolução da pressão. As curvas evolutivas são mostradas na Figura 94 (b). No ponto 1, face esquerda, onde ocorreu a injeção de fluido, houve um aumento de pressão abruptamente (curva vermelha). Isso ocorreu devido ao ponto estar muito próximo da face injetora e de uma fratura. Contudo, no ponto 2, centro do domínio, a pressão tem sua evolução (curva preta) muito lenta até atingir o estado estacionário, pois não havia um caminho que facilitasse a passagem do fluido entre as faces de injeção e recuperação. O fluido se deslocou de forma lenta pela matriz de baixa permeabilidade. No ponto 3, face esquerda onde ocorreu a recuperação do fluido (curva azul), a pressão aumenta e se estabiliza de forma mais rápida do que a do ponto 2.

O mesmo comportamento descrito, aconteceu para a Figura 95 onde foi escolhido três pontos ao longo da malha para construção do gráfico da evolução de pressão com a condição de contorno vertical.

Figura 94 – Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão I, condição de contorno horizontal.

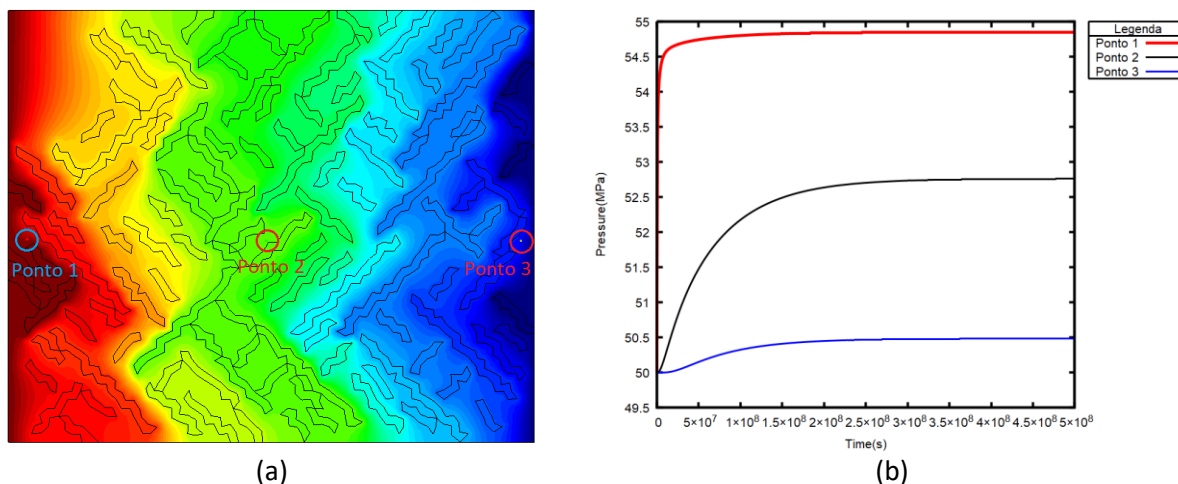
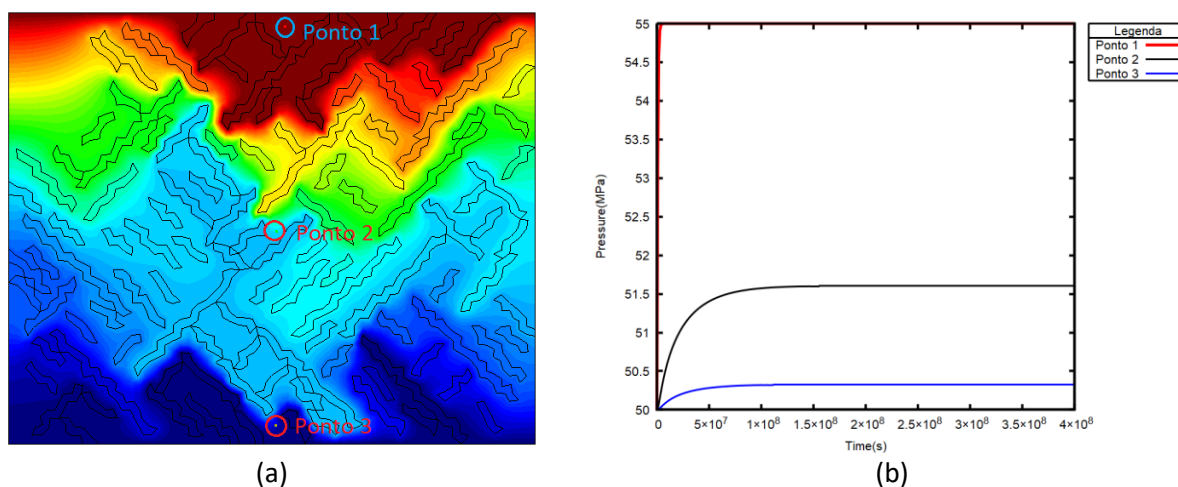


Figura 95 – Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão I, condição de contorno vertical.



A Figura 96 (a) mostra a escolha de outros dois pontos na malha para construção do gráfico da evolução da pressão por tempo Figura 96 (b) com a condição de contorno horizontal. Nesse caso foi escolhido um ponto na matriz e outro na fratura para uma região da faixa central do domínio. Observa-se que a pressão é maior na fratura, porém, as curvas de evolução da pressão na fratura e na matriz têm mesmo comportamento, porque não há um caminho de interligação entre as fraturas da face de injeção e recuperação, que permita a passagem de fluido de forma facilitada.

A Figura 96 mostra da mesma forma que a Figura 97 dois pontos definidos para análise da evolução da pressão, um desses na fratura e outro fora da fratura, porém com condição de contorno vertical. Devido a descontinuidade causada pelas fraturas a pressão no ponto 4 é maior que a do ponto 5, porém as duas curvas seguem o mesmo comportamento.

Figura 96 – Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão I, condição de contorno horizontal.

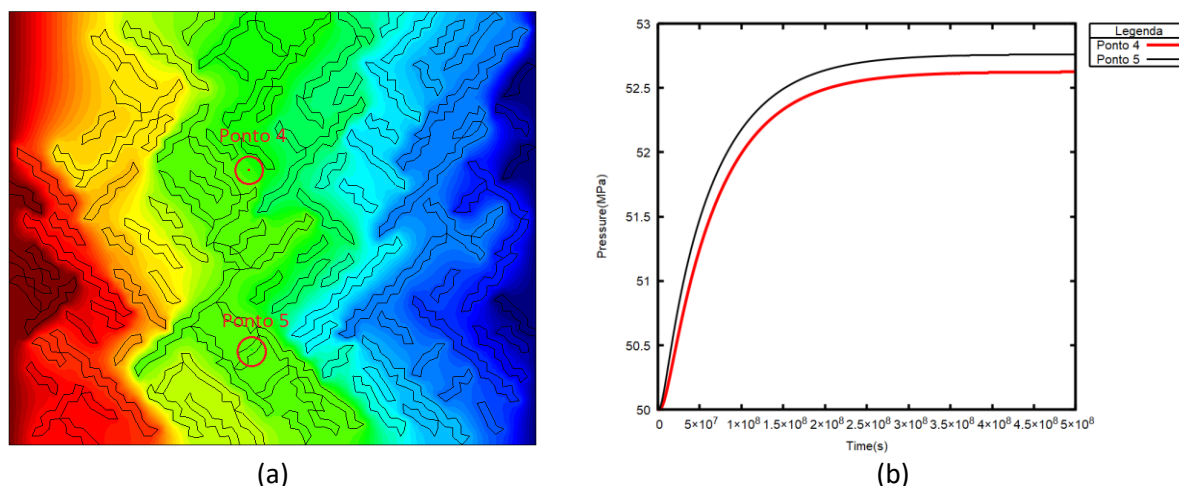
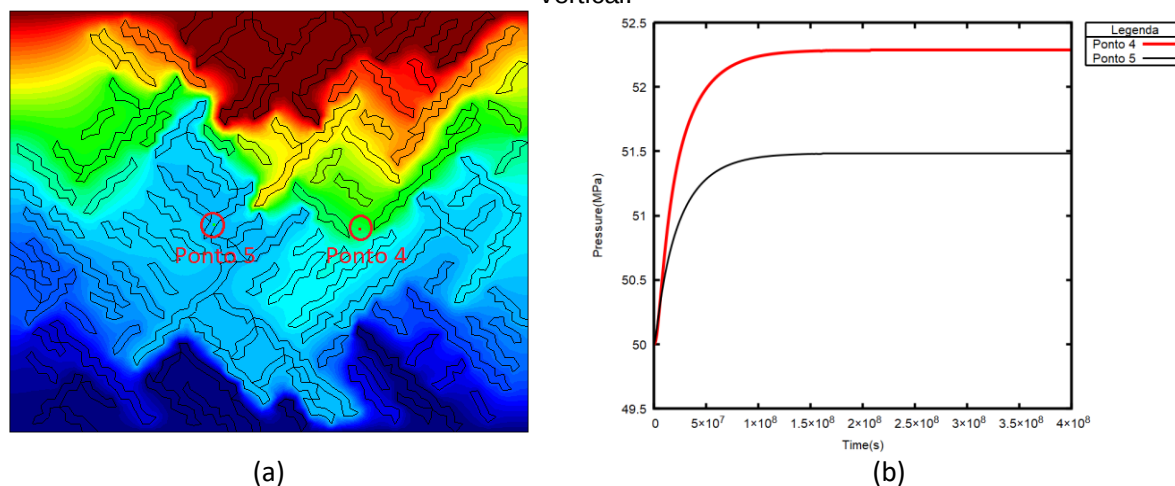


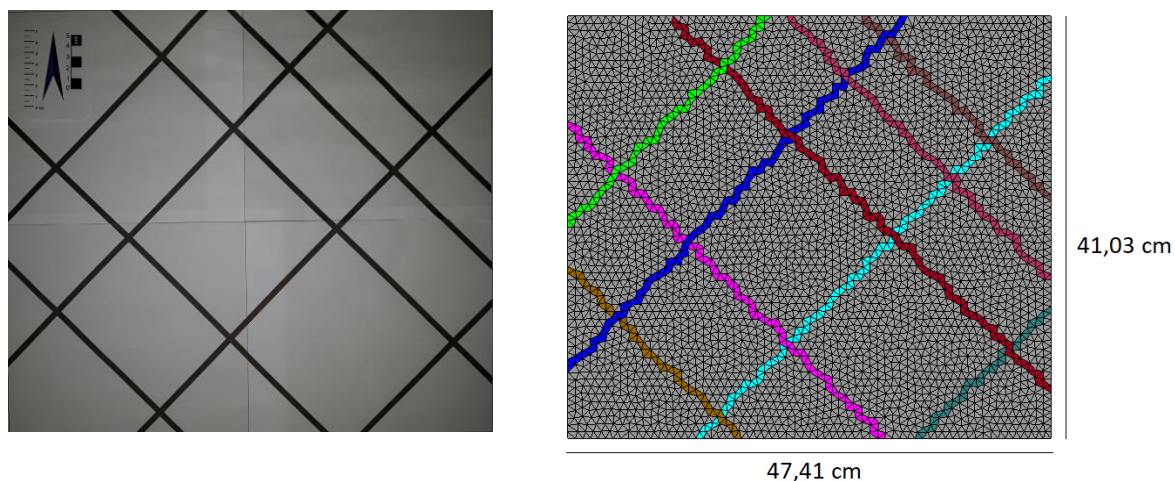
Figura 97 – Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão I, condição de contorno vertical.



5.2 PADRÃO X

Para o padrão X, a malha mostrada na Figura 98 foi construída com 3701 nós e 7144 elementos, os parâmetros da matriz foram os mesmos do caso anterior e a permeabilidade das fraturas também foi calculada a partir das aberturas, pela equação (5.1). Para este padrão foi obtido pelo TopoScan o $P_{22} = 9,10\%$.

Figura 98 – Malha com predominância padrão topológico X.



As Figura 99 e 100 mostram a distribuição de pressão para três tempos distintos da simulação, com a condição de contorno horizontal e vertical respectivamente. Na Figura 99 (a) e 100 (b) há um salto da pressão quando o fluido encontra as fraturas, pois essas permitem o escoamento de forma mais rápida em relação a matriz. O campo de pressão se mostrou completamente diferente do caso anterior.

Figura 99 – Evolução da pressão do líquido, caso X com condição de contorno horizontal.

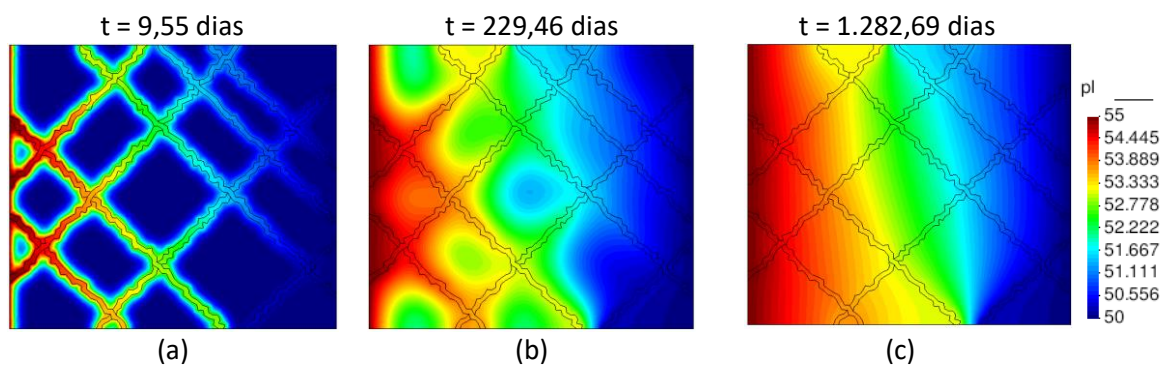
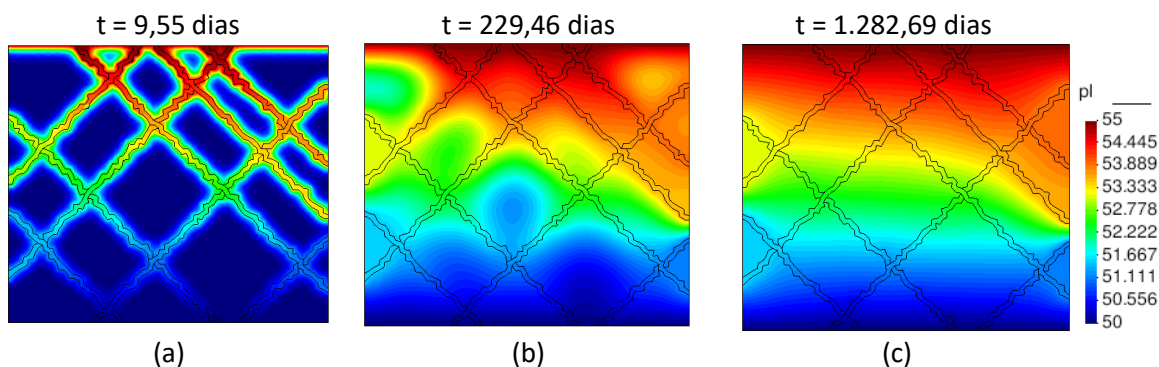


Figura 100 – Evolução da pressão do líquido, caso X com condição de contorno vertical.



As Figuras 101 e 102 mostram os vetores de fluxo para o estado estacionário para as condições de contorno horizontal e vertical respectivamente. Na Figura 101 (b) e 102 (b) fica perceptível que o fluxo se deu no caminho com maior permeabilidade. Neste caso como as fraturas estavam conectadas no padrão X, formaram uma rede de fraturas que permitiu a criação de um caminho de fluxo.

Figura 101 – Vetores de fluxo para $t = 1.282,69$ dias com condição de contorno horizontal.

