



Laboratório de Métodos
Computacionais em
Geomecânica

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

ANA ITAMARA PAZ DE ARAÚJO

SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FRATURAS EM ROCHAS
EMPREGANDO TÉCNICAS ESPECIAIS EM ELEMENTOS FINITOS

Recife

2019

ANA ITAMARA PAZ DE ARAÚJO

**SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FRATURAS EM ROCHAS
EMPREGANDO TÉCNICAS ESPECIAIS EM ELEMENTOS FINITOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de doutora em Engenharia Civil.

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

Orientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes.

Recife

2019

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

A663c Araújo, Ana Itamara Paz de.
 Simulação de geração e propagação de fraturas em rochas empregando técnicas
 especiais em elementos finitos / Ana Itamara Paz de Araújo. – 2019.
 139 folhas, il., gráfs., tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes.
 Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.
 Inclui Referências.

 1. Engenharia Civil. 2. Fraturas. 3. Elementos finitos. 4.
 Descontinuidades fortes. 5. Formação Crato. 6. Afloramentos análogos.
 I. Gomes, Igor Fernandes. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-143

ANA ITAMARA PAZ DE ARAÚJO

**SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FRATURAS EM ROCHAS
EMPREGANDO TÉCNICAS ESPECIAIS EM ELEMENTOS FINITOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de doutora em Engenharia Civil.

Aprovada em: 20/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Francisco César Costa Nogueira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Tiago Siqueira de Miranda (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Antônio Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esta tese as duas pessoas mais importantes de minha vida. A minha saudosa mãe Maria Lúcia Paz por tudo que fez por mim e ao meu grande companheiro Thiago Pacife de Lima (*in memoriam*) por sempre me manter no eixo durante toda minha vida acadêmica, dando-me força para vencer todos os obstáculos imposto pela vida. As saudades de vocês são eternas!

AGRADECIMENTOS

Agradecer é um ato de reconhecimento que não podemos caminhar sozinho. Sendo assim quero agradecer a todas as pessoas que contribuíram em minha formação pessoal e profissional, merecendo destaque:

Inicialmente agradeço a Deus, a Jesus Cristo e ao Espírito Santo, pela inteligência e desenvolvimento emocional que a santíssima trindade me concebeu para que pudesse chegar até aqui.

À minha mãe Maria Lúcia Paz (*in memorian*) por tudo o que ela sempre fez por mim, as saudades que sinto são eternas.

Ào meu amigo, companheiro, amor, parceiro de vida Thiago Pacife de Lima (*in memorian*), que muitas vezes no momento de angústia me ouvia e me dava ânimo para continuar, tenho certeza que não conseguiria chegar até aqui sem suas palavras.

À meu saudoso orientador, Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho (*in memorian*), por ter me recebido com tanto carinho e ter me mostrado que se eu quisesse eu posso chegar a qualquer lugar, a gratidão que tenho são eternas.

À meu pai Itamar Barros de Araújo, que apesar da distância não deixo de pensar nele e as minhas irmãs Ana Lúcia Paz de Araújo e Ana Virgínia Paz de Araújo que mesmo sem entender o que eu realmente faço, me incentivam e sentem orgulho de mim. Aos meus sobrinhos, Luana, Luanderson, Lucas e Nicolle, a tia ama vocês demais.

Aos amigos de vida: Fernanda Fabian, Duanne Gomes, Daiane Gomes, Pábola Cristine, Anderson Marcolino, Hélder Gramacho, Giovanna Molina, Alesandra Traesel, Kelmar dos Santos, Jadson Becker, Marcondes Marroquim, Maycon dos Santos, Marconi Pacman e Jonatha Daniel sou muito grata por ter vocês na minha vida.

À meu querido orientador, Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes, por ter aceitado o desafio de orientar-me no percorrer deste doutorado, pela atenção desde o primeiro contato contribuindo

para minha formação. E indo muito além de suas obrigações como orientador, ele não tem a noção da admiração que tenho pela pessoa humana e excelente profissional que és.

Aos professores do programa de pós-graduação em especial: Prof^a. Dr^a. Lícia Mouta da Costa pelo primeiro contato e pelas informações precisas que foram fundamentais para que eu pudesse tomar a decisão em participar do processo de seleção deste programa. Ao Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães pelo apoio, incentivo e conhecimento.

Aos professores Prof^a. Dr^a. Leila Brunet de Sá Beserra, Prof. Dr. José Antônio Barbosa e Prof. Dr. Tiago Siqueira Miranda pelas contribuições ao longo do doutorado e principalmente na fase de qualificação da tese.

Aos amigos de laboratório, merecendo destaque: Julliana Valadares, Jonathan, Rafael, Kátia, Daniela, Nayara, Alberto, Darliane, Aldemir, Bruno, Débora, Rayane, Raquel, Franklyn, Sávio, Laís, Laura, Oscar, Nina, Brito e Daniel pelo dia a dia, incentivo e compartilhamento de conhecimentos.

Aos amigos da LIGA DOS AMIGOS, da Igreja Adventista do sétimo dia, localizada na Várzea, vocês fazem com que eu me sinta mais próxima de Deus, acalma meu coração e me lembra que com Deus eu posso crescer e conseguir alcançar meus objetivos.

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

À Vânia, que com sua amizade e com seus cafezinhos maravilhosos sempre me deram combustível para continuar a caminhada firme e forte e a Antônio Brito pela alegria de viver.

Agradeço também à Capes e à Fundação CMG atualmente Energy Simulation, pelo apoio financeiro que recebi durante a pesquisa.

Por fim a todos que de forma direta e indireta me auxiliaram a chegar até aqui e os que não foram citados, MEU MUITÍSSIMO OBRIGADO.

RESUMO

Compreender o processo de geração e propagação de fraturas pode ser complexo uma vez que a formação rochosa pode apresentar heterogeneidades, dentre elas: fraturas, falhas, veios, concreções e em alguns casos feições carsticas. Uma abordagem disponível para entender esta complexidade é estudar afloramentos análogos a reservatórios de petróleo, as quais podem auxiliar na caracterização do meio geológico, bem como fornecer informações sobre dimensões das fraturas e suas possíveis conectividades. Esta tese estuda simulações numéricas no código *in house* CODE-BRIGHT, de geração e propagação de fraturas num calcário laminado da Formação Crato - NE, que pertence a Bacia do Araripe, sendo este considerado um afloramento análogo de feições carbonáticas do Pré-Sal brasileiro. As simulações foram divididas em três cenários distintos, com análises de descontinuidades fortes. Inicialmente, foi simulado o ensaio de compressão diametral, com intuito de modelar a formação de fraturas e determinar a resistência à tração do laminito, concomitantemente realizou-se a comparação com ensaios realizados em laboratório. As análises foram divididas em dois momentos, o primeiro empregando elementos finitos especiais de interface com a técnica de fragmentação de malha, na região central da amostra, possibilitando estudar a geração e propagação de fraturas. Em seguida realizou-se a simulação agregando a técnica de descontinuidades fortes incorporadas para a análise de geração de fraturas na laminação da rocha. Ambas as técnicas são baseadas na teoria de aproximação de descontinuidades fortes (ACDF). O segundo cenário consistiu em simular a geração e propagação de fraturas com esforços extensionais laterais normal a família de fraturas com direção de 340Az da Fm. Crato. O objetivo é realizar um estudo da geração destas fraturas e quantificar abertura e espaçamento entre elas, através da técnica de *scanlines*. Nesta simulação também foram inseridas descontinuidades fortes incorporadas representando, em um segundo momento, descontinuidades pré-existent de forma a avaliar sua influência sobre a geração e propagação das fraturas simuladas. Por fim, foi simulado um perfil de camadas de laminitos da Formação Crato considerando intercalações com outros tipos de litogias, com o objetivo de representar uma variação faciológica com propriedades geomecânicas diferentes entre si. Assim considerou-se uma secção vertical (2D) representativa da Fm. Crato, com a inserção de descontinuidade fortes incorporadas na angulação de mais ou menos 30°. As simulações realizadas nesta tese permitiram atingir o objetivo de estudar a geração e possíveis propagações de fraturas no meio rochoso com características das rochas carbonáticas do Pré-Sal brasileiro, mostrando compatibilidade na resposta mecânica realizada em laboratório.

Palavras-chave: Fraturas. Elementos finitos. Descontinuidades fortes. Formação Crato. Afloramentos análogos.

ABSTRACT

Understanding the fracture generation and propagation process can be complex since the rock formation may present heterogeneities, among them: fractures, faults, veins, concretions and in some cases karstic features. An approach available to understand this complexity is to study outcrops analogous to oil reservoirs, which can help in the characterization of the geological environment, as well as to provide information about fracture dimensions and their possible connectivity's. This thesis studies numerical simulations in the CODE-BRIGHT in-house code, for the generation and propagation of fractures in a laminated limestone of the Crato-NE Formation, which belongs to the Araripe Basin, being considered an analogous outcropping of Brazilian Pre-Salt carbonate features. The simulations were divided into three distinct scenarios, with analyses of strong discontinuities. Initially, the diametrical compression test was simulated in order to model the formation of fractures and determine the tensile strength of the laminate, concomitantly comparing with laboratory tests. The analyses were divided into two moments, the first using special finite elements interface with the mesh fragmentation technique, in the central region of the sample, making it possible to study the generation and propagation of fractures. Then the simulation was carried out by adding the technique of strong discontinuities incorporated for the analysis of fracture generation in the rock lamination. Both techniques are based on the theory of approximation of strong discontinuities (ACDF). The second scenario consisted in simulating the generation and propagation of fractures with lateral extensional stresses normal to the family of fractures with direction of 340Az of the Fm. Crato. The objective is to perform a study of the generation of these fractures and to quantify the aperture and spacing between them, through the technique of scanlines. In this simulation also incorporated strong discontinuities were inserted, representing, in a second moment, pre-existing discontinuities in order to evaluate their influence on the generation and propagation of the simulated fractures. Finally, a profile of laminate layers of the Crato Formation was simulated considering interlacing's with other types of lithography, in order to represent a faciological variation with different geomechanical properties. Thus, a vertical section (2D) representative of the Fm. Crato, with the insertion of strong discontinuity incorporated in the angulation of plus or minus 30°. The simulations carried out in this thesis allowed to reach the objective of studying the generation and possible propagation of fractures in the rocky medium with

characteristics of the Brazilian Pre-Salt carbonate rocks, showing compatibility in the mechanical response performed in the laboratory.

Keywords: Fractures. Finite elements. Strong discontinuities. Formation Crato. Analog outcrops.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Detalhes de tipos de fraturas no meio rochoso.....	24
Figura 2 -	Esquema dos Principais ensaios de resistência de ruptura.....	25
Figura 3 -	Exemplo de afloramento análogo, localizado na Formação Crato.....	28
Figura 4 -	Relação entre tamanho, comprimento e abertura de fraturas.....	29
Figura 5 -	Mapa simplificado da Bacia do Araripe.....	31
Figura 6 -	Evolução da Bacia do Araripe.....	32
Figura 7 -	Exposição de um nível de calcário laminado da Formação Crato em uma pedreira na região de Nova Olinda, CE.....	33
Figura 8 -	Exemplos da ocorrência das fraturas extensionais nos calcários laminados da Formação Crato.....	34
Figura 9 -	Elementos básicos da mecânica dos sólidos.....	36
Figura 10 -	Superfície de descontinuidades S	38
Figura 11 -	Seção transversal.....	40
Figura 12 -	Princípio de deformação equivalente.....	41
Figura 13 -	Evolução da Variável de dano. Curva de tensão-deformação.....	43
Figura 14 -	Curva tensão-deformação para diferentes comportamentos pós-ruptura.....	43
Figura 15 -	Funções de evolução da variável interna $q(r)$	45
Figura 16 -	Projeção do vetor de tensões na direção normal a base do elemento de interface...	46
Figura 17 -	Algoritmo IMPL-EX de integração de tensões para o modelo de dano à tração.....	48
Figura 18 -	Representação do Elemento Finito de Alta Razão de Aspecto.....	49
Figura 19 -	Principais passos associados à técnica de fragmentação de malhas.....	51
Figura 20 -	Detalhe do posicionamento dos elementos de interface entre os elementos regulares da malha de elementos finitos.....	52
Figura 21 -	Exemplo esquemático de um elemento geométrico representando um corpo com descontinuidades incorporadas.....	53
Figura 22 -	Representação esquemática demonstrando a decomposição do campo de deslocamentos.....	54
Figura 23 -	Sub-rotina que divide em dois materiais a descontinuidade incorporada.....	57
Figura 24 -	Etapas operacionais das simulações.....	58
Figura 25 -	Ensaio de Compressão Diametral.....	61
Figura 26 -	Curva de evolução de carga diametral antes e pós-ruptura.....	63
Figura 27 -	Evolução do Dano e Abertura de Fraturas, em metros, para o passo de tempo 4 a	

6.....	64
Figura 28 - Variável de Dano à tração e abertura de fratura.....	65
Figura 29 - Evolução do dano e abertura (metros) de fratura.....	65
Figura 30 - Região de análise de ocorrência de dano e tendência de fraturamento lateral: elementos finitos selecionados.....	66
Figura 31 - Evolução da variável de Dano para os elementos da região com dano lateral.....	66
Figura 32 - Evolução das tensões horizontais (x) e tensões verticais (y).....	67
Figura 33 - Amostra com elementos incorporados.....	68
Figura 34 - Evolução das tensões verticais.....	69
Figura 35 - Comparação das evoluções das tensões verticais (elemento incorporado) e tensões horizontais (elemento localizado no centro do corpo de prova).....	71
Figura 36 - Comparação das evoluções de carga diametral pré e pós-ruptura.....	71
Figura 37 - Variável de dano e abertura de fratura.....	72
Figura 38 - Destaque dos elementos incorporados e suas respectivas aberturas.....	74
Figura 39 - Condições de contorno.....	75
Figura 40 - Padrão de fraturas geradas aleatoriamente, observado em diferentes escalas seguindo a lei de potência que melhor se ajustou aos dados do micro e macro <i>scanline</i>	76
Figura 41 - Resultados de geração de fraturas extensionais.....	78
Figura 42 - Destaque na evolução e interação entre as fraturas gerada em cada estágio de carregamento.....	79
Figura 43 - Detalhe das fraturas geradas: dimensões e espaçamento em metros.....	80
Figura 44 - Ilustração do meio fraturado numericamente e sua relação com as observações de campo.....	81
Figura 45 - Distribuição de tensões horizontais.....	82
Figura 46 - Curvas de tensões x tempo.....	83
Figura 47 - Distribuição de tensões cisalhantes.....	83
Figura 48 - Distribuição de variáveis para o estágio pós fraturamento.....	84
Figura 49 - Estudo das <i>scanlines</i> lineares na simulação.....	85
Figura 50 - Estudo das <i>scanlines</i> lineares na simulação com novo ajuste sem os artefatos.....	86
Figura 51 - <i>Scanlines</i> de campo.....	88
Figura 52 - Comparação das <i>scanlines</i> de campo com as <i>scanlines</i> da simulação, dado de frequência acumulada em escala linear.....	89

Figura 53 -	Estudo das <i>scanlines</i> lineares na simulação.....	90
Figura 54 -	Comparações das <i>scanlines</i>	92
Figura 55 -	Comparação das <i>scanlines</i> de campo com as <i>scanlines</i> obtidas na simulação ao longo do meio rochoso.....	93
Figura 56 -	Malha de elementos finitos.....	94
Figura 57 -	Distribuição de tensões horizontais e cisalhantes.....	95
Figura 58 -	Estudo das <i>scanlines</i> lineares da simulação com família de fraturas inclinadas.....	97
Figura 59 -	Comparação das <i>scanlines</i>	99
Figura 60 -	Comparação das <i>scanlines</i> de campo com as <i>scanlines</i> obtidas na simulação com inserção de descontinuidades na direção inclinada.....	100
Figura 61 -	Malha de elementos finitos.....	101
Figura 62 -	Distribuição de tensões horizontais e cisalhantes.....	102
Figura 63 -	Estudo das <i>scanlines</i> lineares na simulação com família de fraturas inclinadas.....	104
Figura 64 -	Comparação das <i>scanlines</i>	106
Figura 65 -	Comparação das <i>scanlines</i> de campo com as <i>scanlines</i> obtidas na simulação com inserção de descontinuidades na direção horizontal.....	107
Figura 66 -	Detalhamento do domínio e condições de contorno.....	108
Figura 67 -	Perfil de aquisição de dados para o estudo de estratigrafia mecânica de laminitos em afloramento da Fm. Crato, na Mina Três Irmãos: Variação das fácies mecânicas.....	109
Figura 68 -	Detalhamento do domínio e da malha de elementos finitos.....	110
Figura 69 -	Distribuição das tensões horizontais.....	111
Figura 70 -	Evolução da curva de tensões horizontais.....	113
Figura 71 -	Variável de dano com fator de ampliação 80 vezes.....	114
Figura 72 -	Detalhe de uma amostra da região fraturada: Interação das fraturas geradas nas 02e 04 com as camadas de base e capeadora (setas pretas indicando fraturas visíveis).....	115
Figura 73 -	<i>Scanlines</i> distribuídas ao longo das feições.....	115
Figura 74 -	Dados de <i>Scanlines</i> sem artefatos.....	118
Figura 75 -	Perfil de aquisição de dados para estudo de estratigrafia mecânica de laminitos da Fm. Crato, localização de fraturas extensionais ao longo do perfil com destaque para fraturas confinadas nas camadas 1 e 2.....	120
Figura 76 -	Propagação de fraturas entre diferentes intervalos mecânicos.....	121

Figura 77 -	Distribuição das tensões horizontais.....	122
Figura 78 -	Evolução da curva de tensões horizontais.....	123
Figura 79 -	Variável de dano.....	124
Figura 80 -	Detalhe da amostra da região fraturada: Interação das fraturas entre as diferentes camadas e o destaque do efeito <i>en échelon</i> ocorrido nas das fraturas	125
Figura 81 -	<i>Scanlines</i> distribuídas ao longo das feições.....	125
Figura 82 -	Dados de <i>Scanlines</i> sem artefatos.....	128
Figura 83 -	Comparação das <i>Scanlines</i> sem artefatos e a frequência acumulada mediana.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Propriedades dos Materiais empregados na simulação de Compressão Diametral.	62
Tabela 2-	Propriedades dos Materiais empregados no modelo de mapa de fraturas extensionais.....	76
Tabela 3-	Propriedades dos Materiais empregados no modelo de fraturas extensionais em perfil.....	110
Tabela 4-	Propriedades mecânicas da descontinuidade incorporada.....	121

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVO GERAL	20
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.3	ESTRUTURA DO TEXTO	21
2	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1	FRATURAS	23
2.1.1	Técnica de <i>scanlines</i> linear	29
2.1.2	Contextualização geológica da Formação Crato	31
3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	35
3.1	EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO DE TENSÕES	35
3.1.1	Equações de conservação de massa para fase sólida	37
3.1.2	Cinemática de descontinuidades	38
3.2	EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MODELO CONSTITUTIVO DE DANO	39
3.3	MODELO CONSTITUTIVO DE DANO À TRAÇÃO	44
3.3.1	IMPL-EX Aplicado ao Modelo Constitutivo de Dano à Tração	47
4	TÉCNICAS DE ELEMENTOS FINITOS	49
4.1	ELEMENTOS FINITOS DE INTERFACE DE ALTA RAZÃO DE ASPECTO EM PROBLEMA MECÂNICO	49
4.1.1	Técnica de Fragmentação da Malha	51
4.2	ELEMENTOS FINITOS COM DESCONTINUIDADES FORTES INCORPORADAS	53
4.3	INTEGRAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ELEMENTOS FINITOS DE INTERFACE DE ALTA RAZÃO DE ASPECTO E DESCONTINUIDADES FORTES INCORPORADAS	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	60
5.1.1	Rocha Intacta	62
5.1.2	Rocha com Elementos Incorporados	68
5.2	GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FRATURAS EXTENSIONAIS EM MAPA	74
5.2.1	Rocha Intacta	77
5.2.2	Rocha com Elementos Incorporados: Fraturas naturais pré-existent (fratura EW: Leste-Oeste)	93
5.2.3	Rocha com Elementos Incorporados Posição Horizontal	100
5.3	GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FRATURAS EXTENSIONAIS EM PERFIL DA FM. CRATO CONSIDERANDO HETEROGENEIDADE GEOMECÂNICA DAS	

FEIÇÕES.....	107
5.3.1 Rocha Intacta	111
5.3.2 Rocha com Elementos Incorporados.....	121
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	131
6.1 CONCLUSÕES	131
6.2 RECOMENDAÇÕES.....	132
REFERENCIAS.....	133

1 INTRODUÇÃO

No Brasil recentemente foi descoberta uma espessa camada de sal onde abaixo deste encontram-se um extenso e complexo reservatório carbonático de petróleo chamado de pré-sal. Esta descoberta foi a maior já realizada em todo território brasileiro e uma das maiores em todo mundo (Lopes *et al.*, 2017). A camada abrange cerca de 800 km de extensão e está localizada ao longo da costa sudeste brasileira a 7.000 m abaixo do nível do mar, onde o óleo está armazenado principalmente em rochas carbonáticas.

Com esta descoberta fez-se necessários estudos com o objetivo de exploração e produção de petróleo, sendo estes estudos de alta complexidade onde uma das principais dificuldades é a heterogeneidade da formação, que ocorre em múltiplas escalas diante da presença de diversas estruturas geológicas, tais como, fraturas, falhas, veios e feições carsticas. Tais condições influenciam totalmente na predição e produção de gás e óleo do reservatório.