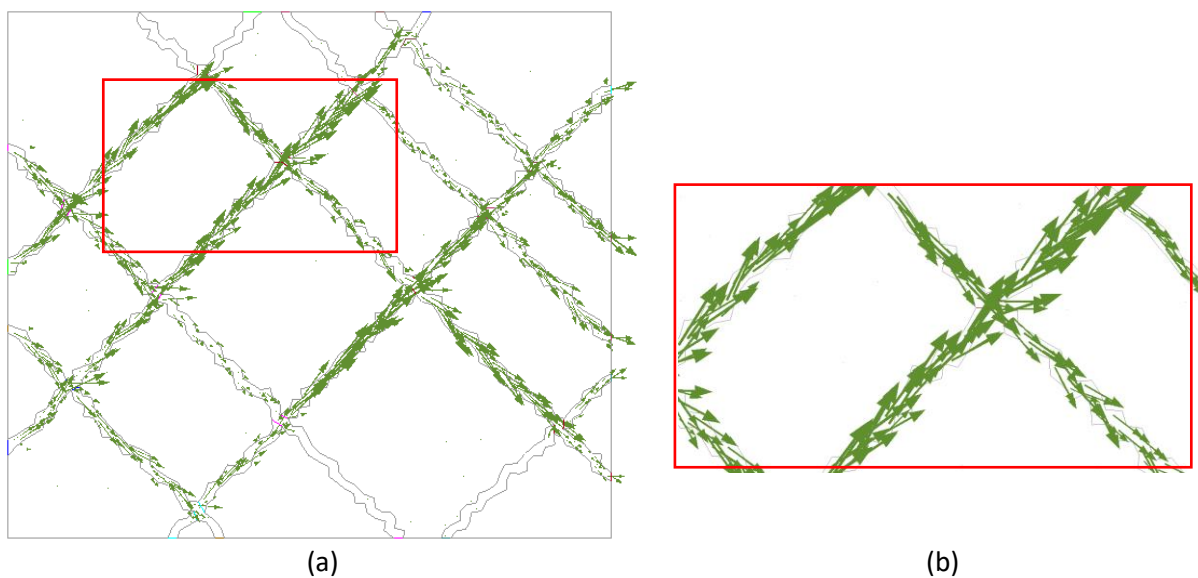
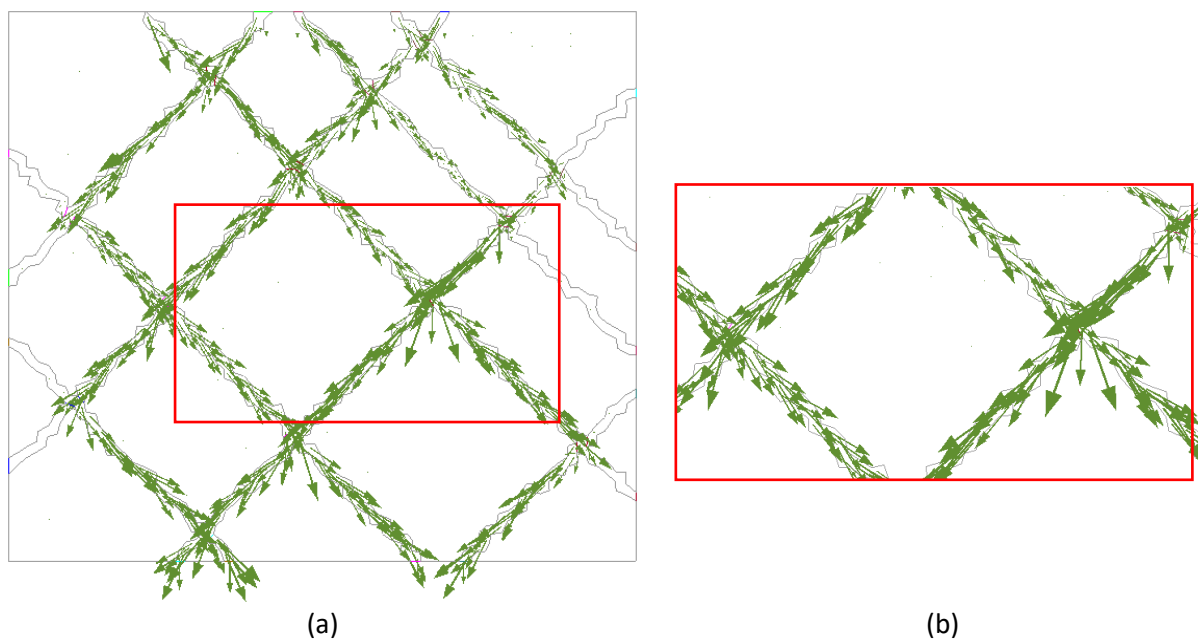


Figura 102 – Vetores de fluxo para $t = 1.282,69$ dias com condição de contorno vertical.



A permeabilidade equivalente para as condição de contorno horizontal obtida pela simulação foi de $7,42 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ para o padrão X, que é um valor mais próximo ao da

permeabilidade das fraturas, que tem ordem de grandeza de 10^{-12} a 10^{-13} . Logo, verificou-se que para fraturas conectadas no padrão X a permeabilidade equivalente é dominada pela permeabilidade das fraturas.

Para a condição de contorno vertical, a partir da simulação foi obtida a permeabilidade equivalente de $9,66 \times 10^{-13} \text{ m}^2$. Isso mostra que o padrão X é anisotrópico para a permeabilidade equivalente. Na simulação com as aberturas reais a permeabilidade obtida foi de $7,42 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, a mesma obtida pelas aberturas encontrada pelo TopoScan. Desta forma, o erro relativo foi de 0%.

As Figuras 103 e 104 mostram a evolução temporal da pressão em três pontos distintos ao longo da malha, com condições de contorno horizontal e vertical respectivamente. Para as duas Figuras 103 (b) e 104 (b) na face esquerda, ponto 1, onde ocorre a injeção de fluido, percebe-se no gráfico um rápido aumento da pressão, destacando que esse ponto está bem próximo de uma fratura e há um salto no deslocamento do fluido nesta direção, em relação a outras regiões. No ponto 2 (curva preta), localizado no centro da malha, a pressão demora para chegar ao estado estacionário, porém é um tempo menor que o do padrão I.

O estado estacionário do padrão I foi bem maior que para o padrão X. O tempo de estabilização do padrão I bem maior que o do padrão X o que evidencia a importância da rede de fraturas para a velocidade de deslocamento do fluido. No ponto 3, face direita, o estado estacionário também foi praticamente instantâneo. Observa-se que nesse ponto não houve influência do campo de pressão pela matriz rochosa já que o fluxo se deu de forma dominante pela rede de fraturas.

Figura 103 – Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão X com condição de contorno horizontal.

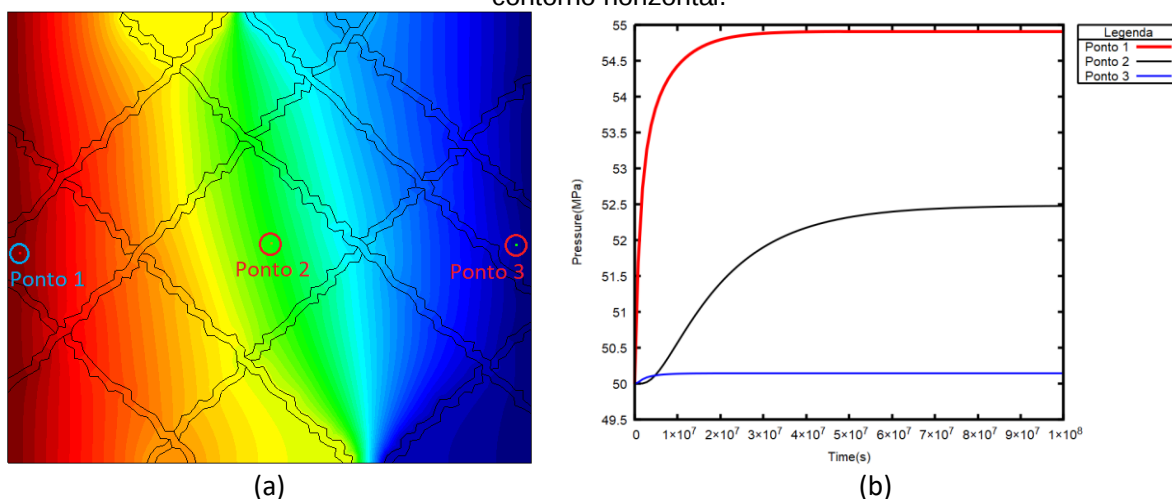
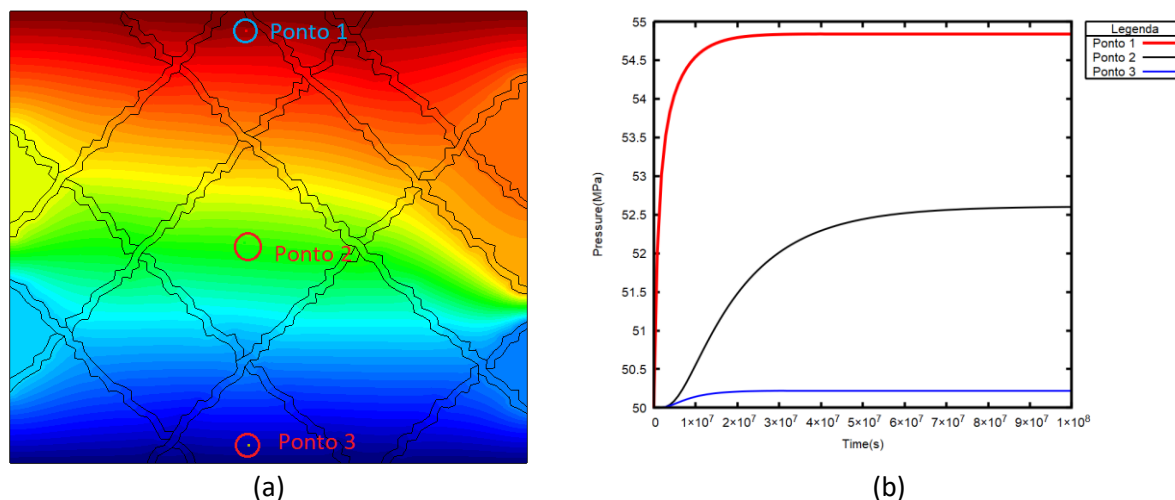


Figura 104 – Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão X com condição de contorno vertical.



As Figuras 105 (a) e 106 (a) mostra a marcação de dois pontos na malha para plotagem do gráfico da evolução da pressão por tempo Figura 105 (b) e 106 (b). Foram escolhidos dois pontos, um ponto na matriz e outro na fratura, ficando claro que a evolução da pressão na fratura é bem mais rápida que a da matriz, pois o fluido encontra um caminho preferencial todo interconectado dado a partir do padrão X. Pode-se perceber também que há deslocamento de fluido na matriz rochosa, uma vez que a pressão no ponto 2 (curva preta) sofre aumento. Porém a velocidade de deslocamento é bem menor que a observada na fratura.

Figura 105 – Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão X com condição de contorno horizontal.

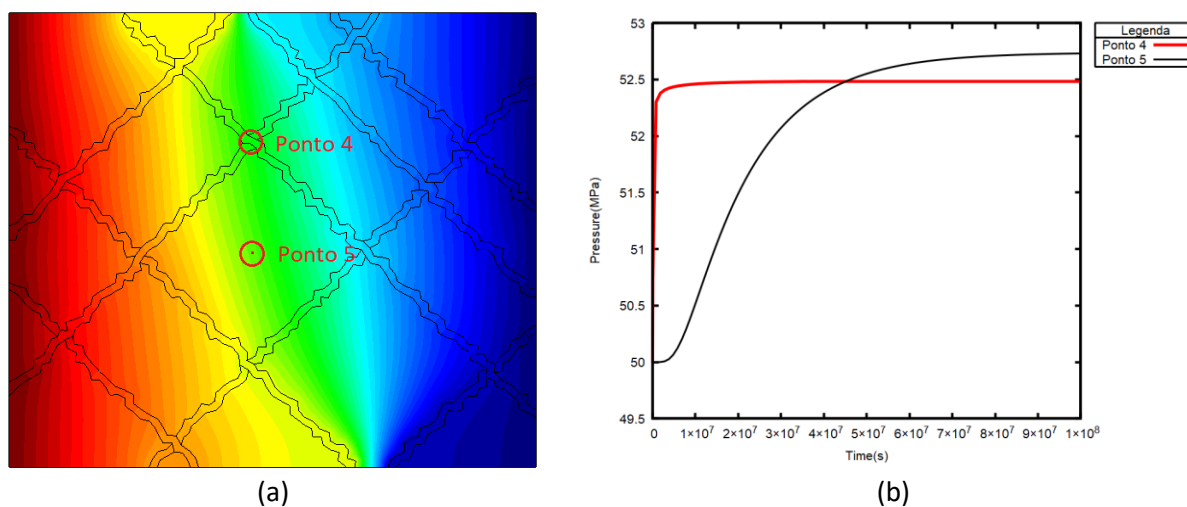
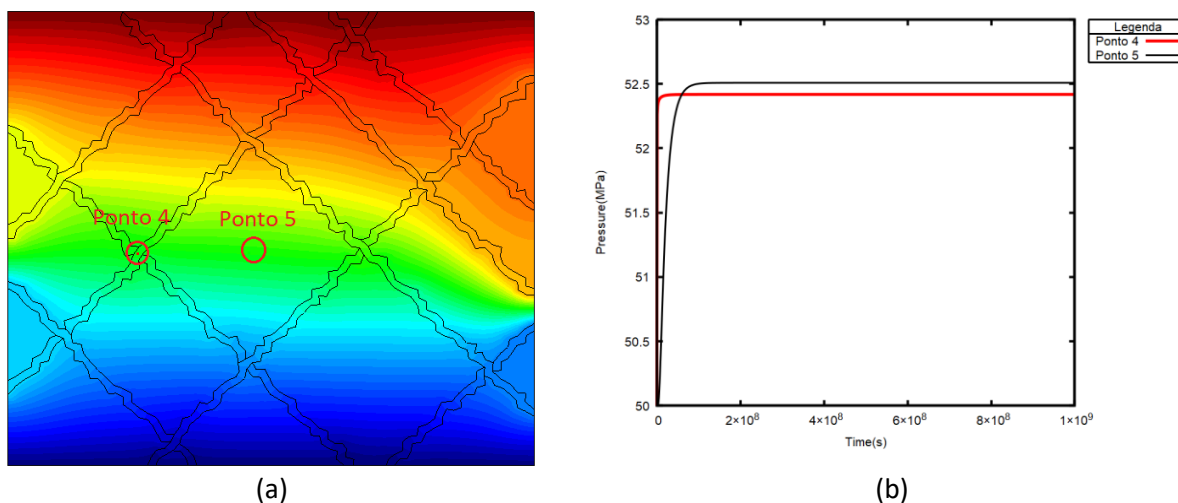


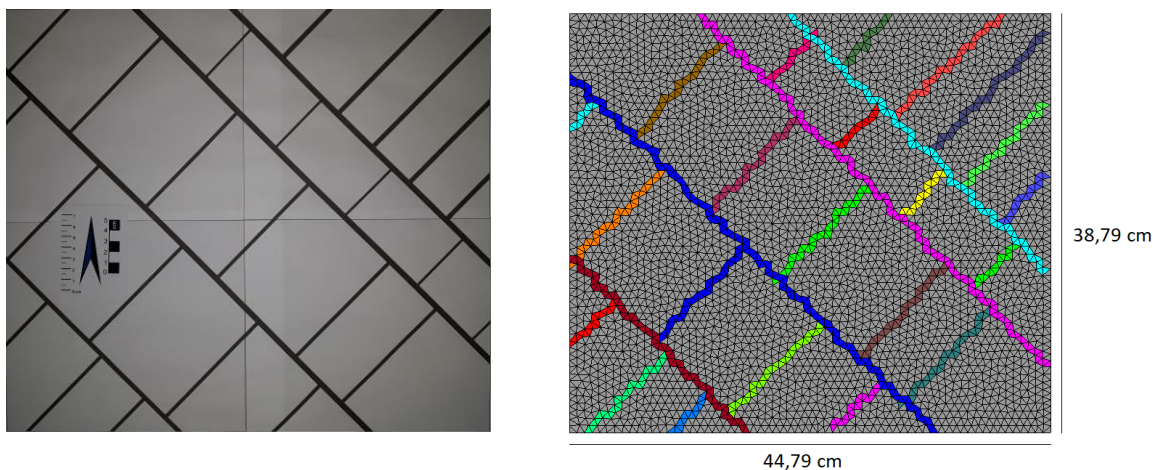
Figura 106 – Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão X com condição de contorno vertical.



5.3 PADRÃO Y

Para o padrão Y foi construída uma malha com 3702 nós e 7146 elementos, Figura 107, as propriedades da matriz de rocha foram os mesmos das seções anteriores como também as permeabilidades das fraturas foram obtidas da mesma forma. Para este padrão também foi calculado a partir do TopoScan o $P_{22} = 9,21\%$.

Figura 107 – Malha com predominância do padrão topológico Y.



As Figuras 108 e 109 apresentam o campo de pressão em três instantes diferentes para as condições de contorno horizontal e vertical. Observou-se que a distribuição de pressão

apresentou reposta similar ao observado no caso do padrão X, porém de forma mais pronunciada. Isto se deve ao grau de interconexão entre as fraturas ser ainda maior.

Figura 108 – Evolução da pressão do líquido, caso Y com condição de contorno horizontal.

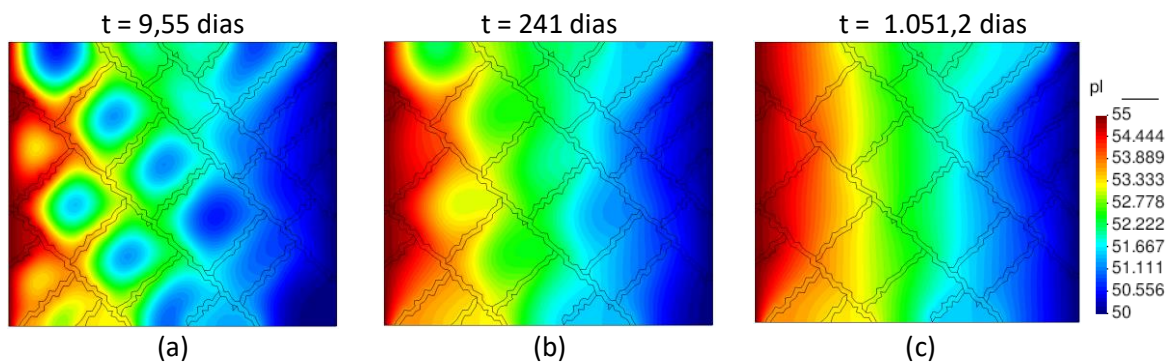
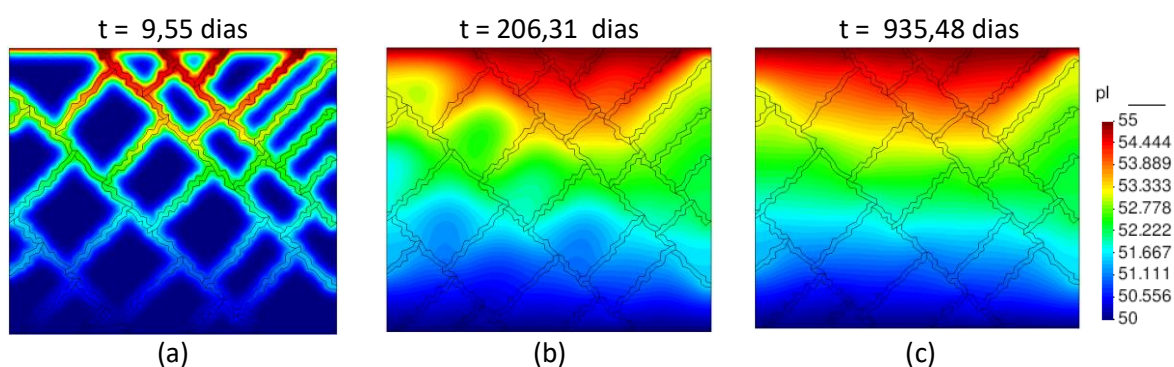


Figura 109 – Evolução da pressão do líquido, caso Y com condição de contorno vertical.



Pode-se ver os vetores de fluxo na Figura 110 e 111, considerando o estado estacionário. Como as fraturas são conectadas no padrão Y, formando uma rede, o fluido tende a se deslocar apenas pelas fraturas, da face esquerda à face direita.

Figura 110 – Vetores de fluxo para $t= 1.051,2$ dias para condição de contorno horizontal.

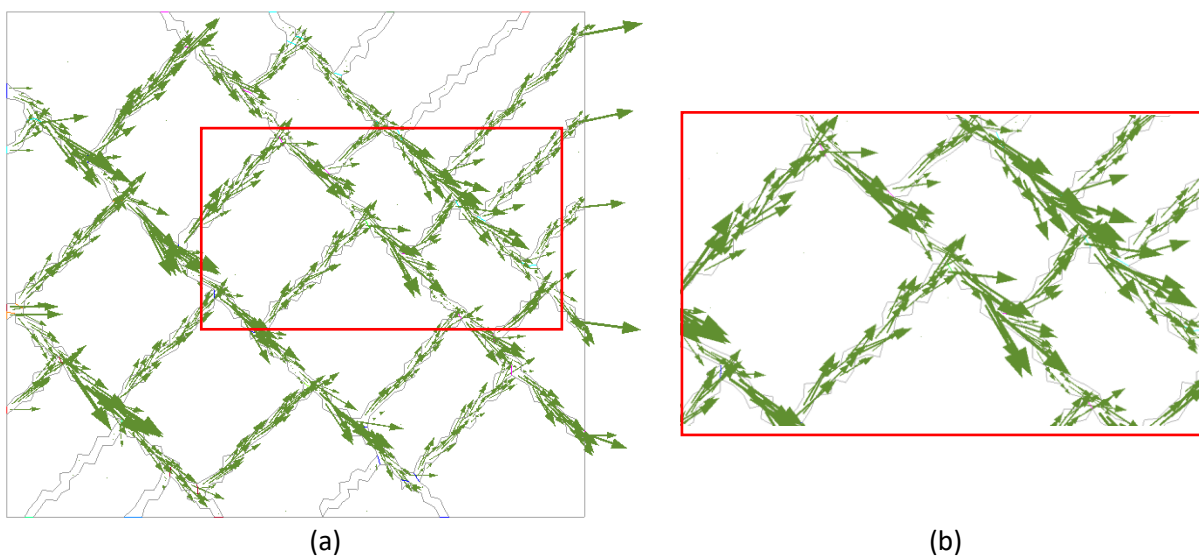
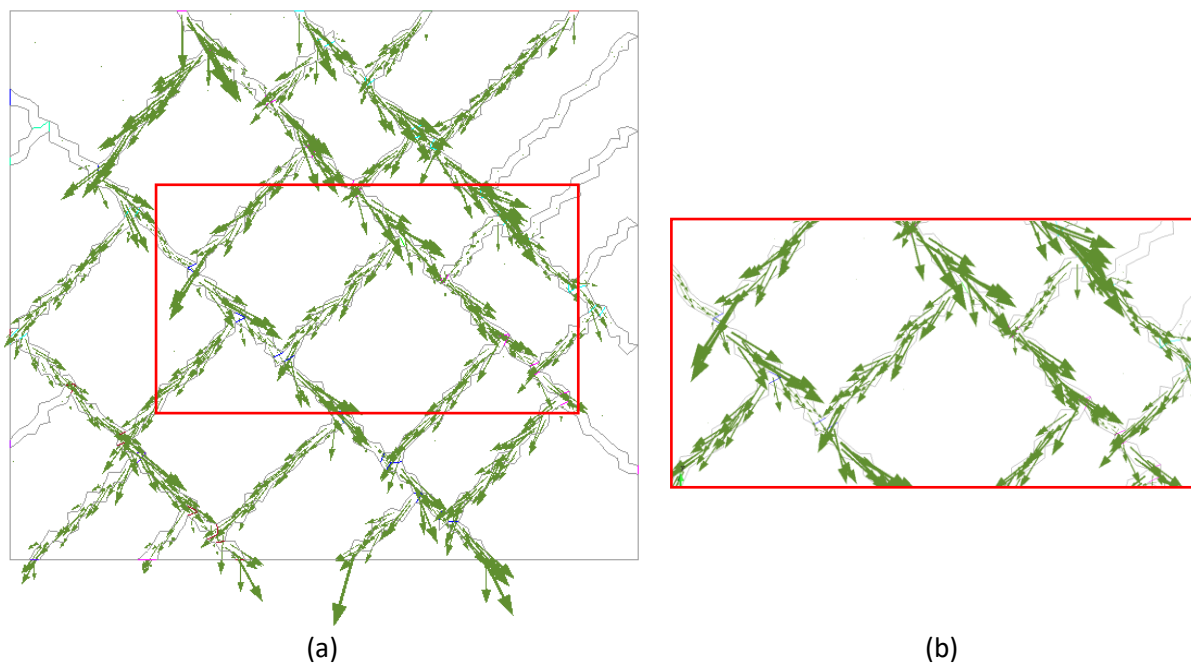


Figura 111 – Vetores de fluxo para $t= 935,48$ dias para condição de contorno vertical.



A permeabilidade equivalente obtida a partir da simulação numérica foi de $9,12 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ para a condição de contorno horizontal. Da mesma forma que o padrão X, a permeabilidade encontrada para o padrão Y foi próxima da permeabilidade das fraturas, mostrando que para fraturas conectadas no padrão Y a permeabilidade equivalente também é dominada pela permeabilidade das fraturas.

Para a condição de contorno vertical, a partir da simulação foi obtida a permeabilidade equivalente de $9,66 \times 10^{-13} m^2$. Isso mostra a anisotropia para este caso. A permeabilidade obtida pela simulação com as aberturas reais dos tipos de fraturas utilizadas para construção do padrão Y, foi de $9,12 \times 10^{-13} m^2$. O erro para a simulação com as aberturas reais e obtidas pelo TopoScan foi de 0%.

As Figuras 112 (a) e 113 (a) mostram os gráficos de evolução da pressão com o tempo. Na região da face esquerda, onde ocorre a injeção de fluido, há o aumento da pressão, porém não instantâneo, pois o ponto 1 está na matriz e não nas fraturas. Para o ponto 2, no centro da malha, a pressão cresce atingindo o estado estacionário de forma mais rápida que para o padrão X. O ponto 3 tem um crescimento abrupto chegando ao estado estacionário rápido.

Figura 112 – Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão Y com condição de contorno horizontal.

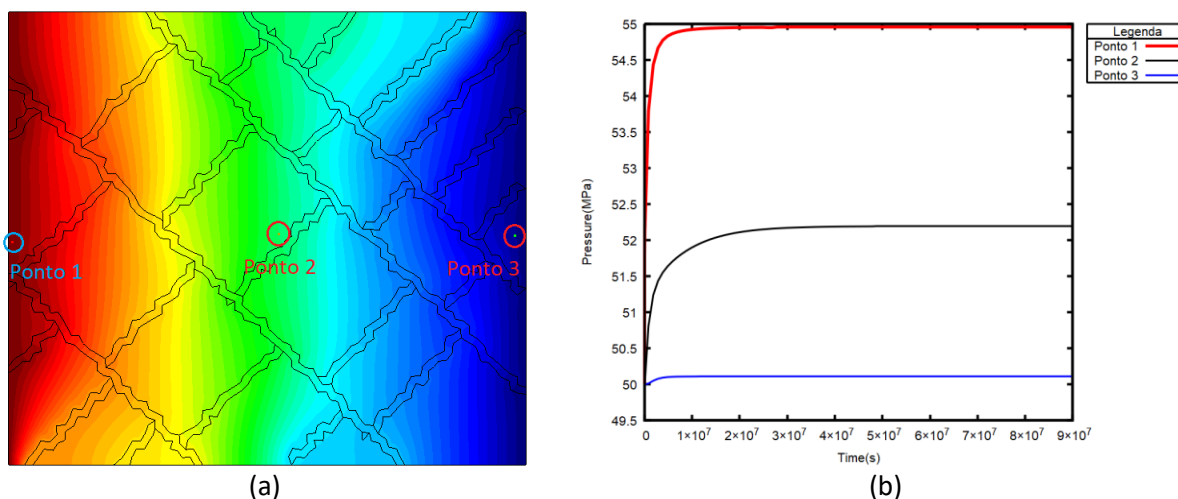
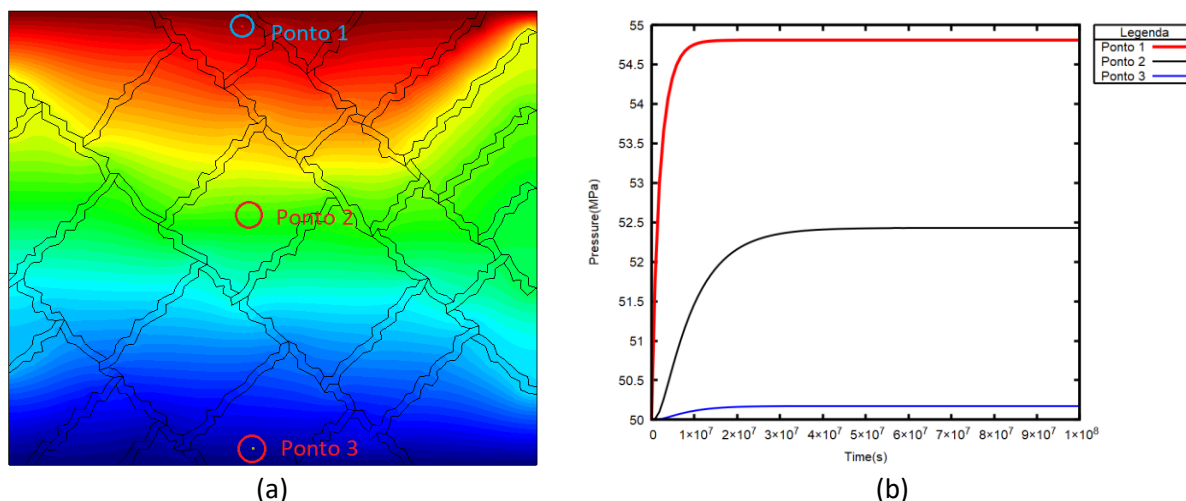


Figura 113 – Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão Y com condição de contorno vertical.



As Figuras 114 (a) e 115 (a) mostram a seleção de dois pontos adicionais na malha para análise da evolução da pressão com o tempo, sendo um ponto na matriz e outro na fratura, onde verifica-se que a evolução da pressão na fratura foi mais rápida que a da matriz.

Figura 114 – Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão Y com condição de contorno horizontal.

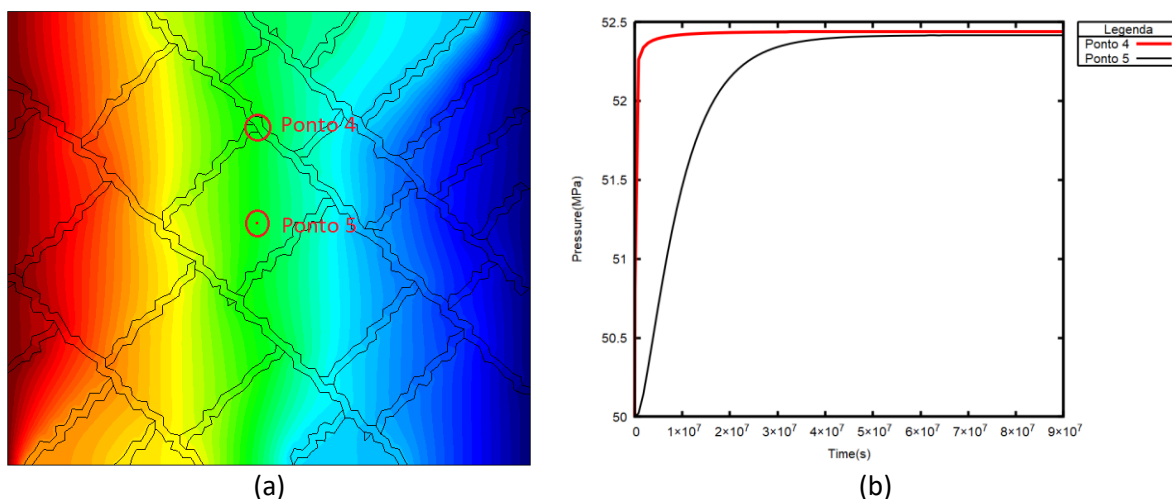
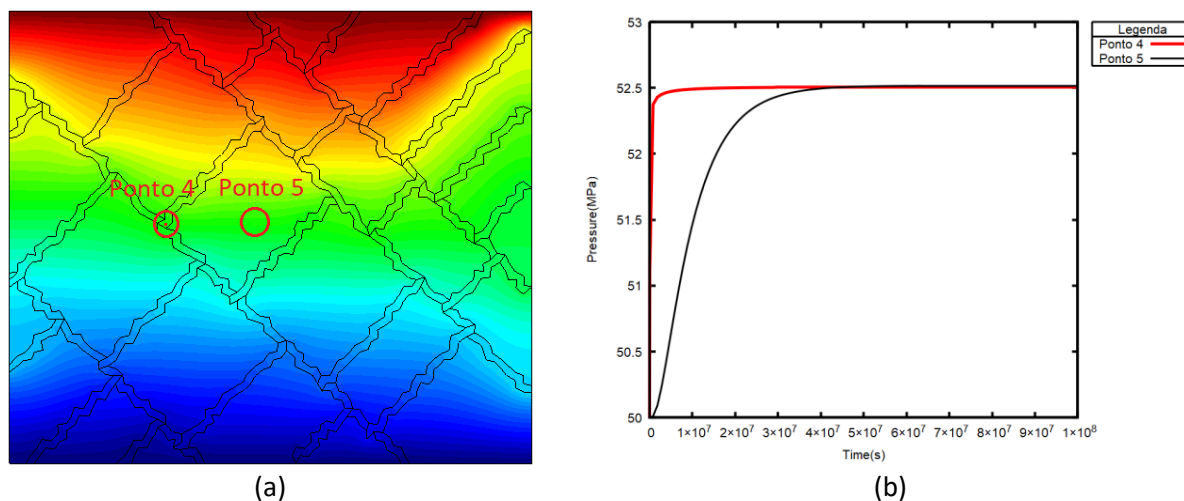


Figura 115 – Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão Y com condição de contorno vertical.