Uns dos artifícios usados para estudar e caracterizar o reservatório de petróleo é estudar afloramentos análogos que, segundo Miranda *et al.*, (2012), caracterizam-se como formações rochosas que podem ser acessadas em superfície e que apresentam semelhanças com alvos exploratórios em subsuperfície. Afloramentos análogos de reservatórios existem para quase todas as geometrias de reservatório em subsuperfície (Geiger & Matthai, 2012).

Devido à dificuldade de capturar logs de imagens do subsolo, os afloramentos são uma oportunidade de investigar as características das fraturas. Isso se aplicada, sobretudo as dimensões das fraturas e as relações de conectividade entre si, podendo também ser estudados a orientação e avaliar as redes de fraturas e seus aspectos gerais (Mercadier & Makel, 1991; Van Dijk 1998).

Então, busca-se um afloramento análogo litofaciológico que mais se aproxime das características geológicas do reservatório a ser desenvolvido. Características estas como, os sistemas de fraturas e falhas, pois sua importância é grande com relação ao armazenamento e fluxo de fluidos, que ocorrem em reservatórios naturalmente fraturados representa um aspecto importante, em especial para reservatórios carbonáticos (SANTOS, 2017).

Logicamente todos os reservatórios de petróleo são naturalmente fraturados em diferentes tipos de escalas e grau de observação. Sendo que, estas falhas podem ser naturais ou causadas por interações de tensões atuantes no meio, ou até mesmo sendo induzidas pela atividade de perfuração, ou aumento na pressão de poros em operações de injeção de fluidos, resultando na redistribuição do estado de tensões/deformações atuantes na produção do campo (Priest, 1993; Marret, 2007; Agar *et al.*, 2010).

Portanto, simular problemas que represente as características dos sistemas de falhas e fraturas de reservatório de petróleo a partir de modelos geológicos é de total interesse para indústria do petróleo, porque melhora a confiabilidade do modelo tanto no gerenciamento e previsão da produção, quanto para o ajuste histórico (SANTOS, 2017).

Nesta tese o afloramento análogo que será estudado é um calcário laminado localizado na Formação Crato. Este afloramento tem sido utilizado com o objetivo de estudar reservatórios no intervalo do pré-sal das Bacias de Santos e Campos, na margem sudeste do país (CATTO *et al.*, 2016; MIRANDA, 2015; SANTOS *et al.*, 2017; ZIHMS, 2017; MIRANDA *et al.*, 2018).

Este afloramento foi escolhido devido à facilidade do acesso aos afloramentos de calcário laminado podendo alcançar até 20 metros de altura e até centenas de metros de exposição lateral (ALENCAR, 2018).

O estudo dos geomateriais torna-se importante, pois, quando estes são submetidos a variações de tensões os materiais tendem a apresentar comportamento *in-situ* de tensões-deformações. As variações das tensões podem levar o material à ruptura, gerando um meio rochoso com várias famílias de fraturas. Portanto tendo em vista esta problemática, a intensão desta tese é simular a geração e propagação de famílias de fraturas extensionais em rochas calcárias baseados em laminitos da Formação Crato, considerando as propriedades geomecânicas obtidas através de ensaios de laboratório.

As simulações realizadas empregam o uso de duas técnicas de elementos finitos: Técnica de elementos finitos de interface de alta razão de aspecto concomitantemente com a técnica de fragmentação e Técnica de descontinuidades fortes incorporadas (MANZOLI, 2012; SÁNCHEZ *et al.*, 2014; BESERRA, 2015; MAEDO, 2015; SEIXAS, 2015; MACIEL, 2017). A primeira técnica é empregada para simular a abertura e possivelmente a propagação de fraturas. Já a segunda técnica é utilizada para simular fraturas pré-existentes que dependendo das tensões atuantes no meio pode ou não ser reativadas.

Os exemplos numéricos analisados foram simulados no código numérico de elementos finitos CODE-BRIGHT (Coupled DEformation BRine Gas and Heat Transport) (Olivella *et al.*, 1996) aliada ao modelo constitutivo de dano à tração (MANZOLI, 2012; SÁNCHEZ *et al.*, 2014; BESERRA, 2015; SEIXAS, 2015).

Finalmente, apresenta-se aqui a análise de geração e propagação de fraturas, utilizando técnicas de descontinuidades fortes, considerando dados de caracterização geológica e geomecânica das rochas da Fm. Crato. E as simulações de compressão diametral, com o

objetivo de verificar a resistência à tração do material, e as simulações de geração e propagação de fraturas extensionais em mapa e a geração e propagação de fraturas extensionais em perfil considerando a heterogeneidade geomecânica das feições.

Esta pesquisa foi desenvolvida com o apoio financeiro da Petrobras Petróleo Brasileiro, dentro do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) relacionado abaixo:

- **MODELAGEM DE FRATURAS E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FENÔMENOS ACOPLADOS EM RESERVATÓRIO ANÁLOGO NATURALMENTE FRATURADO, BACIA DO ARARIPE, NE BRASIL – PROJETO GÖDEL.** Instituição financiadora: PETROBRÁS PETROLEO BRASILEIRO S/A. Unidade Executora: FADE/ Laboratório de Geologia Sedimentar e Ambiental – LAGESE. Período: 2015-2017.

1.1 OBJETIVO GERAL

Esta tese tem como objetivo integrar as técnicas de elementos finitos que estão baseadas na teoria de Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes (ACDF), para modelar numericamente a formação e propagação de fraturas considerando dados de afloramentos análogos de calcários laminados. As técnicas aqui utilizadas são: Técnica de elementos especiais de interface de alta razão de aspecto e a técnica de descontinuidades fortes incorporadas. Estas técnicas serão utilizadas para estudar a geração e propagação de fraturas em rochas calcárias através do modelo constitutivo de dano a tração.

Esta integração irá auxiliar na compreensão dos processos de geração de fraturas em meios onde existem descontinuidades ocasionadas por dano à tração, como por exemplo, aberturas de fraturas e como as mesmas se propagam. Proporcionou-se o estudo do processo de formação e interação entre as fraturas geradas e a influência de outras estruturas geológicas pré-existentes, como: falhas, fraturas, veios, concreções e etc.

Os resultados obtidos foram comparados com dados de caracterização geológica de afloramentos análogos da Formação Crato e dados de ensaios de laboratório.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a integração das técnicas de elementos finitos: técnica de elementos especiais de interface de alta razão de aspecto e a técnica de descontinuidades fortes incorporadas, utilizando o modelo constitutivo de dano à tração;
- Realizar a simulação numérica do ensaio experimental de compressão diametral, mais conhecido com ensaio brasileiro que representará a ruptura do material por tração de laminito característicos da Formação Crato;
- Efetuar comparações dos resultados da evolução de carga diametral dos dados numéricos e experimentais obtidos no ensaio de compressão diametral;
- Simular esforços extensionais laterais na direção normal da família 1 (340Az) de fraturas para verificar o nível de tensões aos quais estas são geradas, e por sua vez, a interação entre as fraturas geradas;
- Simular a geração e propagação de fraturas extensionais em um perfil de camadas de laminitos da Formação Crato considerando intercalações com outros tipos de litologias para representar uma variação faciológica com impacto na competência mecânica das camadas sobre a gênese e propagação das fraturas extensionais.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

Esta tese está estruturada em seis capítulos. No capítulo 1 foi introduzido à problemática e a motivação do tema abordado nesta tese e os objetivos, subdivididos em objetivo geral e objetivos específicos.

O capítulo 2 “*Revisão Bibliográfica*” apresenta bibliografias que tratam das seguintes temáticas: Definição de fraturas e seus respectivos tipos. O estudo de eventos físicos e experimentais para a geração e propagação de fraturas. Tipos de reservatórios fraturados. Afloramentos análogos, como uma ferramenta importante nos estudos de reservatórios carbonáticos do Pré-Sal brasileiro. A técnica de *scanlines*. Neste capítulo será apresentada ainda, uma breve contextualização geológica da Formação Crato.

O capítulo 3 “*Formulação Matemática*” apresenta as equações governantes do modelo mecânico. O modelo constitutivo de dano. O modelo constitutivo de dano à tração, o algoritmo IMPL-EX aplicado ao modelo constitutivo de dano à tração e a formulação da cinemática de descontinuidades.

O capítulo 4 “*Técnicas de Elementos Finitos*” neste capítulo foi abordado duas técnicas de elementos finitos que são: Elementos finitos de interface de alta razão de aspecto em problemas mecânicos, juntamente com o emprego da técnica de fragmentação e a técnica de descontinuidades fortes incorporadas. Posteriormente será apresentada a junção de tais técnicas com o objetivo de simular modelos que estude a geração e propagação de fraturas em afloramentos análogos da Formação Crato.

O capítulo 5 “*Resultados e Discussões*” descrevem os casos simulados e realiza uma análise dos resultados obtidos.

No capítulo 6 “*Conclusões e Recomendações*”, são descritas as sínteses dos resultados alcançados, assim como as sugestões para futuros trabalhos. Finalizando com as Referências Bibliográficas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo trata inicialmente de revisão da literatura sobre fraturas e seus respectivos tipos, geração e propagação de fraturas em rochas intactas, reservatórios naturalmente fraturados e fraturas em afloramentos análogos. Logo em seguida, será discutida a técnica de *scanlines* que será utilizado para estudar a abertura e espaçamento das fraturas. E finalmente será apresentada uma contextualização geológica da Formação Crato.

Os reservatórios são em geral naturalmente fraturados e por consequência estas fraturas influenciam na capacidade de armazenamento e, especialmente o fluxo no interior da rocha reservatório. Com isso as propriedades mecânicas da rocha são afetadas, exemplo: redistribuições das tensões *in-situ* e resistência da rocha. Portanto reservatórios fraturados são reservatórios em que a produção e recuperação são influenciadas por fraturas de menor ou maior extensão (G. H. MAKEL, 2007). A variabilidade na interconectividade da rede de fratura mostra o comportamento de produção dos hidrocarbonetos.

2.1 FRATURAS

As fraturas são estruturas multiescalares sua predição e o entendimento de ocorrência é essencial, já que tais descontinuidades ocorrem na maioria das vezes por eventos sísmicos.

A sísmica é uma interpretação considerada de fonte indireta a estruturas de falhas, pois analisa a distribuição de fraturas e o desenvolvimento de subestruturas relacionadas à tensão/deformação da matriz rochosa. A velocidade da sísmica pode ser determinada por atributos espaciais de fraturas menores com relação à resolução da medição sísmica (Hudson, 1981; Crampin, 1981; Armstrong *et al.*, 1994; Lynn, 2004).