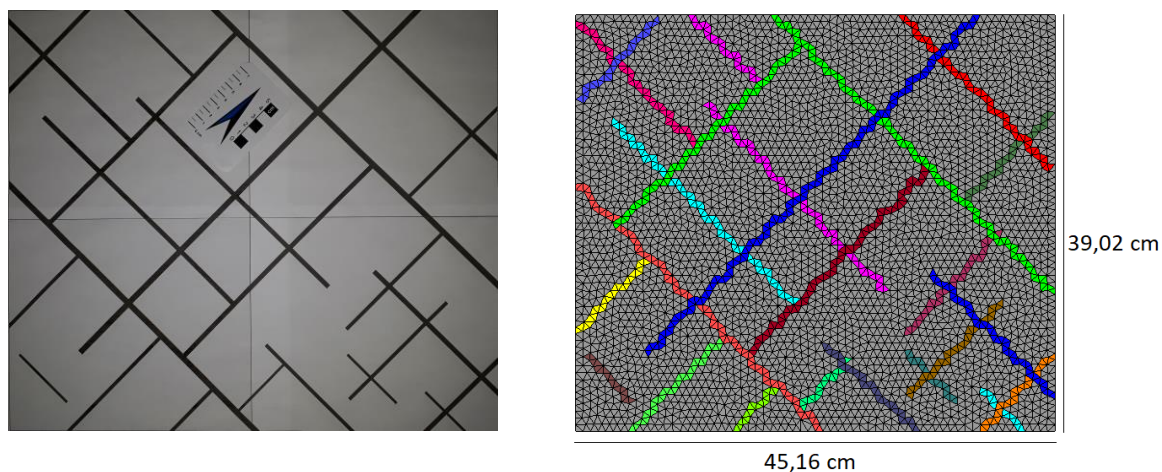


5.4 PADRÃO XYI

Por fim, apresenta-se o estudo realizado agora para o padrão combinado XYI. A Figura 116 mostra a malha com 3698 nós e 7138 elementos, as propriedades da matriz de rocha

foram os mesmos das seções anteriores e a forma de obtenção das propriedades das fraturas também. Para este padrão também foi calculado a partir do TopoScan o $P_{22} = 9,02\%$.

Figura 116 – Malha com padrão topológico XYI.



A distribuição da pressão em três diferentes tempos de análise estão mostrados na Figura 117 e 118. Percebeu-se discontinuidades em relação ao campo de pressão devido às fraturas, especialmente as interconectadas. Observa-se um salto da pressão quando o fluido encontra as fraturas, como pode ser visto na Figura 117 (a) e 118 (a).

Figura 117 – Evolução da pressão do líquido, caso XYI.

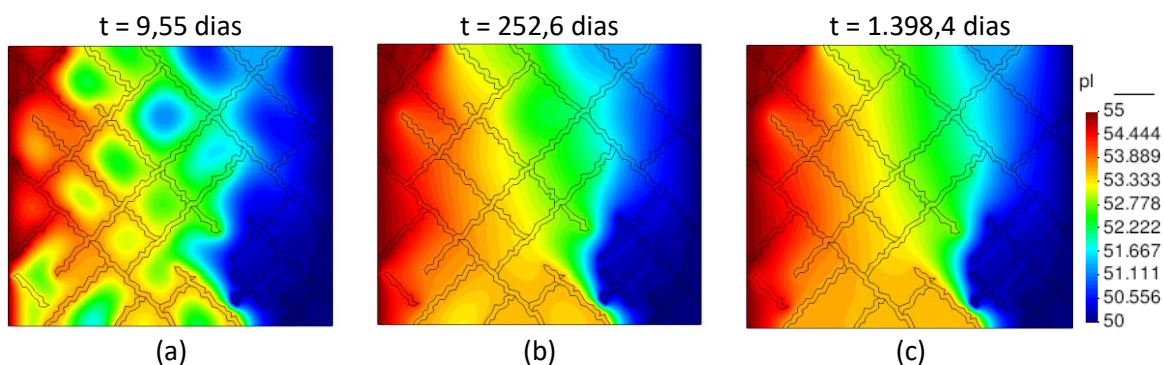
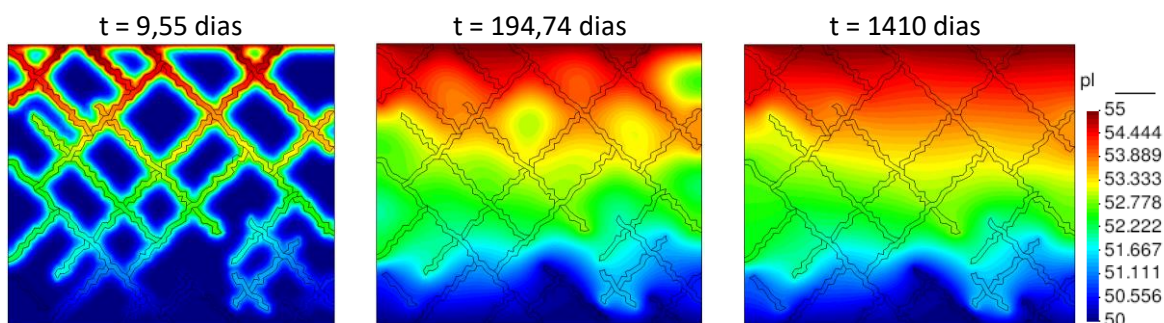


Figura 118 – Evolução da pressão do líquido, caso XYI.



(a)

(b)

(c)

As Figuras 119 e 120 mostram os vetores de fluxo para o estado estacionário onde o fluido se desloca com maior intensidade pelas fraturas. O estado estacionário para as duas condições de contorno foi alcançado em um tempo aproximadamente igual.

Verificou-se que o caminho de deslocamento do fluido foi diferente para os padrões X, Y e XYI, o que mostrou a dependência do fluxo em relação à topologia de fraturas e sua influência sobre o arranjo da rede de fraturas.

Figura 119 – Vetores de fluxo para $t=1.398,4$ dias.

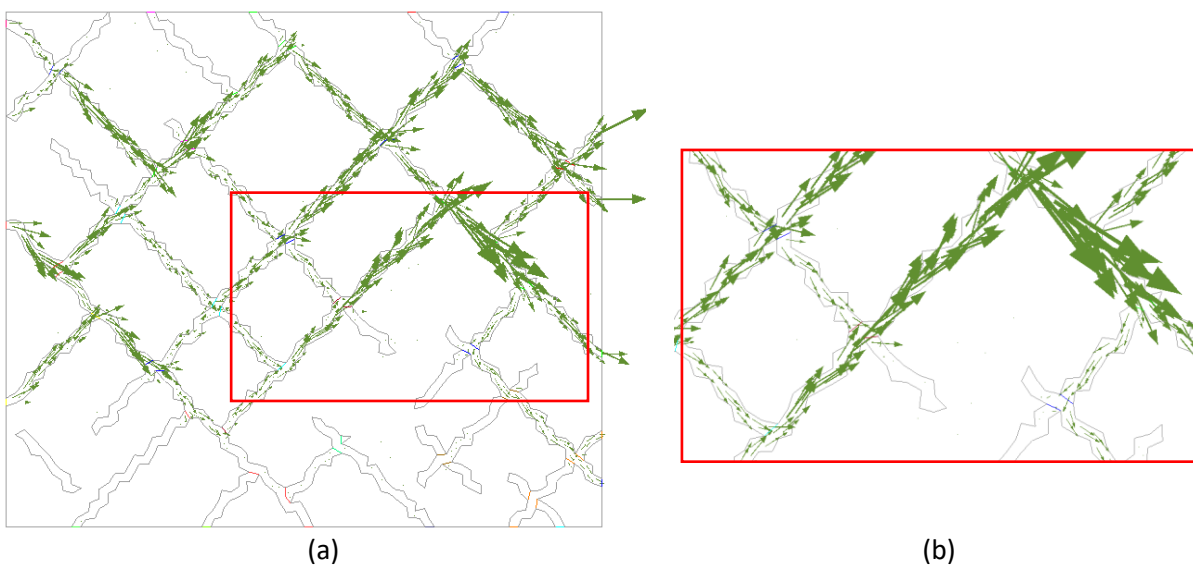
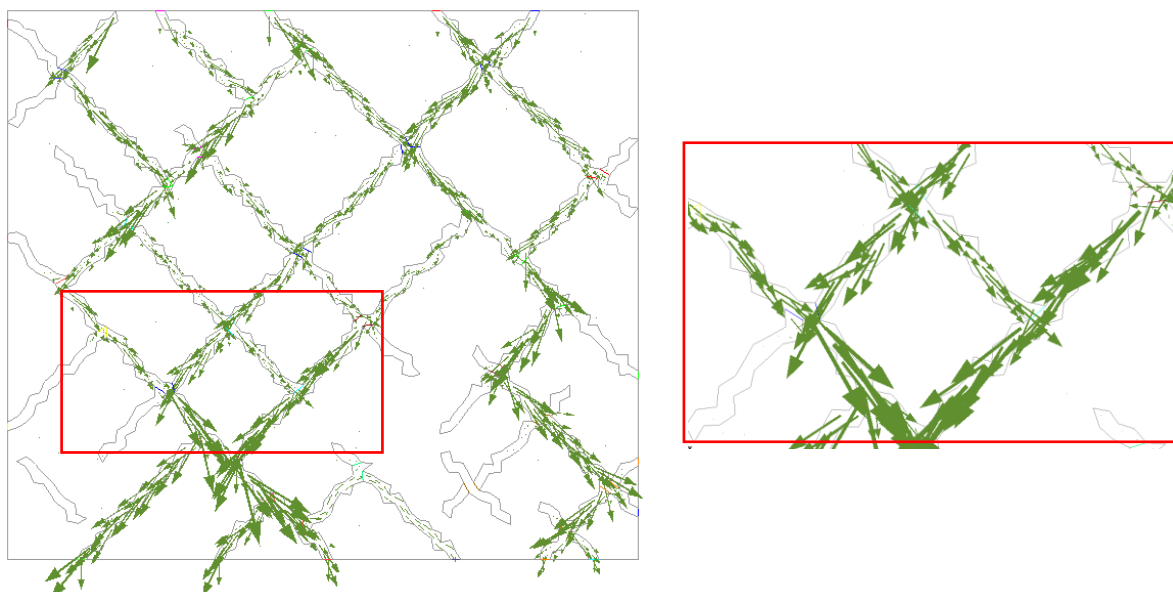


Figura 120 – Vetores de fluxo para $t=1.410$ dias.



(a)

(b)

Para o padrão XYI, a permeabilidade equivalente encontrada foi de $6,44 \times 10^{-13} m^2$, este valor teve a mesma ordem de grandeza da fraturas, como também mesma ordem de grandeza para os padrões X e Y. As aberturas reais utilizadas para construção do padrão XYI também foi simulado e obtido a permeabilidade equivalente de $6,44 \times 10^{-13} m^2$, com essa permeabilidade o erro relativo foi calculado e 0% foi obtido, isso mostra que a ferramenta TopoScan mesmo com os erros das aberturas o erro global da permeabilidade equivalente do meio não é alterada.

Para a condição de contorno vertical, obtida a partir da simulação foi obtida a permeabilidade equivalente de $9,66 \times 10^{-13} m^2$. Isso mostra que o padrão X é anisotrópico para a permeabilidade equivalente.

As Figuras 121 (a) e 122 (a) mostram a escolha de três pontos distintos ao longo da malha para plotagem do gráfico de pressão por tempo 121 (b) e 122 (b), na face esquerda e parte superior onde ocorre a injeção de fluido rapidamente há o aumento da pressão, porém não instantâneo, pois o ponto 1 está na matriz e não nas fraturas. Para o ponto 2 que está no meio da malha a pressão demora um pouco mais a chegar ao estado estacionário, parecido com o padrão X, apenas um pouco mais rápido por estar mais próximo da fratura.

Figura 121 – Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão XYI.

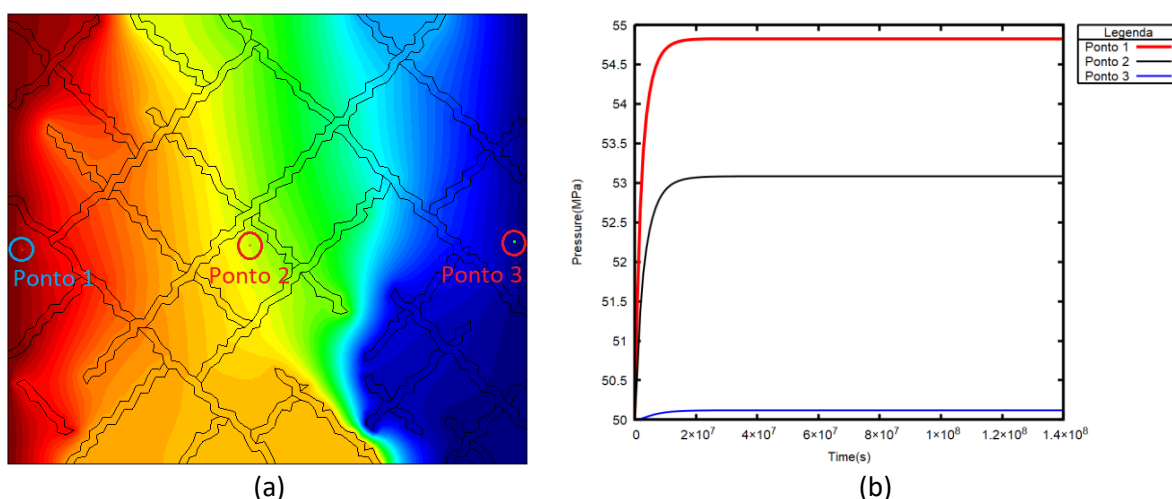
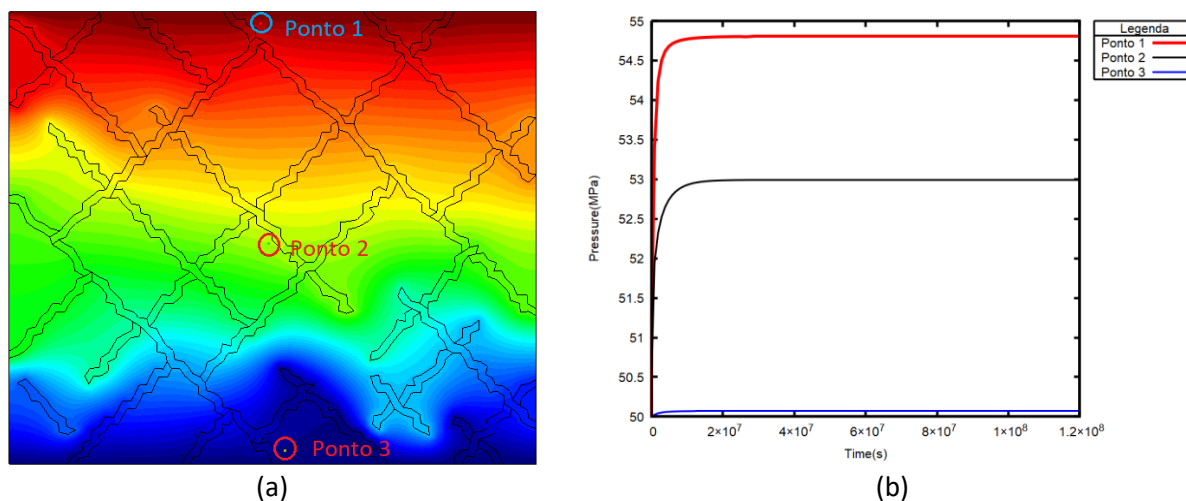


Figura 122 – Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, padrão XYI.



As Figuras 123 (a) e 124 (a) mostram a marcação de dois pontos na malha, um ponto na matriz e outro na fratura, para construção do gráfico da evolução da pressão por tempo 123 (b) e 124 (b), fica claro que a evolução da pressão na fratura se deu de forma mais rápida que a da matriz.

Figura 123 – Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão XYI.

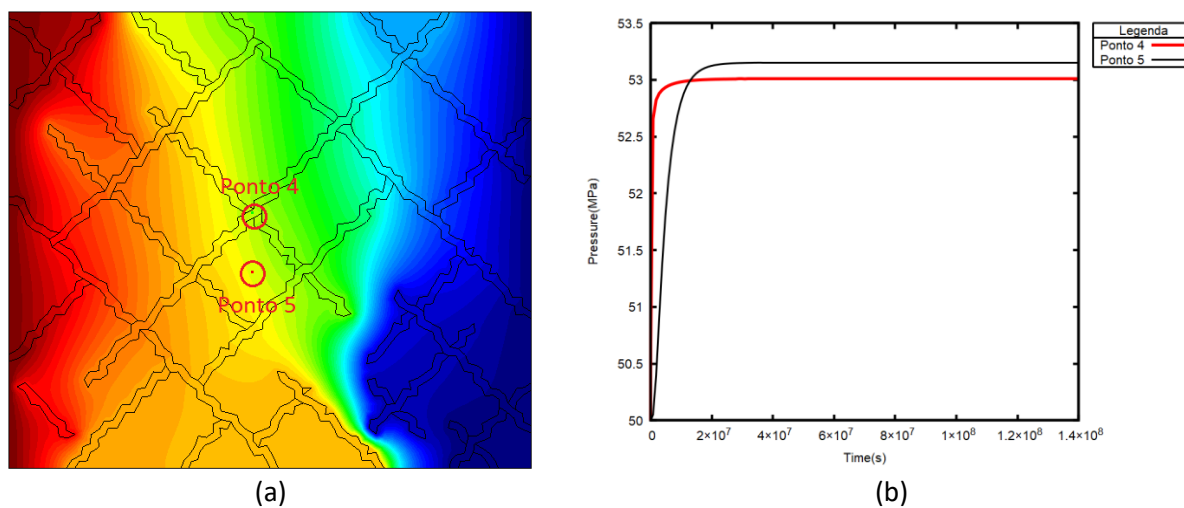
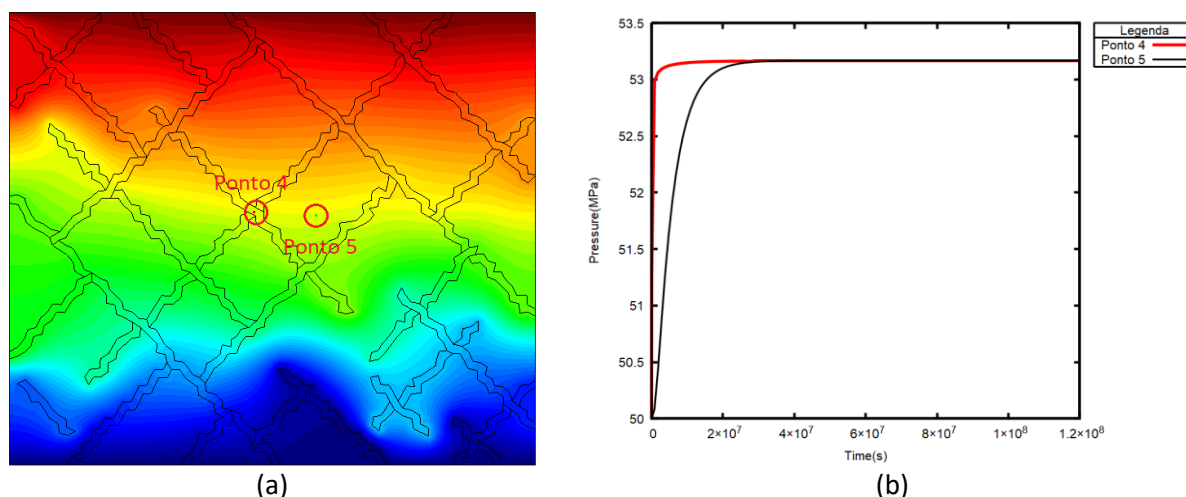


Figura 124 – Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, padrão XYI.



5.5 RESUMO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

O regime transiente ocorre em todos os casos devido a compressibilidade do fluido interferir no tempo da chegada ao estado estacionário. Porém a topologia também interfere no deslocamento do fluido e estabilização da pressão de líquido.

A Tabela 4 resume os resultados obtidos pela simulação de fluxo de fluido. Com esta tabela é possível concluir qual a relação entre a permeabilidade e a topologia como também identificar o quanto de erro é causado na permeabilidade equivalente com a utilização do TopoScan para obtenção das aberturas.

Tabela 4 – Permeabilidades equivalentes para os diversos padrões topológicos estudados.

Padrões Topológicos	Permeabilidade equivalente (horizontal) (m^2)	Permeabilidade equivalente (vertical) (m^2)	Permeabilidade equivalente (real) (m^2)
I	4,55E-15	1,16E-14	4,55E-15
X	7,42E-13	9,66E-13	7,42E-13
Y	9,12E-13	1,20E-12	9,12E-13
XYI	6,44E-13	1,11E-12	6,44E-13

Fonte: Autor.

Como todas as medidas de P_{22} dos padrões topológicos são aproximadamente iguais, é possível concluir com os resultados da Tabela 4, que para um meio com predominância I a permeabilidade é a menor entre todos os padrões, os outros padrões X, Y e XYI tem valores próximos, mas o menor entre esses é o XYI devido ao menor número de rede de fraturas.

Para todos os casos a permeabilidade equivalente obtida com a condição de contorno vertical mostra que há anisotropia, pois esse valor é diferente da permeabilidade equivalente com a condição de contorno horizontal.

O erro relativo entre a permeabilidade equivalente com a condição de contorno horizontal das aberturas obtidas pelo TopoScan e a real foi aproximadamente zero para todos os casos, pois apenas foi considerado duas casas decimais. Isso mostra que mesmo os erros causados na marcação das aberturas e comprimento pelo TopoScan não interferem globalmente para a permeabilidade equivalente.

6 APLICAÇÃO DO TOPOSCAN E SIMULAÇÃO NUMÉRICA A CENÁRIO DE AFLORAMENTO

O caso prático estudado foi proveniente da coleta de imagens de uma formação rochosa de granito na região do Cabo de Santo Agostinho localizado no litoral de Pernambuco - Brasil. Esse é um tipo de rocha ígnea da Província Magmática do Cabo, que se distribui ao longo da Bacia sedimentar de Pernambuco (Antonio & Sérgio, 2005).

A Figura 125 foi utilizada no programa TopoScan a fim de obter a caracterização do padrão de fraturas do meio geológico. Em seguida, com esses padrões, foram obtidas simulações de fluxo de fluido.

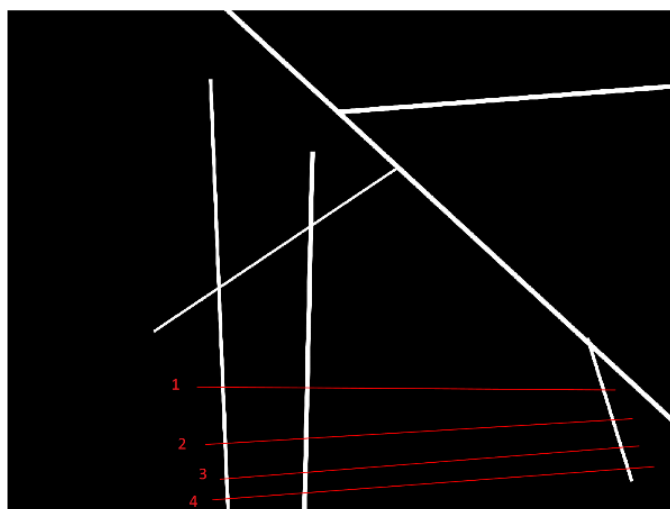
Figura 125 – Imagem do granito do Cabo de Santo Agostinho, PE.



Fonte: Autor.

Para o ajuste de regressão linear utilizada na construção do gráfico da lei de potência da técnica *scanline*, necessita-se que pelo menos três fraturas sejam interceptadas. Na Figura 125 observam-se poucas fraturas, impedindo que mais de um set seja definido, pois o set é definido para fraturas da mesma família com angulações aproximadas. Dessa forma apenas quatro *scanlines* para o mesmo set foram traçadas, conforme mostrado na Figura 126.

Figura 126 – Scanline.



A Figura 126 mostra as *scanlines* que o TopoScan obteve as aberturas e distancias entre as aberturas para construção do gráfico da lei de potência, Figura 127 a 130.

Figura 127 – Lei de potência scanline 1.

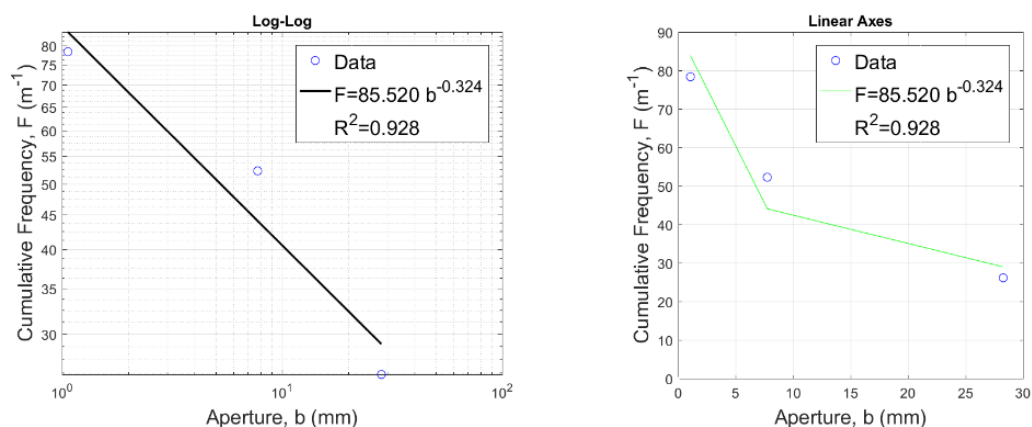


Figura 128 – Lei de potência scanline 2.

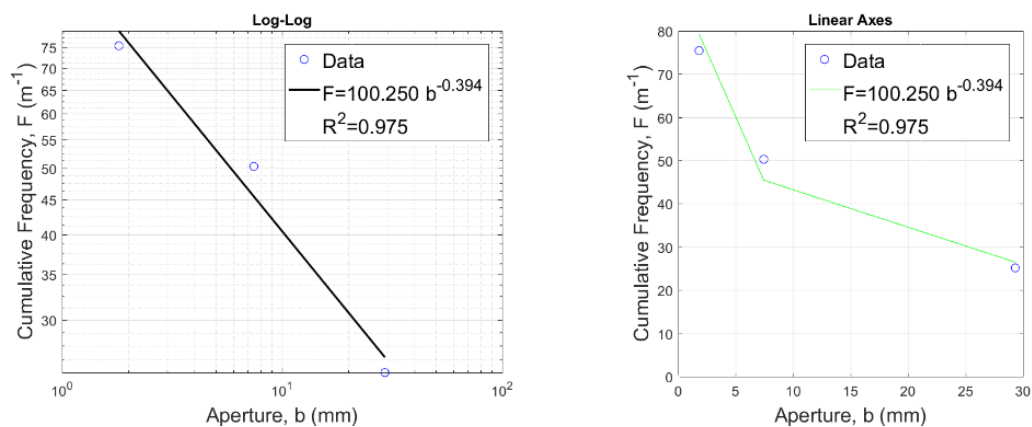
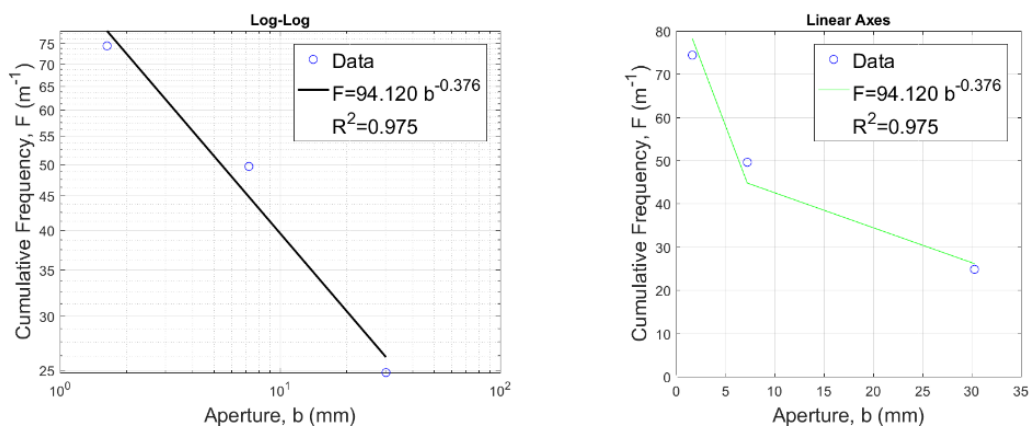
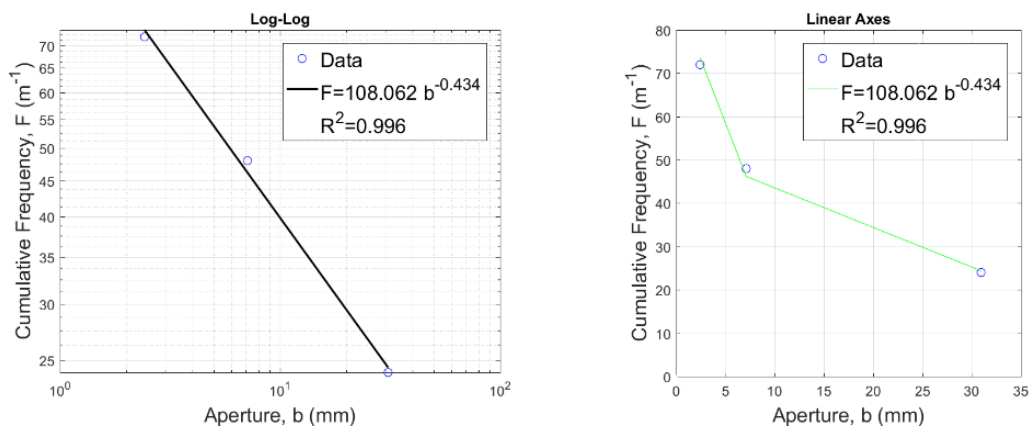
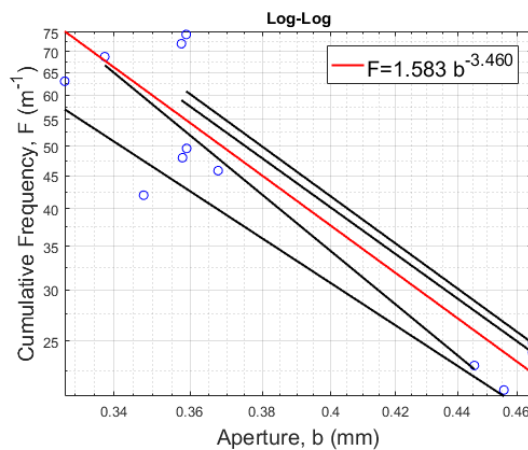


Figura 129 – Lei de potência *scanline* 3.Figura 130 – Lei de potência *scanline* 4.

A Figura 131 mostra o gráfico da lei de potência média (linha vermelha) considerando as demais curvas de lei de potência e dados apresentados nas Figura 127 a 130. Foi obtido o valor médio da constantes de proporcionalidade e do expoente para obter a relação da frequência acumulada para uma determinada abertura.

Figura 131 – Lei de potência média.



Os padrões topológicos encontrados para a imagem do granito do Cabo de Santo Agostinho, são representados na Figura 132 e a partir da normalização, foi obtido $X = 0,2222$, $Y = 0,3333$ e $I = 0,4444$. Com isso construiu-se o diagrama ternário conforme mostrado na Figura 133.

Figura 132 – Padrões topológicos encontrados no granito do Cabo de Santo Agostinho.