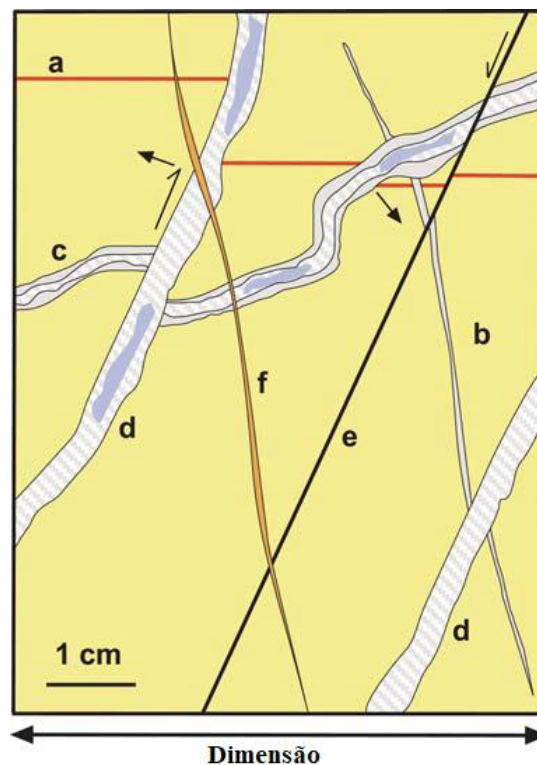
A distinção entre os tipos de fratura é importante porque sua distribuição espacial e características de dimensão podem ser significativamente diferentes (Odling *et al.* 1999; Cacas *et al.* 2001). A informação ajudará a subdividir as fraturas em conjuntos específicos, determinar relações de idade e, em geral fornecer indicadores importantes para a história estrutural (Hancock 1985).

Para realizar a distinção entre fraturas geradas por cisalhamento e fraturas geradas por tração faz-se necessário verificar o testemunho da parte central da fratura (Kulander *et al.* 1990; Loosveld & Franssen 1992). Tipos de fraturas e a relação espacial entre elas, especialmente entre fraturas que ocorrem o efeito de *en échelon* permite uma avaliação nas

tensões *in-situ* da formação rochosa (Olsen e Pollard, 1989). A Figura 1 detalha os tipos de fraturas que podem ocorrer num meio rochoso, de acordo com (G. H. MAKEL, 2007):

(a) Fraturas que surgem por efeito de compactação; (b) Meio rochoso separado em dois componentes, fratura aberta; (c) Fratura ocasionada hidraulicamente, com partes cimentadas; (d) Fratura ocasionada por tração, abertura ocasionada de forma mecânica; (e) Fratura por cisalhamento e (f) Fratura aberta por tração.

Figura 1 - Detalhes de tipos de fraturas no meio rochoso.



Fonte: G. H. MAKEL, 2007.

A geração e propagação de fratura em uma rocha intacta é um aspecto físico de fundamental importância no estudo de meios rochosos naturalmente fraturados, uma vez que para entender as características mecânicas e hidráulicas de um maciço rochoso, torna-se necessário a análise do comportamento mecânico da rocha intacta (E. Hoek *et al.*, 2014).

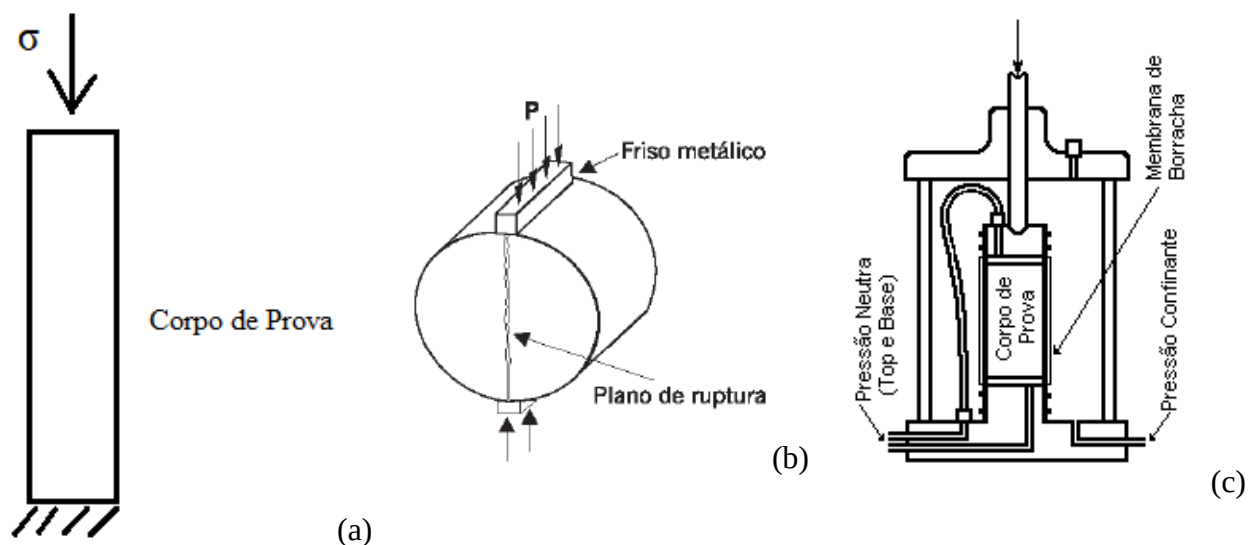
Isto envolve basicamente eventos físicos ocasionados por exumação que é o resfriamento das rochas e/ou abalos sísmicos, e por eventos experimentais que são estudos de laboratório em amostras considerando diferentes escalas de medidas e formas de obtenção, testemunhos de poços de petróleo, amostragem de afloramentos, amostras em minas subterrâneas, amostras de solos e rochas entre outros. Um aspecto importante é que na maioria dos tipos de rochas, o tamanho dos grãos é pequeno em relação à escala das amostras

estudadas mecanicamente e com isso considera-se uma condição de homogeneidade e isotropia.

Para obter as características das rochas intactas e por sua vez prever a resistência de ruptura deste material existem vários ensaios que podem ser realizados em laboratório, sendo mais simples o ensaio de compressão uniaxial que consiste em aplicar uma carga uniaxial, ou seja, aplicar uma carga em uma única direção com taxa constante de carregamento e/ou deformação para determinar os parâmetros da rocha.

Mais um exemplo de ensaio é o de compressão diametral, mais conhecido como ensaio brasileiro, o qual consiste em medir a resistência à tração de materiais frágeis pela compressão diametral de um corpo cilíndrico, mantendo o eixo de revolução paralelo aos pratos de transmissão de carga de prensa. O corpo de prova é carregado até a ruptura que ocorre pela resistência à tração. Outro exemplo que pode ser citado é o ensaio triaxial que consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre o corpo de prova cilíndrica do solo. A Figura 2 resume bem estes três ensaios citados acima.

Figura 2 - Esquema dos Principais ensaios de resistência de ruptura.



Fonte: Adaptado de NBR 7222/2011.

(a) Ensaio Uniaxial; (b) Ensaio de Compressão diametral; (c) Ensaio Triaxial.

Portanto através desses principais ensaios de laboratório, pode-se verificar a resistência de ruptura do material (solo, rocha e etc). Existem atualmente diversos métodos numéricos que se aplicam à análise mecânica de geração e possíveis propagações de fraturas.

Lee H. P *et al.* (2018) e Lee H. P *et al.* (2016) discutem a propagação de fraturas através do fraturamento hidráulico em reservatórios naturalmente fraturados. O material estudado tem características de *Marcellus shale*, que consiste em um folhelho que possibilita estudar as heterogeneidades mecânicas, como rigidez, resistência, que contribuem para o desenvolvimento complexo de redes de fraturas hidráulicas. Nestes mesmos artigos são realizadas comparações dos resultados numéricos e experimentais quantificando o comprimento da distância do desvio da fratura para mostrar o efeito de veios e penetração, causando desvio e aberturas de fraturas. Numericamente o modelo utilizado é o método de elementos discretos (DEM) sendo este um método direto que possibilita modelar o processo de interação entre fraturas.

Em Lisjak A. *et al.*, (2014) dá-se ênfase na simulação de descontinuidades no meio rochoso, sendo que estuda a propagação de fraturas combinando os métodos de elementos finitos e o método de elementos discretos (FDEM), surgindo como uma ferramenta numérica alternativa para aplicações na mecânica das rochas que considera explicitamente os processos de fratura e fragmentação do meio.

Kaserani T. (2013) apresenta um estudo de descontinuidades baseado no modelo do contínuo para investigar falhas em rochas sedimentares. Para as análises foram utilizados dois códigos (PFC) que é um código que trata as leis de fluxo e (UDEC) que consiste num código de elemento discreto universal. O método utilizado é o de elementos discretos (DEM) com o objetivo de capturar as sequências de separação e reinserção que são observados no processo de fragmentação de materiais frágeis.

Nos reservatórios fraturados a produção e a recuperação são influenciadas pela existência de fraturas de escala micro ou macro. De acordo com Nelson (2001) e Quing Sun (2003), estes reservatórios fraturados podem ser subdivididos em quatro diferentes tipos, de acordo com as propriedades da rocha matriz e das fraturas:

- **Reservatórios Tipo 1:** São reservatórios com baixíssima porosidade e baixa permeabilidade, as fraturas têm capacidade de armazenamento de fluídos e fornecem tanto caminhos para armazenamento quanto de fluxo;
- **Reservatórios Tipo 2:** Possuem característica de baixa porosidade e baixa permeabilidade, as fraturas são vias de fluxos, responsáveis pela permeabilidade e a matriz tem característica de armazenamento de fluídos;
- **Reservatórios Tipo 3:** São reservatórios de alta porosidade e baixa permeabilidade, a matriz armazena fluídos e as fraturas também são vias de fluxo, a produção está

relacionada a matriz, este reservatório é adequado para a recuperação secundária e terciária;

- **Reservatórios Tipo 4:** Possuem alta porosidade e alta permeabilidade, a matriz fornece armazenamento de fluídos, e as fraturas aumentam com a permeabilidade.

A variação na conectividade da rede de fraturas, na arquitetura e nas propriedades da matriz, são as razões básicas para surgir fraturas nos reservatórios, apresentando uma grande variedade no comportamento dos hidrocarbonetos durante a produção. Essas incertezas fazem com que a avaliação, desenvolvimento e gestão de reservatórios fraturados se tornem um desafio, já que ao avaliar as incertezas de forma incorreta pode acarretar numa recuperação de hidrocarbonetos ineficaz (G. H. MAKEL, 2007).

Portanto, o ponto de partida natural para a análise de um reservatório fraturado é a coleta e processamento de dados de fratura seguidos de análise dos aspectos geométricos desses dados. Em conjunto com a análise geométrica, os dados dinâmicos devem ser analisados para calibrar as possíveis faixas de interconectividade da rede. Dados adicionais, como por exemplo, os provenientes de sísmica devem ser analisados e novamente calibrados com dados estáticos e dinâmicos para restringir a interposição espaço. Esta análise integrada leva a formulação de modelos conceituais e regras para construção do modelo de rede de fratura.