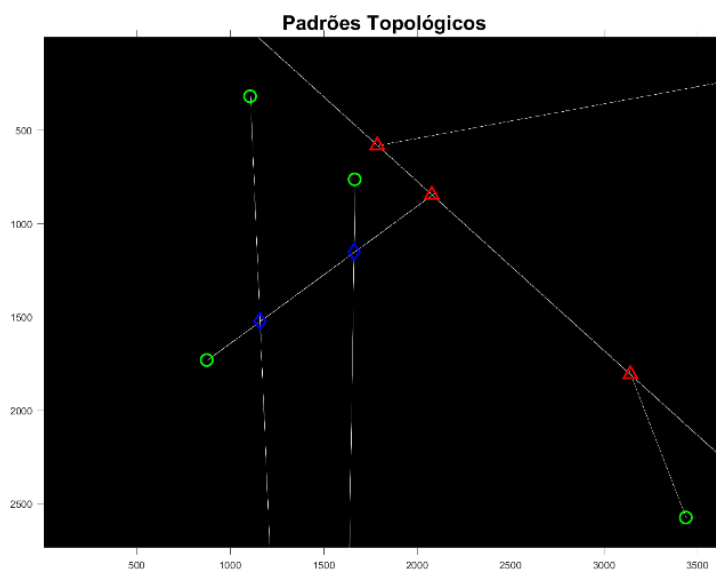
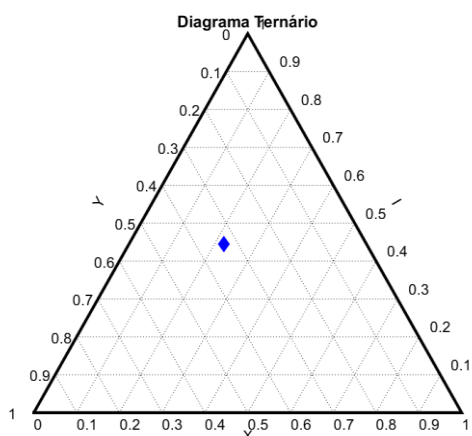
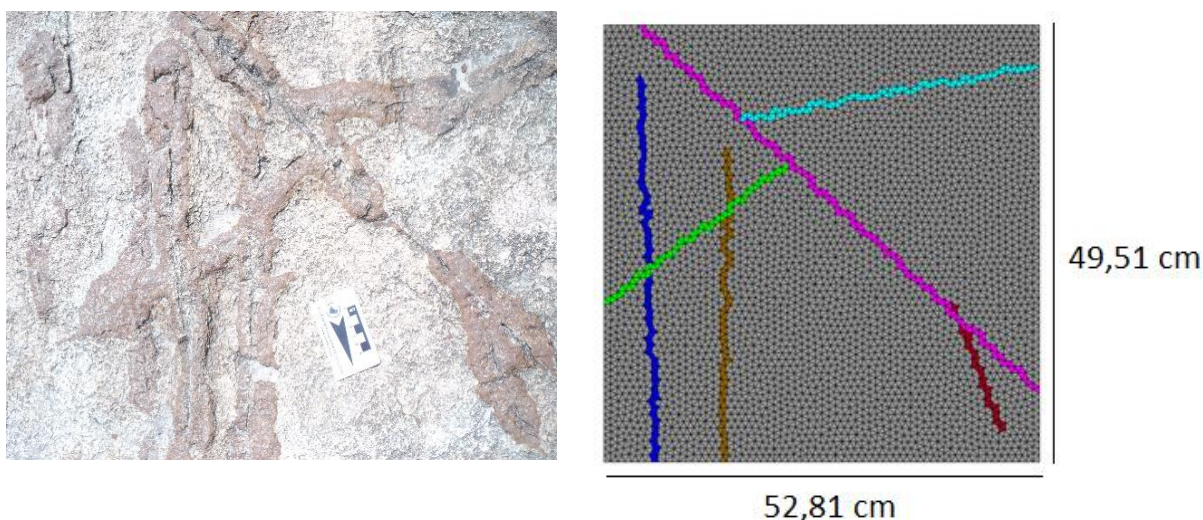


Figura 133 – Diagrama ternário da imagem no granito do Cabo de Santo Agostinho.



A Figura 134 mostra a malha de elementos finitos com 4225 nós e 8192 elementos. Foram adotados os mesmo valores de permeabilidade e porosidade para a matriz e compressibilidade do fluido dos casos do capítulo 5. As permeabilidades das fraturas também foram obtidas a partir das aberturas, utilizando a equação (5.1). As duas condições de contorno, horizontal e vertical, utilizadas para os casos X, Y, I e XYI, foram simuladas para o caso do granito do Cabo de Santo Agostinho. Foi calculado a partir do TopoScan e obtido o $P_{22} = 3,19\%$.

Figura 134 – Malha do sistema fraturado no granito do Cabo de Santo Agostinho.



As Figuras 135 e 136 mostram a evolução da distribuição de pressão para as condições de contorno vertical e horizontal, da mesma forma as Figuras 137 e 138 mostram os vetores

de fluxo no estado estacionário para as duas condições de contorno, ficando visível a influência da rede de fraturas sobre o deslocamento de fluido.

Figura 135 – Evolução da pressão do líquido, granito do Cabo de Santo Agostinho com condição de contorno horizontal.

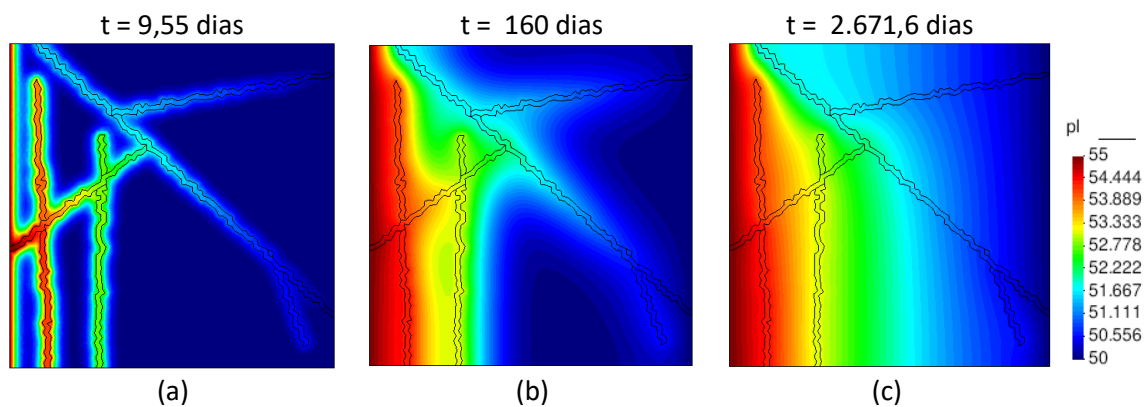


Figura 136 – Evolução da pressão do líquido, granito do Cabo de Santo Agostinho com condição de contorno vertical.

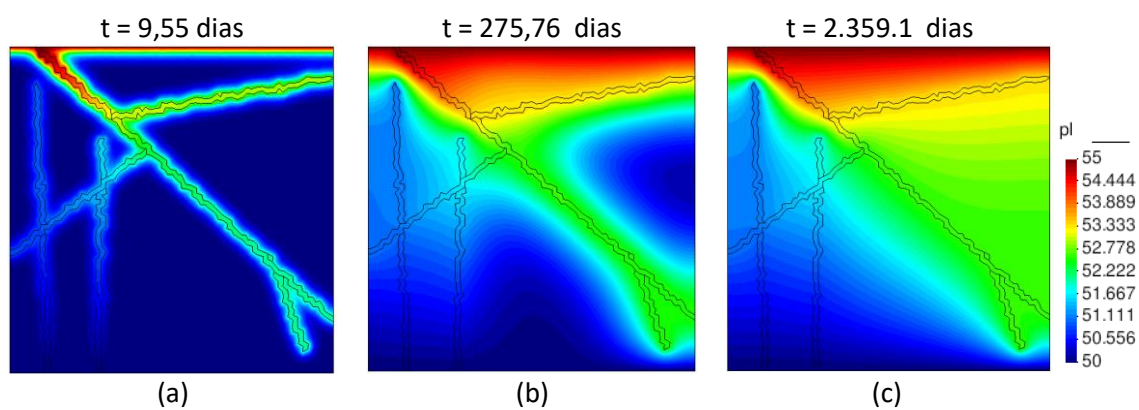


Figura 137 – Vetores de fluxo para $t=2.671,6$ dias para condição de contorno horizontal.

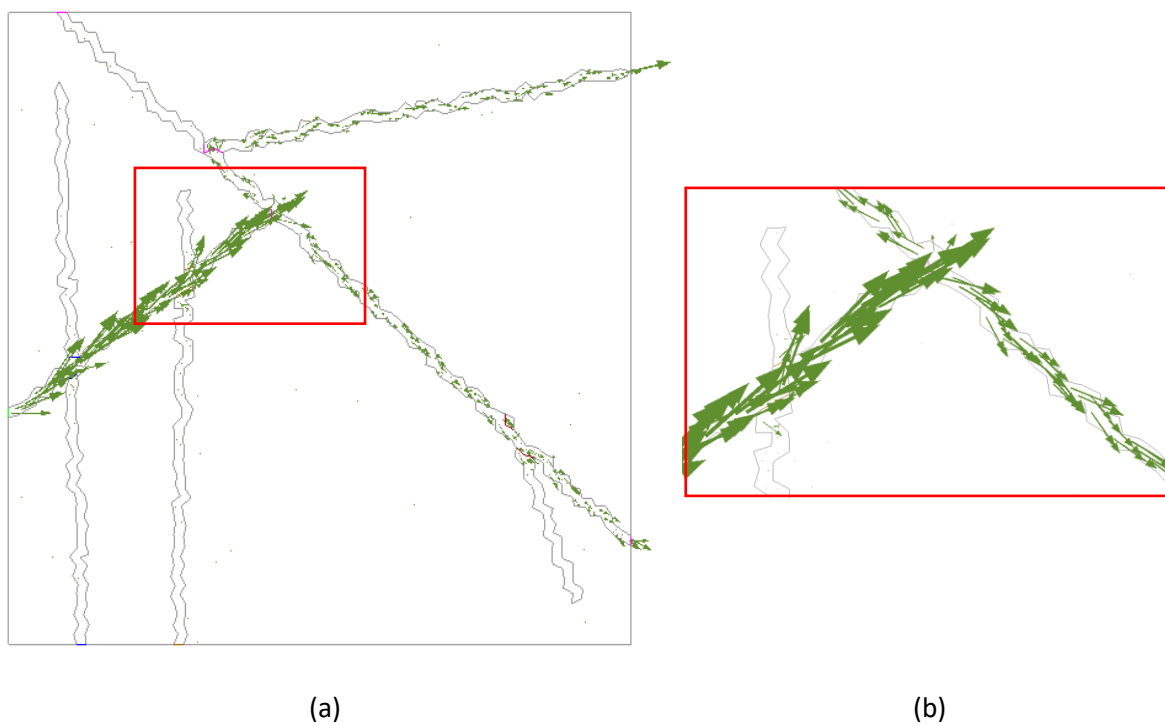
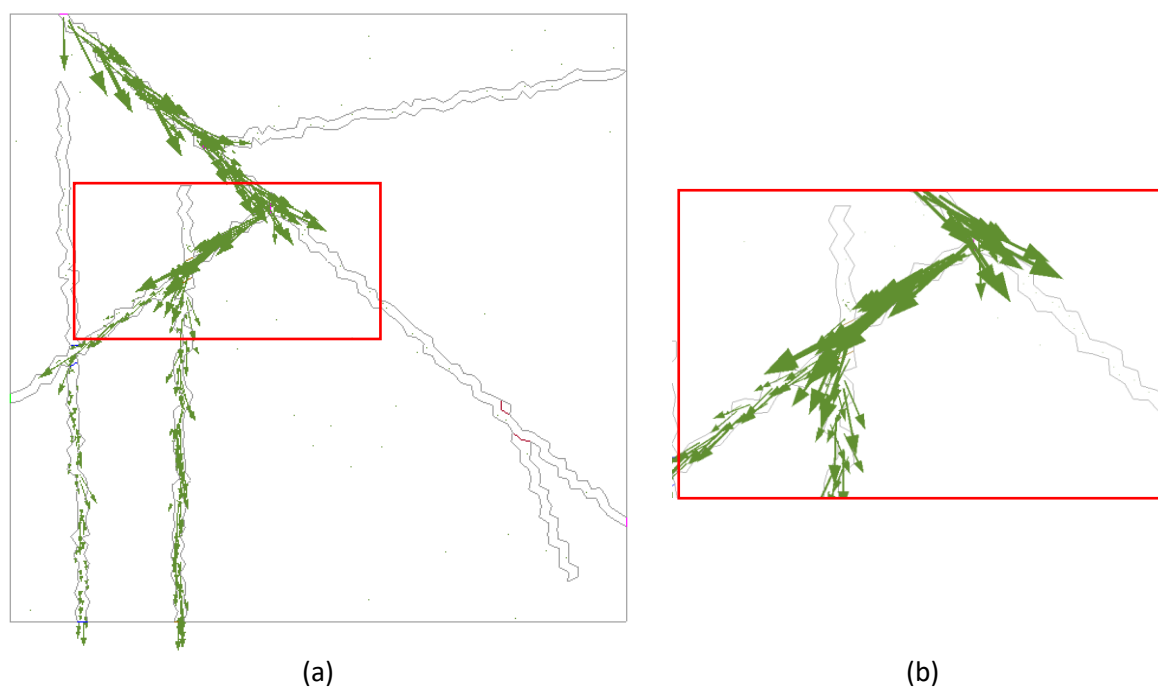


Figura 138 – Vetores de fluxo para $t = 2.359.1$ dias para condição de contorno vertical.



Para este cenário, a permeabilidade equivalente encontrada para a condição de contorno horizontal foi de $3,55 \times 10^{-13} m^2$, esta permeabilidade tem valor próximo da ordem de

grandeza das fraturas e com o menor valor comparado aos padrões conectados X, Y e XYI, dos casos anteriores, devido ao P22 ser muito pequeno.

Já para as condições de contorno vertical foi encontrado a permeabilidade de $3,50 \times 10^{-13} m^2$. As duas permeabilidades tiveram valores próximos devido a configuração das fraturas, mostrando que este caso é isotrópico.

As Figuras 139, 140, 141 e 142 apresentam a evolução da pressão em diferentes pontos selecionados ao longo do domínio na matriz rochosa quanto no interior das fraturas, a condição de contorno horizontal foi simulado para as Figuras 139 e 141 e a condição de contorno vertical para as Figuras 140 e 142. O padrão de deslocamento e de variação da pressão foram similares aos casos de topologia X, Y e XYI, uma vez que apresenta conexão entre as fraturas e domínio destas sobre o escoamento do fluido.

Figura 139 – Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, Cabo de Santo Agostinho para condição de contorno horizontal.

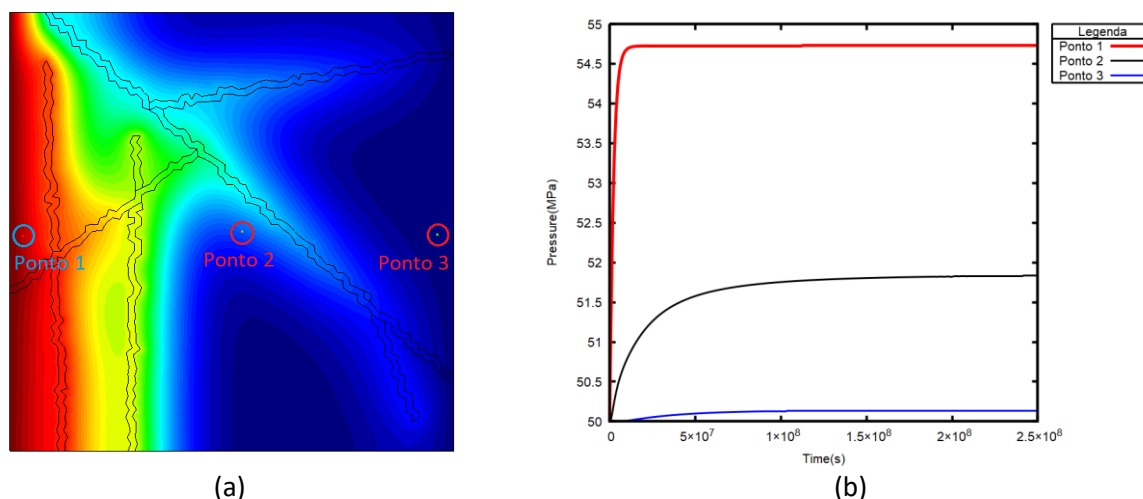


Figura 140 – Evolução da pressão de líquido em três pontos distintos, Cabo de Santo Agostinho para condição de contorno vertical.

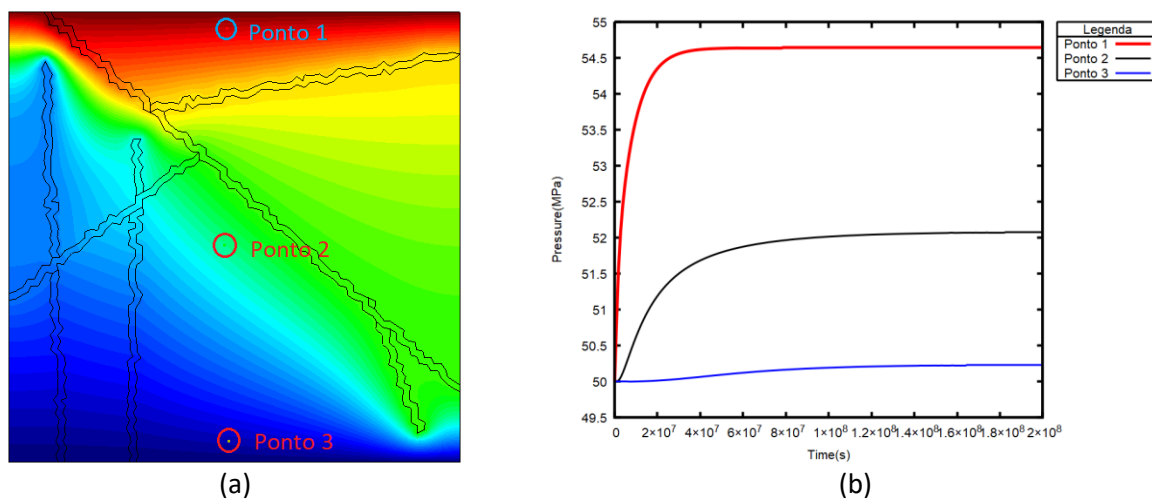


Figura 141 – Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, Cabo de Santo Agostinho para condição de contorno horizontal.