Para que o modelo fique o mais próximo possível da rocha reservatório, utiliza-se o artifício de estudar os afloramentos análogos. Estes possuem um papel de suma importância na caracterização de um reservatório de petróleo, visto que os mesmos podem ser observados a céu aberto. Para um afloramento ser considerado análogo precisa-se inicialmente fazer um estudo da história estrutural e da formação do meio geológico. Esta prática atualmente tem sido bastante utilizada já que os resultados são considerados bons (Barton & Zoback, 1992; Marret *et al.*, 1999; Ortega *et al.*, 2006; Etminan and Seifi, 2008; Santos, 2017).

Desta forma, a aquisição das medidas em campo dessas estruturas merece a devida atenção para que se tenha um modelo geológico com a caracterização de acordo ao reservatório que se queira estudar. A Figura 3 apresenta um modelo de afloramento.

Figura 3 - Exemplo de afloramento análogo, localizado na Formação Crato.



Fonte: Relatório Projeto Crato/UFPE/Petrobras (2017).

Todavia para obter os dados em campo, como abertura de fraturas e a frequência de fraturas, que são parâmetros essenciais na caracterização que definem um padrão de fraturamento são necessárias de que vários cuidados sejam tomados. Nesta tese os parâmetros que são levados em consideração para caracterizar a distribuição de fraturas são: frequência e a abertura de fraturas, obtidas através da técnica de *scanlines*.

Sendo assim, existem vários métodos e modelos que podem ser utilizados para simular a propagação de fraturas em meios rochosos. Nesta tese o método é baseado em elementos finitos (MEF) que emprega uma conformidade de interpolação e deslocamento e deve ser reforçada para acomodar as deformações descontínuas. Se a descontinuidade é conhecida desde o início, podem-se alinhar os lados dos elementos finitos para conformar com a descontinuidade e empregar a não linearidade (LAUSEN, 2003; WRIGGERS, 2006; SANZ *et al.*, 2007). No entanto as fraturas podem propagar em direções aleatórias, neste caso não será possível especificar as superfícies de cisalhamento a princípio.

O modelo constitutivo de Dano à tração (Ver item 3.3) é considerado como uma importante ferramenta na simulação de degradação mecânica de materiais quase frágeis, como por exemplo, o concreto e as rochas.

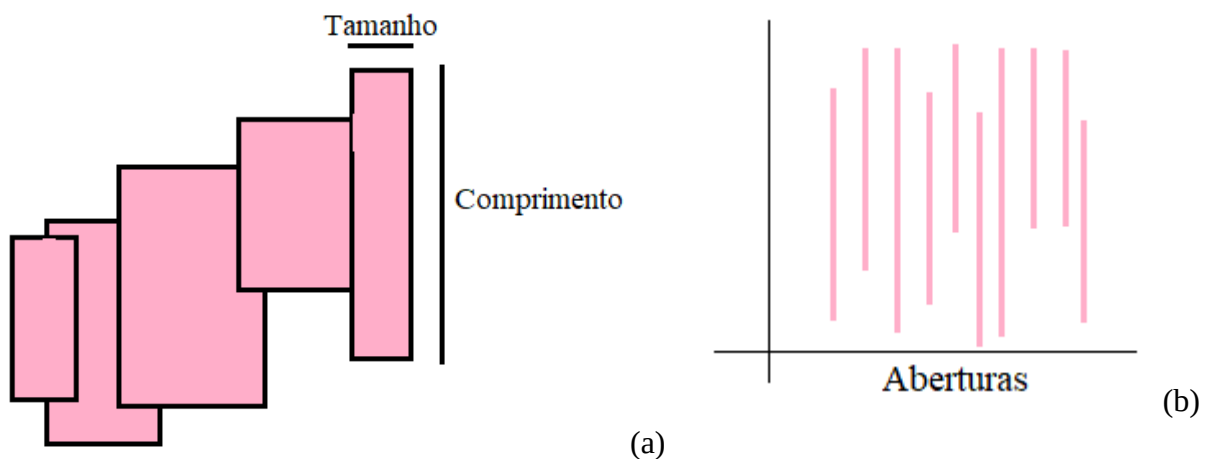
2.1.1 Técnica de *scanlines* linear

As fraturas existem em uma grande variedade de escalas, desde a escala micro até a escala de centenas de quilômetros. Por isso, podem-se encontrar fraturas em escala de poros até escala de afloramento ou continental. Essa variedade tem efeito significativo nos processos de obtenção de padrões de fraturas das estruturas geológicas.

Alguns modelos estatísticos vêm sendo utilizados recentemente para contribuir com o melhor entendimento e caracterização dos sistemas de fraturas (Rouleau and Gale, 1985; Dershowitz, 1992; Gelhar, 1993; Guerriero *et al.*, 2013). De posse de um bom modelo pode-se também fazer previsões e correlações em diversas escalas de medida.

A técnica de *scanline* (Ortega *et al.*, 2006; Priest, 1993) representa uma abordagem baseada na leitura das dimensões das aberturas das fraturas e dos espaçamentos entre elas. Essas leituras podem ser feitas, principalmente, em geometrias lineares e circulares. Muitos trabalhos utilizando scanlines têm sido desenvolvidos desde os estudos iniciados por Priest & Hudson (1976) para prever a frequência de fraturas que poderia ser observada em qualquer direção. A Figura 4 mostra a relação em tamanho, comprimento e abertura das fraturas.

Figura 4 - Relação entre tamanho, comprimento e abertura de fraturas.



Fonte: A Autora, 2018.

(a) Tamanho e comprimento; (b) Aberturas.

A *scanline* linear é uma técnica que mede, em uma linha reta de comprimento especificado, valores da direção, aberturas, distância a um referencial e demais características de interesse existentes em um sistema de fraturas. Este tipo de técnica ou método é bastante utilizado para caracterizar padrões de fraturamentos em afloramentos (Priest, 1993;

Grossenbacher *et al.*, 1997; Mauldon & Mauldon, 1997; Mauldon *et al.*, 2001; Ortega *et al.*, 2006).

Contudo, o método de *scanline* linear representa uma abordagem simples capaz de fornecer dados dos com respeito ao fraturamento das formações.

O método de *scanline* linear representa uma abordagem simples capaz de fornecer dados relacionados ao fraturamento das formações. Muitos trabalhos utilizando *scanlines* têm sido desenvolvidos desde os estudos iniciados por Priest & Hudson (1976) para prever a frequência de fraturas que poderia ser observada em qualquer direção.

Vale ressaltar que as fraturas, para sua aquisição de medida, devem apresentar inclinação formando aproximadamente 90° com a *scanline*. As principais medidas feitas com essa técnica são: a distância entre as fraturas e a abertura das fraturas.

No estudo de Childs *et al.*, 1990, para as populações de fraturas é usada a distribuição acumulada da seguinte forma:

$$N = a_1 u^{-b_1} \quad (1)$$

Onde ‘u’ é a medida do tamanho e ‘N’ é o número acumulado de valores maiores do que ‘u’, a_1 é uma constante e b_1 é o expoente.

No caso de *scanlines* a dimensão é definida pela equação de escala relacionada com a frequência de abertura ‘N’ das fraturas e tamanho das medidas dessas fraturas, dado por (X).

$$N = aX^{1-D} \quad (2)$$

Portanto obtêm-se o parâmetro de frequência acumulada, que é dado por:

$$F = a * b^{-k} \quad (3)$$

Onde F é a frequência acumulada que a partir da distribuição do tamanho das aberturas das fraturas encontra-se a lei de potência, e a e k são os coeficientes da lei. Destaca-se que a é o coeficiente relacionado à ideia indireta de densidade acumulada de fraturas no meio rochoso e k é o coeficiente que têm relação com a dimensão fractal da estrutura geológica.

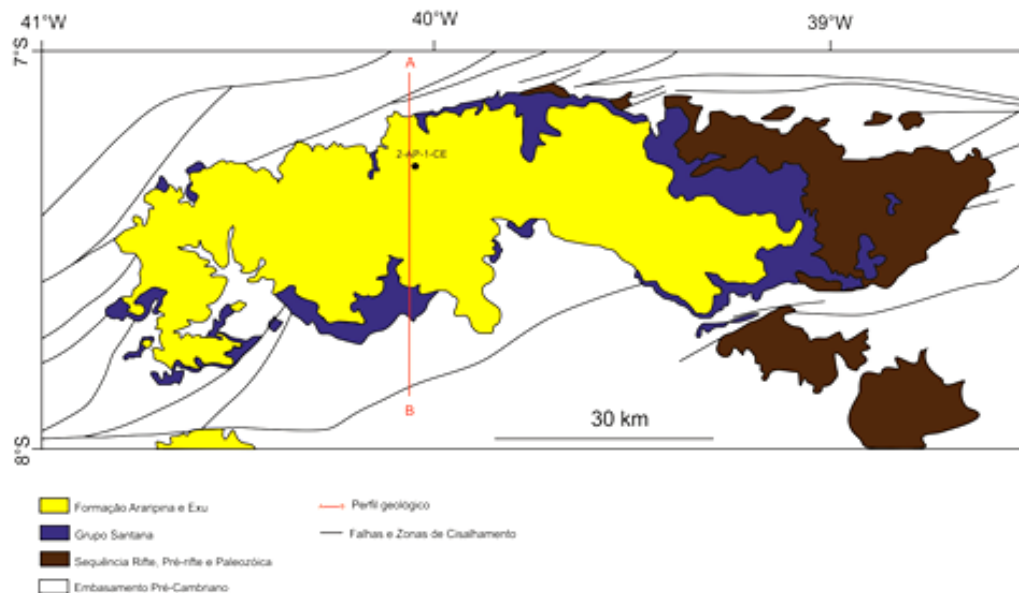
Na temática de afloramentos podem-se refinar os dados com os efeitos de *truncation* e/ou *censoring*, que afetam significativamente o grau da análise (Gillespie *et al.*, 1993). O efeito de *truncation* consiste em refinar o intervalo dos dados em certa região de interesse e o de *censoring* é quando a janela de observação possui um comprimento ou área que não captam a quantidade suficiente de fraturas em uma escala em particular.

As demais aplicações e detalhes desta técnica de *scanlines* podem ser estudadas nos trabalhos de Ortega *et al.* (2006); Miranda *et al.* (2012); Miranda (2015); Santos *et al.* (2015); Santos (2017).

2.1.2 Contextualização geológica da Formação Crato

A Formação Crato está inserida na Bacia do Araripe (BA) que possui extensão de aproximadamente 9.000km^2 , sendo a maior área com relação às bacias do interior e do nordeste do Brasil. A Figura 5 mostra o mapa simplificado da Bacia do Araripe.