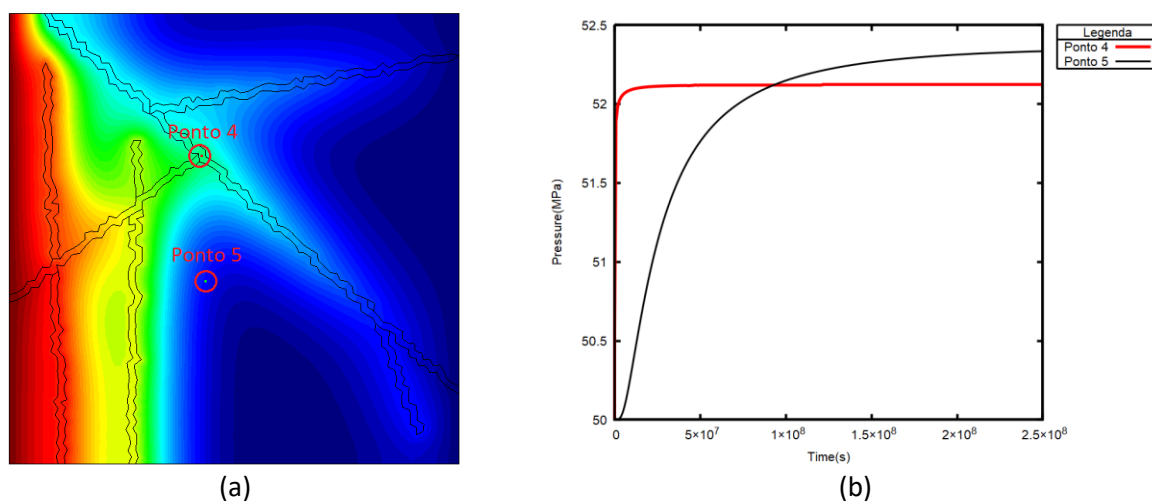
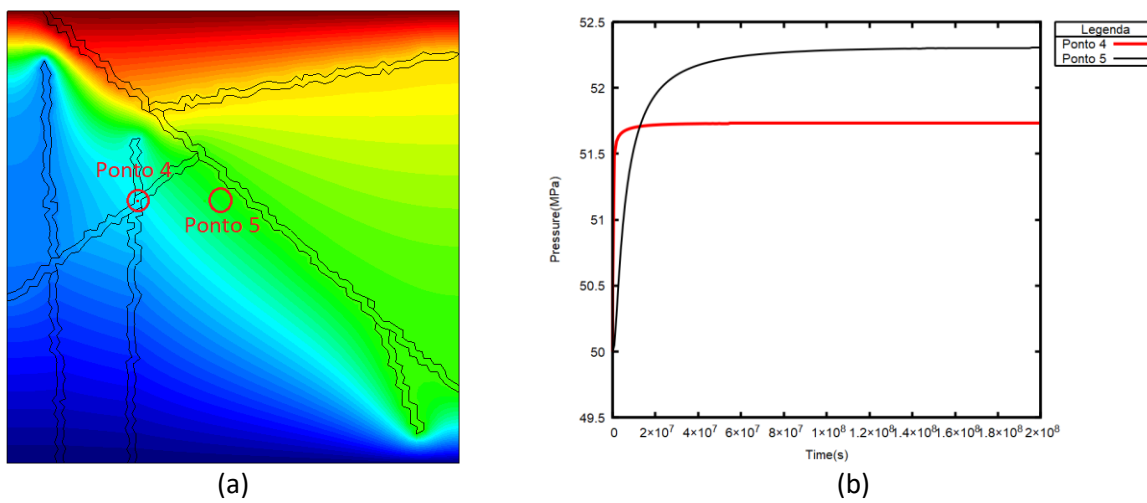


Figura 142 – Evolução da pressão de líquido na fratura e na matriz, Cabo de Santo Agostinho para condição de contorno vertical.



7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A utilização do programa implementado neste trabalho, chamado de TopoScan, em comparação com os demais, que se propõem fazer análises semelhantes, FRANEP, FRACPAQ e DIGIFRAC, tem como vantagem a utilização de apenas um software para obtenção das coordenadas das fraturas nas imagens e consequentemente análise, além de obter as aberturas das fraturas a partir da marcação de pontos na imagem com pelo menos um objeto de referência que sirva de escala (régua, canetas, etc.). Nenhum dos outros softwares citados neste trabalho mencionam técnicas para obtenção das aberturas das fraturas nas imagens, apenas o comprimento da fratura é utilizado.

Outra vantagem do TopoScan é que o usuário não necessita ter conhecimento de programação, pois uma interface gráfica guia as etapas de utilização do programa, como mostrado no Anexo.

Dentro da estrutura do TopoScan é possível facilmente adicionar novas funcionalidades como, por exemplo, aplicar análise estatística das informações obtidas. Isso pelo MATLAB se tratar de uma linguagem bastante conhecida no meio acadêmico e ser de fácil programação e implementação de algoritmos.

Os resultados obtidos a partir cenários artificiais, mostraram que grande parte dos erros encontrados nas aberturas e nos comprimentos acontecem devido às imprecisões na marcação dos pontos com dimensões muito pequenas, que na maior parte são as aberturas. Mesmo com esses erros de abertura e comprimento mostrados no boxplot do capítulo 4, a permeabilidade equivalente real (aberturas reais dos tipos de fraturas utilizados para construção dos padrões topológicos) e prática (abertura encontrada pelo TopoScan) obtida pela simulação para todos os casos teve erro de 0%. Mostrando que a ferramenta desenvolvida nesse trabalho não gerou erro global para permeabilidade equivalente mesmo tendo erro nas aberturas e comprimento causado devido a marcação dos mesmos.

Além da obtenção de características geométricas (comprimento, abertura e angulação) o TopoScan consegue adicionar a análise topológica que possibilita adquirir mais informações acerca do padrão de fraturamento da região de estudo. Para todos os casos os padrões topológicos foram contados a olho nu e comparados com os obtidos pelo programa, validando a contagem automática dos elementos permitindo que em análises futuras se tenha confiança na utilização do TopoScan, pois todos os padrões foram perfeitamente identificados.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

A partir avaliação dos resultados obtidos e das técnicas utilizadas surge a possibilidade para os trabalhos futuros:

- Acoplar o conjunto Raspberry Pi e câmera em alguma plataforma para coleta de imagens e implementação de processamento em tempo real, de forma a permitir uma pré-análise em campo;
- Adicionar a amostragem em 2D, a partir dos métodos de janela e circular;
- Caracterizar um maior número de áreas para obter uma melhor relação entre a porcentagem dos padrões topológicos e a permeabilidade equivalente;
- Caracterizar um região em campo e comparar com os resultados obtidos pelo TopoScan;
- Comparar as conectividades das fraturas do TopoScan com o FracPaq;
- Construir uma interface mais profissional e amigável para o programa, permitindo que seu uso se expanda no meio acadêmico;
- Incorporar ao TopoScan análises estatísticas e medidas de intensidade de fraturas às informações de saída do programa para obtenção de mais características do meio fraturado;
- Utilizar algoritmos de detecção de bordas e linhas mais eficientes para encontrar as aberturas das fraturas de forma automática, com a abordagem recursiva de detecção de linhas e bordas, aplicação de filtros e algoritmos de ponte entre os pixels.
- Utilizar o TopoScan para obter as linhas da pesquisa de dissecação de argila.

REFERÊNCIAS

- ABDOU, I. A., & PRATT, W. **Quantitative design and evaluation of enhancement/thresholding edge detectors**. 1979. *Proceedings of the IEEE*, 753-766.
- ANANDHALLI, M., & BALIGAR, V. P. **A novel approach in real-time vehicle detection and tracking using Raspberry Pi**. 2017. *Alexandria Engineering Journal*.
- ANTONIO, M. L., & SÉRGIO, Z. S. **Granito do Cabo de Santo Agostinho, PE - Granito do Cabo de Santo Agostinho, PE**. 2005. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, 1-12.
- BEAR. (1988). *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Dover Publications.
- BECKERA, I., KOEHRERC, B., WALDVOGELD, M., JELINEKC, W., & HILGERS, C. **Comparing fracture statistics from outcrop and reservoir data using conventional manual and t-LiDAR derived scanlines in Ca₂ carbonates from the Southern Permian Basin, Germany**. 2018. *Marine and Petroleum Geology*.
- BERTORELLI, A. **Arduino - Project Hub**. Retrieved from Arduino: https://create.arduino.cc/projecthub/team-omega-d2/ar-drone-and-1sheeld-discover-the-world-around-your-drone-de6a16?ref=tag&ref_id=drones&offset=1. 2015.
- BESERA, L. B. **Análise Hidromecânica do Fraturamento Hidráulico via Elementos Finitos com Descontinuidades Fortes Incorporadas**. 2015. *Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco*.
- BISDOM, K., NICK, H. M., & BERTOTTI, G. (2017). **An integrated workflow for stress and flow modelling using outcrop-derived discrete fracture networks**. 2017. *Computers & Geosciences*, 21-35.
- BONNET, E., BOUR, O., ODLING, N., DAVY, P., MAIN, I., COWIE, P., & B., B. **Scaling of fracture systems in geological media**. 2001. *Geophys*, 347-383.
- BOWYER, K., KRANENBURG, C., & DOUGHERTY, S. **Edge detector evaluation using empirical roc curves**. 2001. *Computer Vision and Image Understanding*, 77-103.
- CARRE, A., & WILLIAMSON, T. **Design and validation of a low cost indoor environment quality data logger**. 2018. *Energy and Buildings*, 1751-1761.
- CATTO, B., JORGE, R. J., VERISSIMO, L. W., GIOVANINI, F. V., & LUIS, M. A. **The microbial nature of laminated limestones: Lessons from the Upper Aptian, Araripe Basin, Brazil**. 2016. *Sedimentary Geology*, 304-315.
- DAY-LEWIS, F. D., SLATER, L. D., ROBINSON, J., JOHNSON, C. D., TERRY, N., & WERKEMA, D. **An overview of geophysical technologies appropriate for characterization and monitoring at fractured-rock sites**. 2017. *Journal of Environmental Management*, 709-720.
- DERSHOVITZ, W. S., & HERDA, H. **Interpretation of Fracture Spacing and Intensity**. 1992. *U.S. Symposium on Rock Mechanics*, 757-766.

- FANG, W., HANQIAO, J., JUNJIAN, L., QING, W., JOHN, K., LINKA, L., HANXU, Y. **A numerical simulation model for multi-scale flow in tight oil reservoirs**. 2017. *PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT*, 446-453.
- GONZALEZ, R. C., & WOODS, R. E. *Processamento digital de imagens*. 2010. ADDISON WESLEY BRA.
- HARDEBOL, N., & BERTOTTI, G. **DigiFract: A software and data model implementation for flexible DigiFract: A software and data model implementation for flexible**. 2012. *Computers & Geosciences*, 326-336.
- HARWIN, S., & LUCIEER, A. **Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery**. 2012.
- HEALY, D., RIZZO, R. E., CORNWELL, D. G., FARRELL, N. J., WATKINS, H., TIMMS, N. E., . . . SMITH, M. **FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns**. 2016. *Journal of Structural Geology*, 1-16.
- HUANG, N., JIANG, Y., LIU, R., & LI, B. **Estimation of permeability of 3-D discrete fracture networks: An alternative possibility based on trace map analysis**. 2017. *Engineering Geology*, 12-19.
- JING, W., HUIQING, L., JING, X., YUETIAN, L., CHENG, H., QINGBANG, M., & YANG, G. **Mechanism simulation of oil displacement by imbibition in fractured reservoirs**. 2017. *PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT*, 805-814.
- KONRADLT. *Unofficial GoPro API Library for Python - connect to GoPro via WiFi*. Retrieved from KonradIT/gopro-py-api: <https://github.com/KonradIT/gopro-py-api>
- KUZIEK, J. W., SHIENH, A., & MATHEWSON, K. E. **Transitioning EEG experiments away from the laboratory using a Raspberry Pi 2**. 2017. *Journal of Neuroscience Methods*, 75-82.
- LAMARCHE, J., LAVENU, A. P., GAUTHIER, B. D., GUGLIELMI, Y., & JAYET, O. **Relationships between fracture patterns, geodynamics and mechanical stratigraphy in Carbonates (South-East Basin, France)**. 2012. *Tectonophysics*, 231-245.
- MARENGONI, M., & STRINGHINI, D. **Tutorial: Introdução a Visão Computacional usando OpenCV**. 2009. *RITA*, 125-160.
- MASOUD, A. A., & KOIKE, K. **Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data**. 2011. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 812-832.
- MathWorks. *Documentation - bwmorph*. Retrieved from MathWorks: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwmorph.html>
- MIRANDA, T. S. **Caracterização Geológica e Geomecânica dos depósitos carbonáticos e evaporíticos da Bacia do Araripe, NE Brasil**. 2015. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco.
- MIRANDA, T. S., BARBOSA, A., GOMES, I. F., SANTOS, R. F., NEUMANN, V. H., MATOS, G. C., . . . ALENCAR, M. **Applying scanline techniques to geological/geomechanical modeling of fracturing systems in carbonate and evaporite deposits from Araripe Basin, NE Brazil**. 2012. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 20, no 1-2, 305-326.
- MIRANDA, T., STEPHANIE, G. Z., LEWIS, H., FALCÃO, T., SOUZA, J., BARBOSA, J. A., . . . GOMES, I. **Fracture-Enhanced Permeability in Tight Carbonate Reservoir Analogue**. 2018. *AAPG Annual Annual Convention & Exhibition*, 20-23.

NEUMANN, V. H., GALE, J., REED, R. M., & BARBOSA, J. A. **Padrão de fraturamento nos calcários laminados aptianos da região de Nova Olinda-Santana do Cariri, Bacia do Araripe: uma aplicação da técnica de escalas.** 2008. *Estudos Geológicos, Recife*, v. 18,, 101-115.

OpenCV. **Camera Calibration.** Retrieved from OpenCV-Python Tutorials: http://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py_tutorials/py_calib3d/py_calibration/py_calibration.html

OpenCV. **Camera Calibration.** Retrieved from OpenCV: https://docs.opencv.org/3.3.1/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html

OpenCV. **OpenCV.** Retrieved from OpenCV: <https://opencv.org/>

ORTEGA, O. J., MARRETT, R. A., & LAUBACH, S. E. **A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measunring.** 2006. *GEOHORIZONS*, 193-208.

PAQUES, A. **Arduino - Project Hub.** (2016, Novembro 17). Retrieved from Arduino: https://create.arduino.cc/projecthub/AlexisTM/flyingros-19d26b?ref=tag&ref_id=drones&offset=14

PASQUALI, V., D'ALESSANDRO, G. G., & LECCESE, F. **A new data logger based on Raspberry-Pi for Arctic Notostraca locomotion investigations.** 2017. *Measurement*, 249-256.

PASQUALIA, V., D'ALESSANDRO, G., GUALTIERI, R., & LECCESE, F. **A new data logger based on Raspberry-Pi for Arctic Notostraca locomotion investigations.** 2017. *Measurement*, 249-256.

PRIEST, S. D. **Determination of discontinuity size distributions from scanline data.** 2004. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 347-368.

RICHARD HARTLEY, A. Z. **Multiple View Geometry in computer vision.**2003. Cambridge University Press.

RICHEG, L., BO, L., YUJING, J., & LIYUAN, Y. **A numerical approach for assessing effects of shear on equivalent.** 2018. *Advances in Water Resources*, 289-300.

RODRIGUES, D. N., FERREIRA, W. S., GERVÁSIO, J. F., & HOLANDA, F. S. **Syngenetic and diagenetic features of evaporite-lutite successions of the Ipubi Formation, Araripe Basin, Santana do Cariri, NE Brazil.** 2016. *Journal of South American Earth Sciences*, 315-327.

S., O. (1996). Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. *Eng. Comput.*

SAJJAD, M., NASIR, M., MUHAMMAD, K., KHAN, S., JAN, Z., SANGAIAH, A. K., . . . BAIK, S. W. **Raspberry Pi assisted face recognition framework for enhanced law-enforcement services in smart cities.** 2017. *Future Generation Computer Systems*.

SANDERSON, D. J., & NIXON, C. W. **The use of topology in fracture network characterization.** 2015. *Journal of Structural Geology*, 55-66.

SANTOS, R. F. **Modelagem, simulação estatística e numérica de análogo de reservatório naturalmente fraturado baseado em afloramento da Formação Crato, NE Brasil.** 2017. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco.