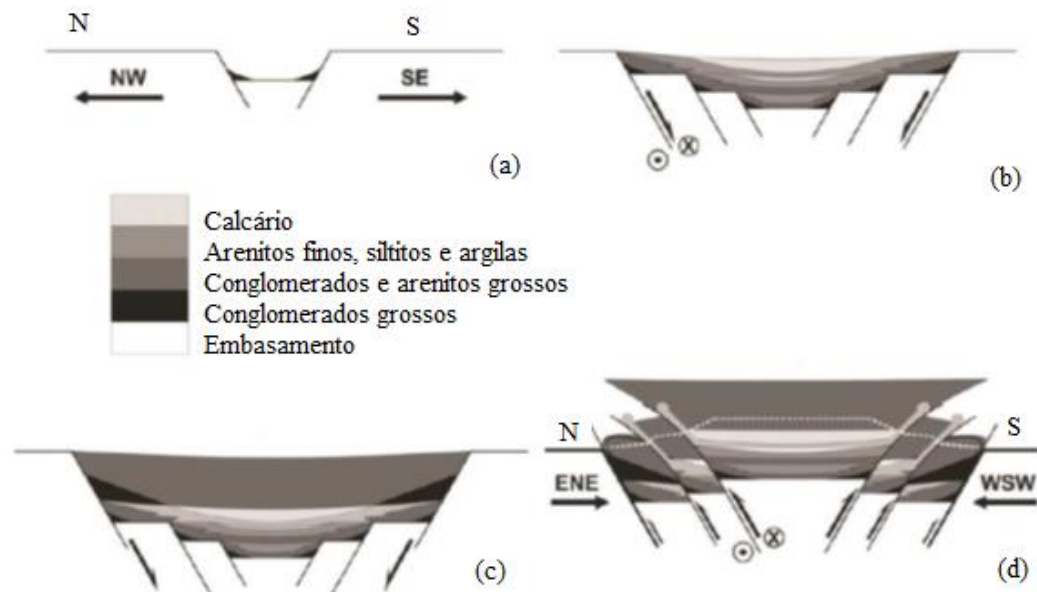
Figura 5 - Mapa simplificado da Bacia do Araripe.



Fonte: Adaptado de Assine, 2007.

A BA está localizada no Domínio da Zona Transversal da Província Borborema (PB), exatamente ao Sul da Zona de Cisalhamento Patos (ZCPA). A BA sofreu uma inversão, resultado de uma colisão entre a porção Oeste da cadeia meso-atlântica com os Andes, o que ocasionou uma transição entre um regime extensional para um regime compressional. Isto conduziu à reativação de antigas falhas normais para falhas inversas, e convertendo um antigo *graben* em um *horst*. O efeito do *horst* e do regime compressional, nas camadas preexistentes, foi o arqueamento das rochas o qual, provavelmente, gerou fraturas verticalizadas ao longo da estratigrafia da formação sendo estas influenciadas pela heterogeneidade geomecânica das feições da rocha. A Figura 6 mostra a evolução da Bacia do Araripe.

Figura 6 - Evolução da Bacia do Araripe.



Fonte: Marques *et al.*, 2014.

- (a) Início do rifte, a partir de um *graben* estreito; (b) Alargamento e aprofundamento do rifte, a partir das falhas do embasamento; (c) Estágio final do rifte, contemporâneo com a abertura do Atlântico; (d) Inversão da bacia devido a esforços de compressão oblíquos, com a injeção de rochas dúcteis através das falhas normais reativadas, e a diminuição das falhas invertidas. A linha tracejada branca indica a topografia atual da bacia, com a chapada.

Esta Formação é constituída por níveis de calcários laminados (Ver Figura 7) de permeabilidade matricial consideravelmente reduzida e com permeabilidade do maciço governada por fraturas naturais. Estas discontinuidades se apresentam na forma de fraturas de tração (veios), de cisalhamento e estilólitos.

Figura 7 - Exposição de um nível de calcário laminado da Formação Crato em uma pedreira na região de Nova Olinda, CE.



Fonte: Miranda, 2015.

Os veios estão associados a eventos extensionais ocorridos na bacia, e tem sido crescente o estudo de sua ocorrência e evolução uma vez que as rochas carbonáticas da Fm. Crato são consideradas um análogo de uma porção do Pré-Sal brasileiro (CATTO *et al.*, 2016; MIRANDA, 2015; SANTOS *et al.*, 2017; ZIHMS, 2017; MIRANDA *et al.*, 2018).

A Formação Crato representa uma sedimentação lacustre interna carbonática da Bacia do Araripe, sendo constituída principalmente por seis unidades carbonáticas denominadas de C1 a C6, que são separadas entre si, tanto lateralmente como verticalmente, por arenitos, siltitos e folhelhos calcíferos e margas (Neuman, 1999; Silva *et al.*, 2002; Silva & Neumann, 2002; Miranda, 2015).

As fraturas que foram observadas nos calcários laminados da Formação Crato foram interpretadas a partir dos modos de fraturamento da elasticidade linear da mecânica de fraturas (Twiss & Moores, 2007; Fossen, 2012). Considerando a mecânica de fraturas a classificação das estruturas é dividida em quatro modos (Fossen, 2012 e Miranda, 2015), que são:

- **Modo I:** Exemplificam as aberturas extensionais, o deslocamento é perpendicular às paredes da fratura, juntas e veios;
- **Modo II:** Representa o cisalhamento perpendicular à borda, modo de deslizamento;
- **Modo III:** Têm a característica de deslizamento paralelo à borda da fratura, fraturas cisalhantes;

- **Modo IV:** Esta relacionada ao fechamento de fraturas e pode ser usado para explicar os casos de feições compressionais, exemplo o estilolito (Fossen, 2012).

A Formação Crato tem características de fraturas cisalhantes, estilolito, fraturas extensionais e fraturas vulgares (Miranda, 2015). Nesta tese, o foco será simular a ocorrência de fraturas extensionais, pois são estas fraturas que tem a maior frequência de ocorrência nos calcários da Formação Crato.

Miranda (2015) observou que os planos das fraturas de extensão (veios e juntas) ocorrem perpendiculares ao acamamento e possui um padrão sistemático de fraturamento. A Figura 8 exemplifica este tipo de ocorrência de fraturas.

Figura 8 - Exemplos da ocorrência das fraturas extensionais nos calcários laminados da Formação Crato.



Fonte: Miranda, 2015.

- (a) Juntas com padrão ortogonal; (b) Junta parcialmente preenchida por dissolução de calcita e gipsita; (c) e (d) *Clusters* de veios preenchidos por calcita recristalizada.

Considerando estas características (fraturas extensionais) no presente trabalho, simulou-se numericamente a formação de fraturas confinadas em virtude de uma variação da competência mecânica da rocha ao longo da altura do perfil. Esta variação vertical é característica de rochas sedimentares formadas em padrão de acamamento devido a mecanismos de deformação como fraturamento hidráulico e arqueamento regional, a processos diagenéticos como dissolução, cimentação e compactação, dentre outros fatores.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Neste capítulo serão apresentadas as equações que regem o problema da mecânica do contínuo e o modelo constitutivo de dano à tração. Este modelo foi escolhido porque representa o comportamento de fraturas, a geração e a propagação destas estruturas em meios contínuos. Será discutido de forma resumida o algoritmo de integração de tensões implícito-explicito (IMPL-EX) e o algoritmo de controle do passo de tempo.

Segundo Rodrigues (2011) os modelos constitutivos de dano são usados como uma importante ferramenta na simulação de degradação mecânica de materiais *quase-frágeis*, tais como concreto e rochas.

A descrição dos modelos matemáticos e técnicas numéricas descritas a seguir estão baseadas nos trabalhos de MANZOLI, (2012); SÁNCHEZ *et al.*, (2014); BESERRA, (2015); MAEDO, (2015); SEIXAS, (2015); MACIEL, (2017).

3.1 EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO DE TENSÕES

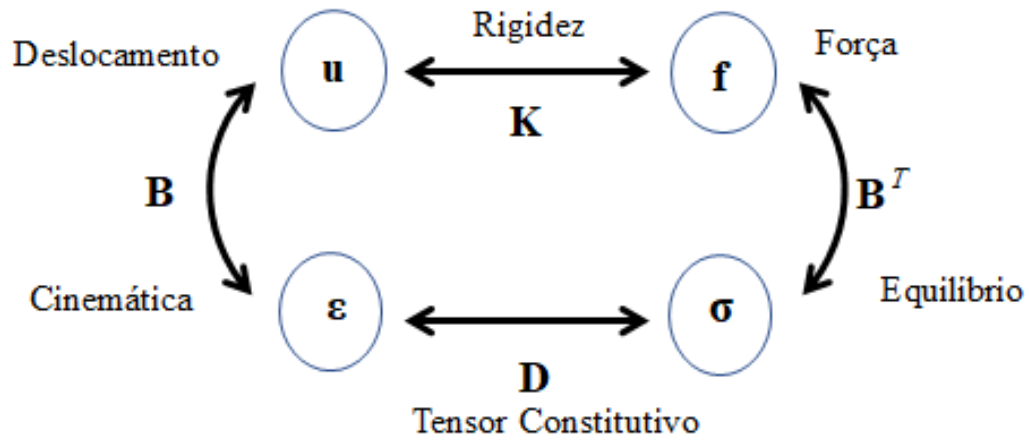
O problema mecânico cujo corpo está em equilíbrio está baseado na equação que segue:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (4)$$

Onde $\boldsymbol{\sigma}$ é o tensor das tensões totais e vetor de forças do corpo é dado por $\mathbf{b}$.

Temos que os quatro elementos básicos da mecânica dos sólidos podem ser relacionados a partir do diagrama de Tonti (Ver Figura 9):

Figura 9 - Elementos básicos da mecânica dos sólidos.



Fonte: A Autora, 2019.

Então a relação tensão-deformação fica descrita da seguinte forma:

$$\sigma = D\varepsilon \quad (5)$$

O estado de tensão em um determinado ponto possui seis (6) componentes de tensão, tensor simétrico, e três (3) equações de equilíbrio. Dado da seguinte forma:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

E o estado de deformação em um ponto é dado por seis (6) componentes de deformação, tensor simétrico, e três (3) de relações deformação-deslocamento e equações de compatibilidade.

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Como em todo material utilizado na engenharia, o meio poroso, ao sofrer solicitações, irá se deformar, modificando o seu volume e forma iniciais. A magnitude das deformações irá depender não só dos parâmetros de deformabilidade do material e da magnitude do carregamento imposto, mas também da faixa de tensões de trabalho.

Portanto a equação de deformação é dada por:

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (8)$$

3.1.1 Equações de conservação de massa para fase sólida

O comportamento de um reservatório na simulação é baseado na conservação de massa na fase sólida e das fases fluidas que nelas estão contidas. Levando em consideração o acoplamento geomecânico a rocha passa a ser um meio deformável e a variação da porosidade é dada a partir do cálculo da equação de conservação de massa da fase sólida, conforme Beserra (2015). Tal equação é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \phi)\rho_s] + \nabla \cdot [(1 - \phi)\rho_s \mathbf{\dot{u}}] = 0 \quad (9)$$

Onde ρ_s é densidade do sólido, ϕ é a porosidade do meio e $\mathbf{\dot{u}}$ é o vetor de velocidade de deslocamento da fase sólida.