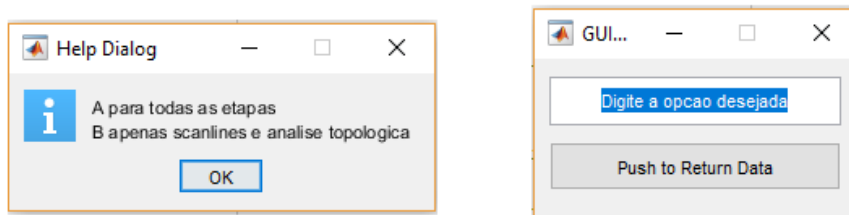
SANTOS, R. M., GOMES, I., MATOS, G., GALE, J., NEUMANN, V., & GUIMARÃES, L. **Characterization of natural fracture systems: Analysis of uncertainty effects in linear scanline results.** 2015. *AAPG Bulletin*. 99(12), 2203-2219.

- SHAH, D., & HARADI, V. **IoT Based Biometrics Implementation on Raspberry Pi**. 2016. *Procedia Computer Science*, 328-336.
- SILVA, L. H., ARAUJO, G. M., & LIMA, A. A. **Fusão em Tempo Real de Imagens Multiespectrais em um Sistema Embarcado**. 2016. 601-611.
- TERZAGHI, R. D. **Sources of error in joint surveys**. 1965. *Géotechnique*, 287-304.
- VASUKI, Y., HOLDEN, E.-J., KOVESI, P., & MICKLETHWAITE, S. **Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach**. 2014. *Computers & Geosciences*, 22-32.
- WALSH, J., WATTERSON, J., & YIELDING, G. **The importance of small-scale faulting in regional extension**. 1991. *Nature*, 391-393.
- WILLIAMS, K., ROBERTIS, A. D., BERKOWITZ, Z., ROOPER, C., & TOWLER, R. **An underwater stereo-camera trap**. 2014. *Methods in Oceanography*, 1-12.
- WILSON, C., AYDIN, A., KARIMI-FARAD, M., DURLOFSKY, L., SAGY, A., BRODSKY, E., . . . KELLOG, L. **From outcrop to flow simulation: constructing discrete fracture models from a LIDAR survey**. 2011. *AAPG Bulletin*, 1883-1905.
- ZEEB, C., GOMEZ-RIVAS, E., BONS, P. D., VIRGO, S., & BLUM, P. **Fracture network evaluation program (FraNEP): A software for analyzing 2D fracture trace-line maps**. 2013. *Computes & Geosciences*, 11-22.

ANEXO – TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DO TOPOSCAN

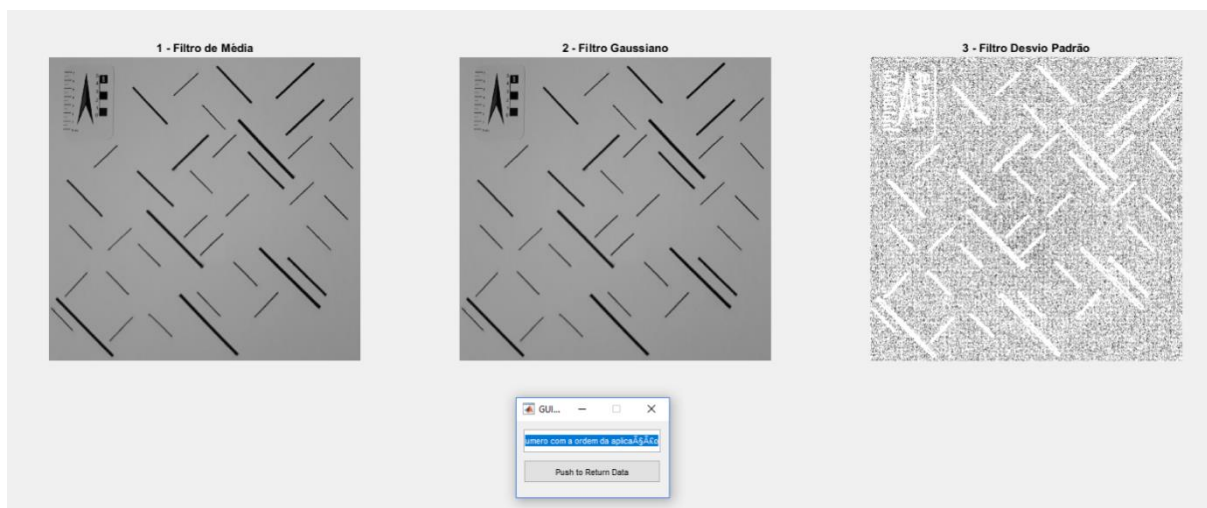
1 – Após a calibração da imagem, é permitido ao usuário escolher todas as etapas A ou apenas *scanlines* e análise topológica B (Figura 143). Em todas as etapas A, o usuário precisa escolher a imagem que será analisada, para inserção das fraturas. Na opção B, as fraturas já foram adicionadas não necessitando novamente da inserção, sendo esta etapa utilizada para análise com novas *scanlines*.

Figura 143 – Opções para iniciar o programa.



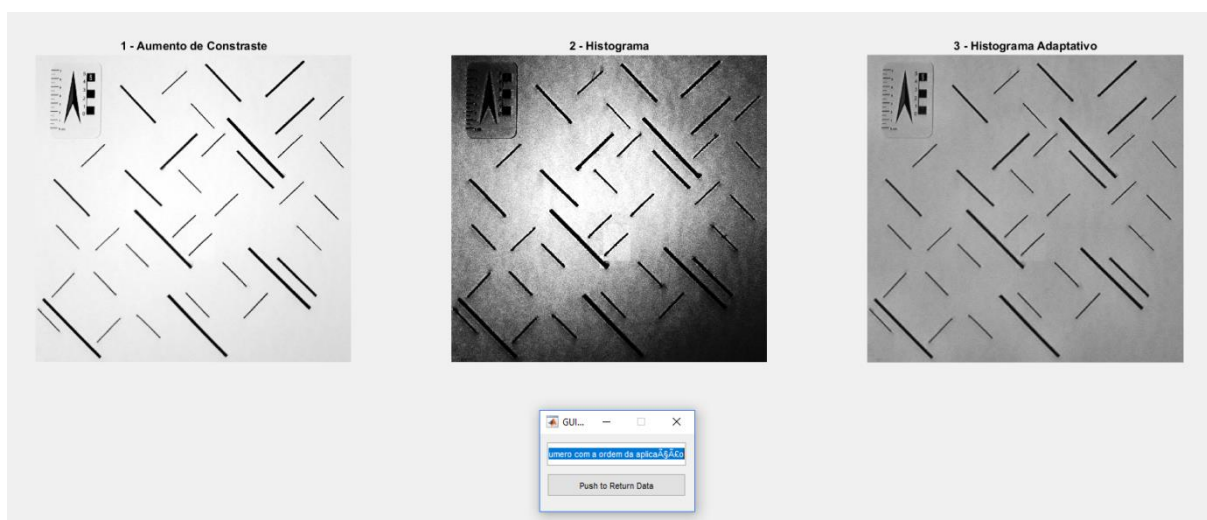
2 – Após o carregamento da imagem, três filtros são sugeridos ao usuário para escolha do melhor. A Figura 144 mostra a tela do programa para as opções de filtro, onde o usuário escolhe a partir de inserção da numeração referente ao título da imagem 1, 2 ou 3.

Figura 144 – Opções de realce de filtros sugeridas ao usuário.



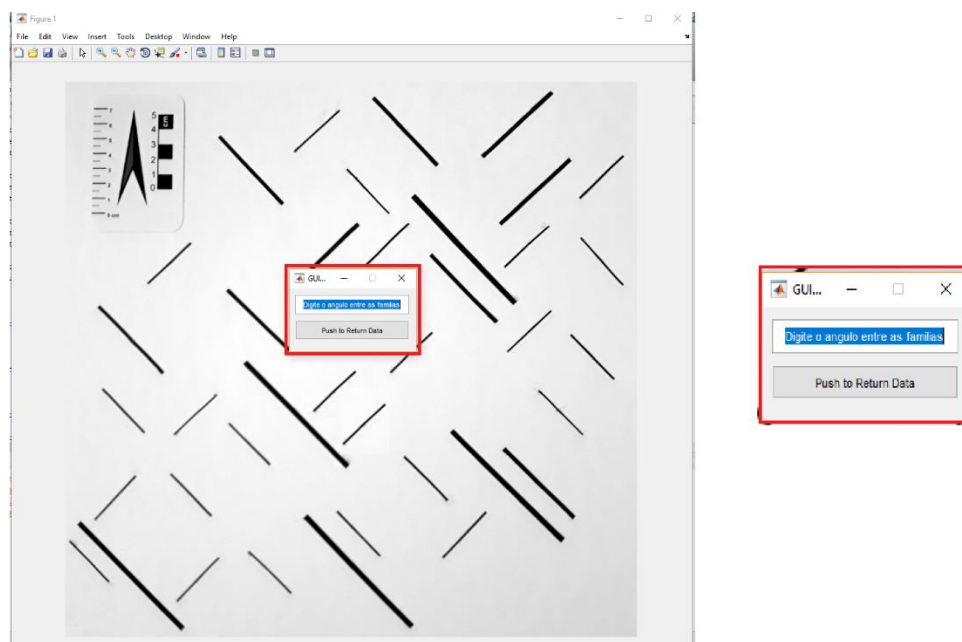
3 – A imagem já com o filtro aplicado anteriormente é reaberta e mostrada com três opções de contraste, sugeridas ao usuário (Figura 145). A escolha se dá a partir da numeração do título 1, 2 ou 3. A imagem é salva com a aplicação do filtro e realce de contraste escolhidas pelo usuário.

Figura 145 – Opções de realce de contraste sugeridas ao usuário.



4 – O usuário agora se depara com a imagem em tela cheia, onde pede-se o ângulo em que as fraturas são classificadas como mesma família (Figura 146). A angulação deve ser múltiplo de 9° devido a simplificações implementadas no programa, que considera que o número de famílias é sempre um número inteiro.

Figura 146 – Solicitação do ângulo das famílias.



5 – Uma caixa de diálogo é mostrada para guiar a próxima etapa (Figura 147) na inserção dos pontos de um objeto de referência com dimensões conhecidas. Após a marcação de dois pontos (Figura 148), pode-se apagar a linha, se algum ponto for marcado errado, a

partir da letra D. O valor do tamanho do objeto de referência é solicitado e o usuário digita (Figura 149).

Figura 147 – Informações sobre marcação dos pontos de referência.

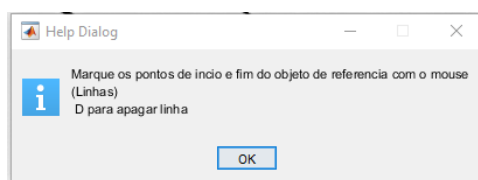


Figura 148 – Objeto de referência com a marcação dos pontos.

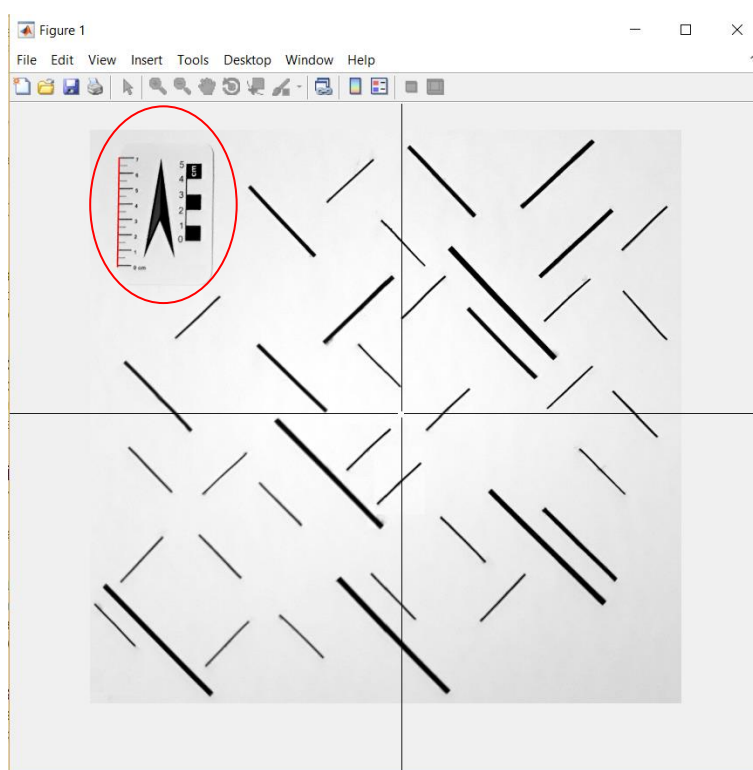
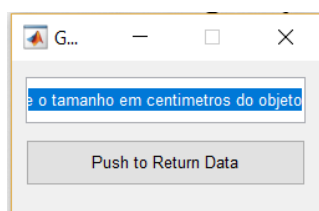


Figura 149 – Solicitação do tamanho do objeto de referência.



6 – A próxima etapa é a marcação dos pontos das fraturas e as aberturas, onde uma caixa de diálogo guia o usuário em cada etapa (Figura 150). Ao termino da marcação de cada

abertura a letra x deve ser digitada para validação dos pontos, Figura 151. Após inserir cada fratura o usuário pode digitar D para apagá-la e E para fim da adição das fraturas, Figura 152.

Figura 150 – Informações sobre marcação das fraturas.

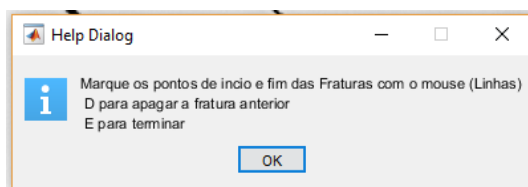


Figura 151 – Informações sobre marcação das aberturas.

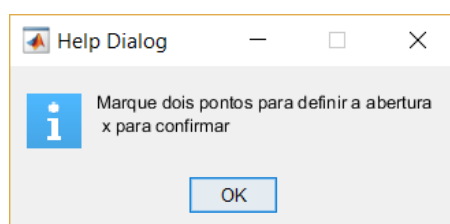
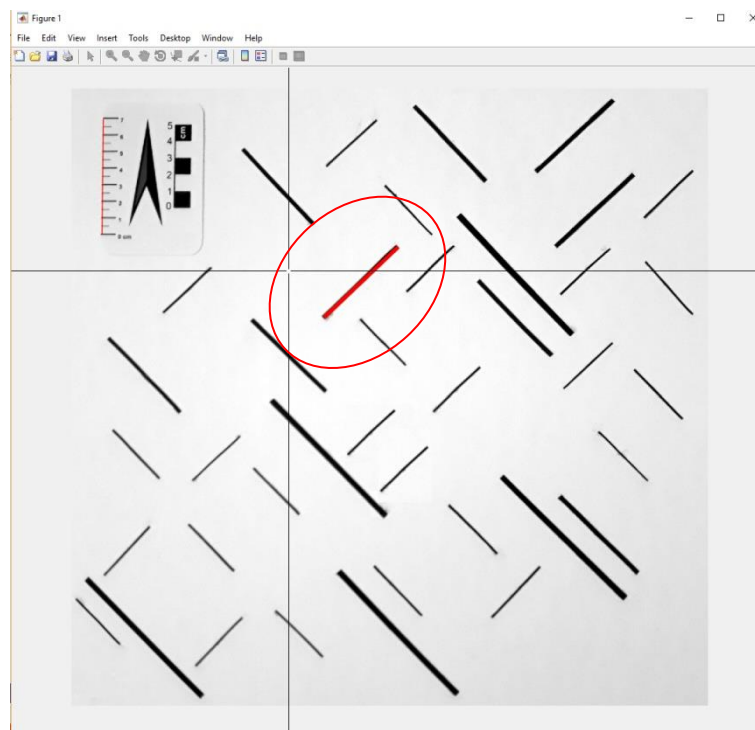


Figura 152 – Fratura adicionada.



7 – Na próxima etapa a imagem apenas com a marcação das fraturas é mostrada na tela, sendo solicitado ao usuário se deseja utilizar a *scanline* linear, Figura 153, e o número de

scanlines desejado Figura 154. Da mesma forma que a inserção de fraturas, marca-se o início e fim das *scanlines* Figura 155. Logo após aparece na tela o gráfico de lei de potência, a imagem com os padrões topológicos encontrados e o diagrama ternário com a porcentagem de nós I, Y e X.

Figura 153 – Opção de utilização da técnica *scanline* linear.

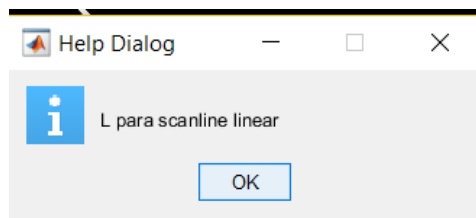


Figura 154 – Número de *scanlines*.

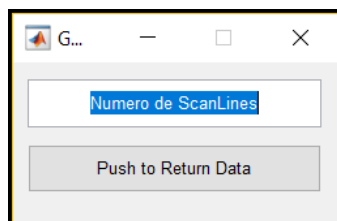


Figura 155 – Inserção das *Scanlines*.