No conceito de derivada material com relação à velocidade da matriz sólida, a equação fica definida da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\bullet)}{\partial t} = \frac{D(\bullet)}{Dt} - \mathbf{\dot{u}} \cdot \nabla(\bullet) \quad (10)$$

Desta forma a equação descrita acima (10) é reescrita:

$$\frac{D(1 - \phi)\rho_s}{Dt} - \mathbf{\dot{u}} \cdot \nabla[(1 - \phi)\rho_s] + \nabla \cdot [(1 - \phi)\rho_s \mathbf{\dot{u}}] = 0 \quad (11)$$

Expandindo o primeiro termo e aplicando a seguinte relação:

$$\nabla \cdot [(1 - \phi)\rho_s \mathbf{\dot{u}}] = \mathbf{\dot{u}} \cdot \nabla[(1 - \phi)\rho_s] + (1 - \phi)\rho_s \nabla \cdot \mathbf{\dot{u}} \quad (12)$$

A equação (9) pode ser reescrita:

$$(1 - \phi) \frac{D\rho_s}{Dt} - \rho_s \frac{D\phi}{Dt} \underbrace{- \mathbf{\dot{u}} \cdot \nabla[(1 - \phi)\rho_s] + \mathbf{\dot{u}} \cdot \nabla[(1 - \phi)\rho_s]}_{\text{esses termos se cancelam}} + (1 - \phi)\rho_s \nabla \cdot \mathbf{\dot{u}} = 0 \quad (13)$$

Cancelando os termos e aplicando a relação que segue:

$$\nabla \cdot \mathbf{\dot{u}} = \dot{\epsilon}_v \quad (14)$$

Sendo $\dot{\epsilon}_v$ a deformação volumétrica total do meio poroso, a equação (13) é reescrita da seguinte forma:

$$(1 - \phi) \frac{D\rho_s}{Dt} - \rho_s \frac{D\phi}{Dt} + (1 - \phi)\rho_s \dot{\epsilon}_v = 0 \quad (15)$$

Quando a fase sólida estiver incompressível,

$$\begin{aligned}\rho_s &= cte \\ \frac{D\rho_s}{Dt} &= 0\end{aligned}\tag{16}$$

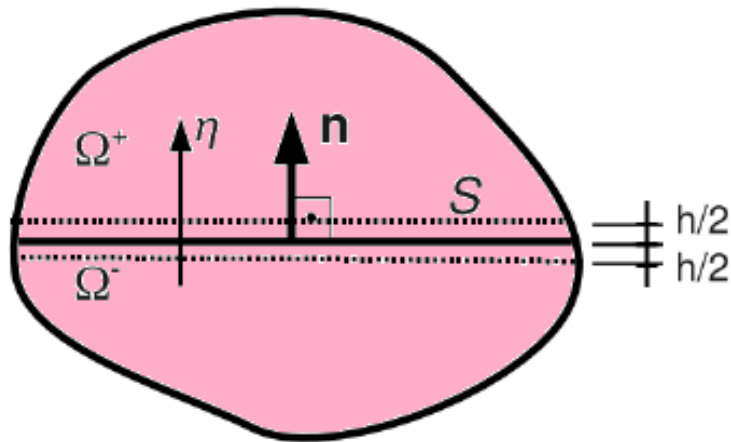
Dividindo todos os termos da equação por ρ_s , obtêm-se a equação final para variação de porosidade em função da variação volumétrica do meio:

$$\frac{D\phi}{Dt} = (1 - \phi)\dot{\epsilon}_v\tag{17}$$

3.1.2 Cinemática de descontinuidades

Uma superfície de descontinuidade S divide o domínio Ω em duas partes (Ω^+ e Ω^-), ver Figura 10.

Figura 10 - Superfície de descontinuidades S .



Fonte: Adaptado de Manzoli *et al.*, 2012.

Sendo η a coordenada local do eixo normal à superfície S , e a banda de localização de deformação é dada por h . Considera-se o regime de descontinuidade fraca quando o campo de deslocamento descontínuo $[[\mathbf{u}]]$, ao longo de S , para cada ponto material em Ω , é expressa pelo campo de deslocamento total $\mathbf{u}$.

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{Z}_s(\eta)[[\mathbf{u}]]\tag{18}$$

e o campo de deformações ϵ pode ser expresso pela equação:

$$\epsilon = \nabla^s \mathbf{u} = \underbrace{\nabla^s \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{Z}_s \nabla^s [[\mathbf{u}]]}_{\tilde{\epsilon}} + \frac{\mu_s(\eta)}{h} (\mathbf{n} \otimes [[\mathbf{u}]])^s\tag{19}$$

$$\epsilon = \tilde{\epsilon} + \frac{\mu_s(\eta)}{h} (\mathbf{n} \otimes \llbracket \mathbf{u} \rrbracket)^S \quad (20)$$

E a função de regularização na banda de localização da deformação $\mu_s(\eta)$, é:

$$\mu_s(\eta) = \begin{cases} 1 & \text{se } -\frac{h}{2} \leq \eta \leq \frac{h}{2} \\ 0 & \text{se } \eta < -\frac{h}{2} \text{ ou } \eta > \frac{h}{2} \end{cases} \quad (21)$$

E o campo de descontinuidade forte ocorre quando o limite do regime de descontinuidade fraca, ou seja, $h \rightarrow 0$, sendo expressa pela equação:

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{H}_s(\eta) \llbracket \mathbf{u} \rrbracket \quad (22)$$

e o tensor de deformações $\epsilon = \tilde{\epsilon} + \hat{\epsilon}$, é dado pela equação:

$$\epsilon = \tilde{\epsilon} + \delta_s (\mathbf{n} \otimes \llbracket \mathbf{u} \rrbracket)^S \quad (23)$$

onde δ_s é o delta de Dirac, obedece às seguintes condições:

$$\delta_s = \begin{cases} 0 & \text{se } \eta \neq 0 \\ \infty & \text{se } \eta = 0 \end{cases} \quad (24)$$

e

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta_s d\eta = 1 \quad (25)$$

O campo de tensões correspondentes, de acordo com a ACDF, pode ser obtido por meio da relação constitutiva contínua (tensão-deformação) com abrandamento de tensões, permitindo que tensões limitadas sejam obtidas mesmo de deformações ilimitadas (OLIVER, J., CERVERA, M. e MANZOLI, O., 1999; SEIXAS, 2015).

3.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MODELO CONSTITUTIVO DE DANO

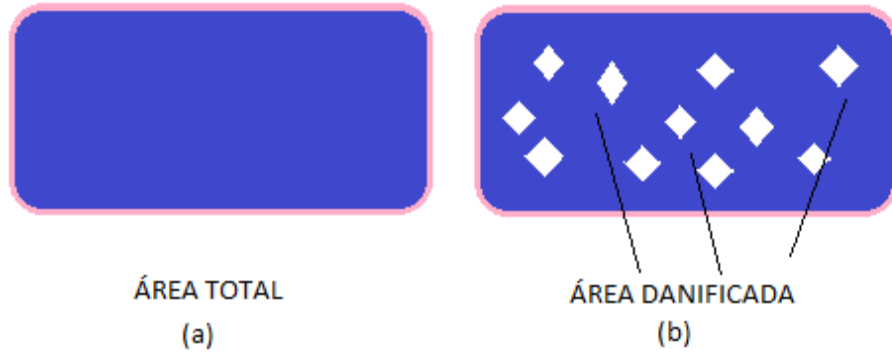
Baseado na mecânica do dano contínuo, proposta por Simó & Ju (1987) o dano é uma degradação da rigidez do material. Portanto entende-se que o modelo está baseado nos processos termodinâmicos irreversíveis e está proposto de forma que descreva o mecanismo prévio da formação de macro fraturas.

Neste modelo foi introduzido o conceito de tensão efetiva de dano com o propósito de descrever o comportamento da estrutura rochosa danificada. A degradação do material é modelada e representada por uma variável escalar, denominada de variável de dano, d , definida como:

$$d = \frac{A_D}{A} \quad (26)$$

Onde A é a área total de uma seção transversal e A_D é a área da região danificada. Esta equação está ilustrada na Figura 11.

Figura 11 - Seção transversal (a) Material Intacto; (b) Material Danificado.



Fonte: Elaborado pela autora.

A área efetiva é definida pela região que se aplica efetivamente os esforços, desta forma a equação fica:

$$\bar{A} = A - A_D \quad (27)$$

e a variável de dano é escrita da seguinte forma:

$$d = 1 - \frac{\bar{A}}{A} \quad (28)$$

Significando que:

$$0 \leq d \leq 1 \begin{cases} d = 0 \text{ material intacto, ou seja } A_D = 0. \\ d = 1 \text{ material danificado, ou seja } A_D = A. \end{cases} \quad (29)$$

Definindo uma tensão nominal, σ , através de um carregamento uniaxial associada à área da seção transversal (Figura 11) a tensão efetiva de dano, $\bar{\sigma}$, relacionada à área efetiva pode ser definida por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (30)$$

e

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{\bar{A}} \quad (31)$$

Com isso surge a seguinte equação:

$$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}} = \frac{\bar{A}}{A} = 1 - d, \text{ então } \sigma = (1 - d)\bar{\sigma} \quad (32)$$

Conclui-se que, para o material intacto, significa afirmar que $d=0$ a tensão nominal é igual à tensão efetiva e, quando o material se aproxima da total danificação, onde $d \approx 1$, a tensão nominal tende a zero.

Tendo este conceito de tensão efetiva está estabelecido e admitindo que a deformação associada a esse estado danificado é equivalente à deformação associada ao estado não danificado que está submetido à tensão efetiva (Lemaitre J. *et al.* 1985), então pode-se definir as deformações de acordo com o princípio de equivalência de deformação como sendo:

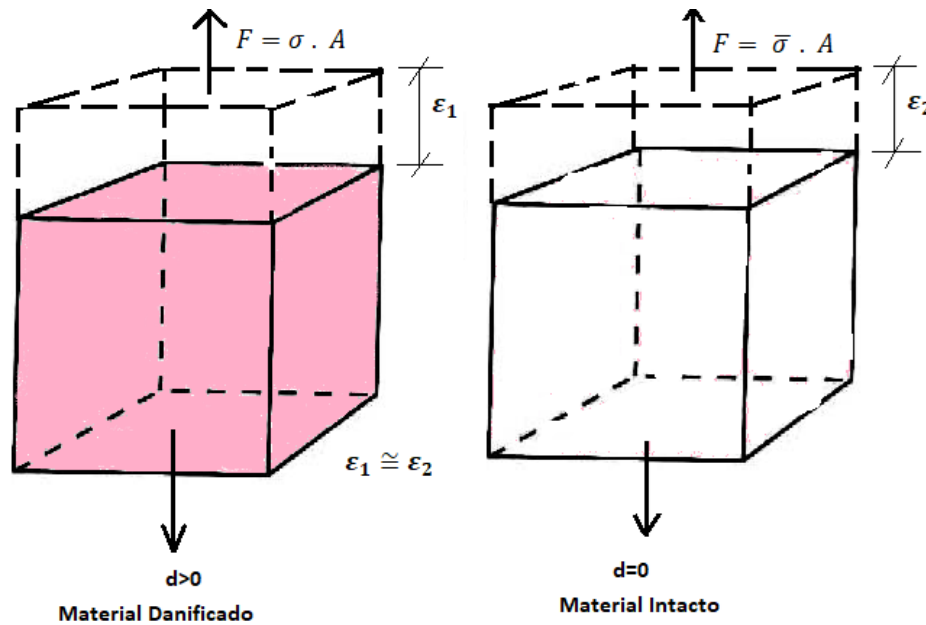
$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_D} \quad (33)$$

e

$$\varepsilon_2 = \frac{\bar{\sigma}}{E} \quad (34)$$

Onde E é o módulo de Young (Módulo de Elasticidade) do material intacto e E_D é o módulo de Young do material danificado. Como se pode observar na Figura 12 que segue.

Figura 12 - Princípio de deformação equivalente.



Fonte: Adaptado de Rodrigues, 2011.

Portanto se $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ são equivalentes, surge as seguintes relações:

$$\frac{\sigma}{E_D} = \frac{\bar{\sigma}}{E} \rightarrow E_D = E \frac{\sigma}{\bar{\sigma}} \quad (35)$$

Substituindo a equação 30 em 33, têm-se:

$$E_D = (1 - d)E \quad (36)$$

O que resulta na seguinte relação constitutiva total:

$$\bar{\sigma} = E_D \varepsilon \quad (37)$$

Como a tensão efetiva foi classificada no regime elástico linear, surge uma definição de suma importância para o modelo de dano, que é chamado de critério de degradação do material. Esse critério consiste em uma região no espaço das tensões onde o comportamento do material é elástico linear, tal região pode ser estabelecida por uma função f descrita como uma função da norma da tensão equivalente τ e da variável interna do modelo q :

$$\phi(\sigma) = \tau(\sigma) - q \leq 0 \quad (38)$$

Onde $\tau(\sigma)$ é a tensão equivalente que define a forma do domínio elástico e q é a variável interna do modelo de dano e que define o tamanho do domínio elástico. Portanto o critério de degradação no espaço das tensões efetivas é descrito da seguinte forma:

$$\frac{\phi(\sigma)}{1-d} = \frac{\tau(\sigma)}{1-d} - \frac{q}{1-d} \leq 0 \rightarrow \phi(\bar{\sigma}) = \tau(\bar{\sigma}) - r \leq 0 \quad (39)$$

r sendo definido por:

$$r = \frac{q}{1-d} \quad (40)$$

Para definir as condições de carga e descarga no modelo de dano, pode-se utilizar as condições de Kuhn-Tucker da seguinte forma:

$$\begin{cases} \dot{d} \geq 0 \\ \phi(\bar{\sigma}) \leq 0 \\ \dot{d}\phi(\bar{\sigma}) = 0 \rightarrow \text{condição de consistência} \end{cases} \quad (41)$$

Onde,

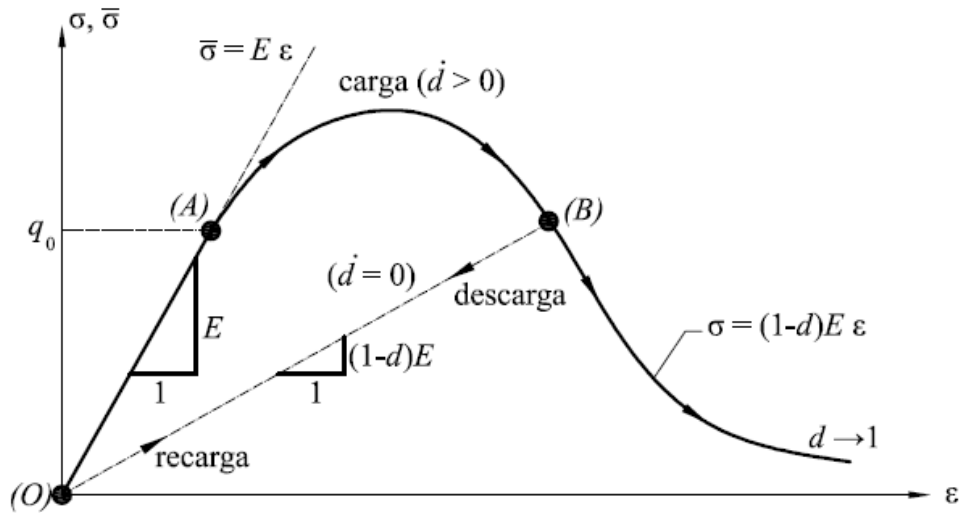
Se $\phi(\bar{\sigma}) < 0 \rightarrow \dot{d} = 0 \rightarrow \text{regime elástico}$

$$\text{Se } \phi(\bar{\sigma}) = 0 \rightarrow \begin{cases} \dot{\tau}(\bar{\sigma}) < 0 \rightarrow \begin{cases} \dot{d} = 0 \\ \dot{r} = 0 \end{cases} \rightarrow \text{descarga elástica} \\ \dot{\tau}(\bar{\sigma}) > 0 \rightarrow \begin{cases} \dot{d} > 0 \\ \dot{r} = \dot{\tau} > 0 \end{cases} \rightarrow \text{carga ou recarga} \end{cases} \quad (42)$$

Para ilustrar a equação 42 com as etapas de carga e descarga do material. A Figura 13 mostra que o trecho $\overline{0A}$ representa o regime elástico, ou seja, não ocorre evolução do dano, $\dot{d} = 0$, e o critério de degradação é menor que zero, $\phi(\bar{\sigma}) < 0$; no trecho $\overline{AB}$ o regime é inelástico, portanto ocorre evolução do dano, $\dot{d} > 0$, e o critério de degradação igual à zero, $\phi(\bar{\sigma}) = 0$, e nos trechos de descarga $\overline{B0}$ e recarga $\overline{0B}$, o regime é elástico, onde o módulo de

elasticidade é o do material danificado, $E_D = (1 - d)E$, não ocorre evolução do dano, $\dot{d} = 0$, mas o critério de degradação igual à zero, $\phi(\bar{\sigma}) = 0$.

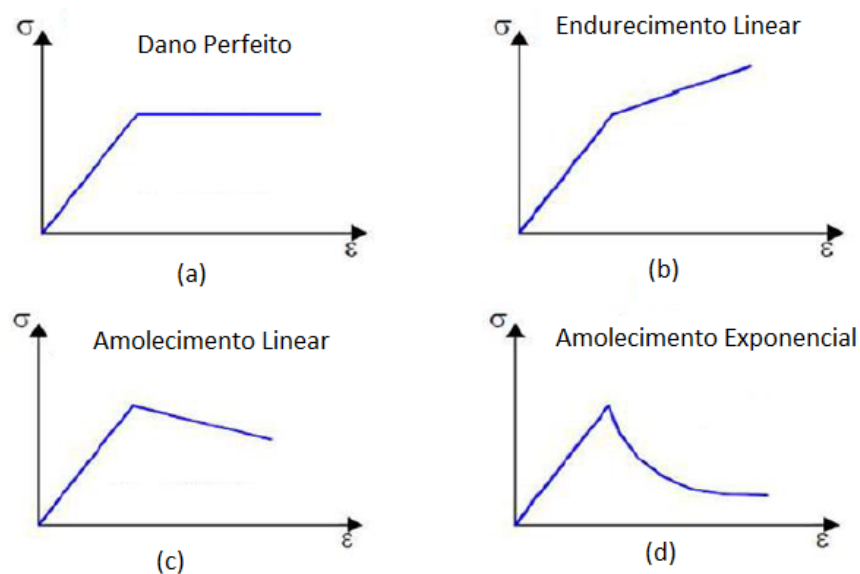
Figura 13 - Evolução da Variável de dano. Curva de tensão-deformação.



Fonte: Adaptado de MAEDO, 2015.

Cada material pode reagir de maneiras distintas pós-ruptura, o que torna esta etapa importante na modelagem dos problemas de fraturas. Podem-se destacar algumas curvas de tensão-deformação para diferentes comportamentos pós-ruptura, que estão destacados na Figura 14 que segue.

Figura 14 - Curva tensão-deformação para diferentes comportamentos pós-ruptura.



Fonte: Adaptado de Rodrigues, 2011.

Para o modelo de dano, as leis de endurecimento ou amolecimento do material podem ser descritas em função das variáveis internas de q e r , da seguinte forma:

$$q(r) = q_0 + H(r - q_0) \quad (43)$$

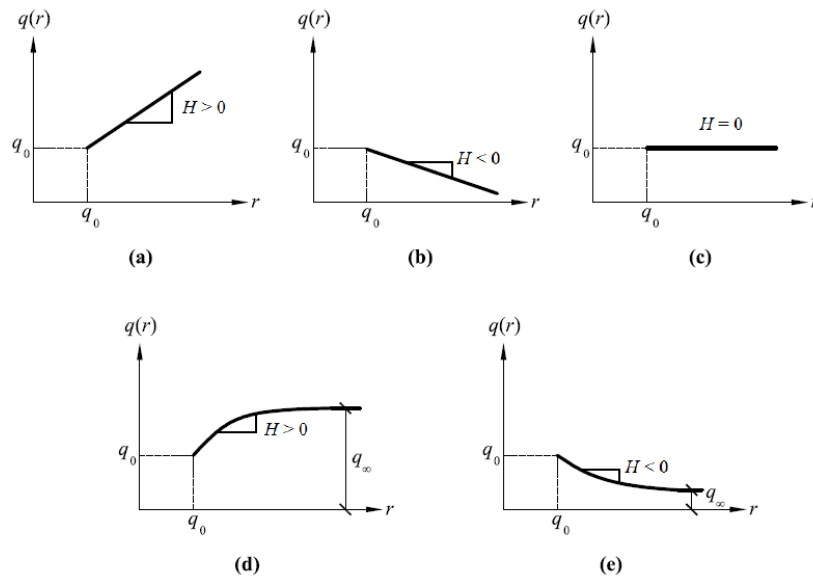
Sendo que $q_0 = r_0$ e H é um parâmetro de endurecimento $H > 0$, ou amolecimento $H < 0$. Para o comportamento exponencial, a lei de amolecimento passa a ser descrita em função de r de A da seguinte forma:

$$q(r) = q_0 e^{A(1 - \frac{r}{r_0})} \quad (44)$$

Onde A é o parâmetro que controla a cavidade da lei exponencial.

A Figura 15 ilustra as possíveis funções de evolução da variável interna $q(r)$, onde define a lei de endurecimento e amolecimento das tensões.

Figura 15 - Funções de evolução da variável interna $q(r)$.



Fonte: Adaptado de MAEDO, 2015.

Onde (a) é o endurecimento linear, (b) é o amolecimento linear, (c) é o dano perfeito, (d) é o endurecimento exponencial e (e) é o amolecimento exponencial.

3.3 MODELO CONSTITUTIVO DE DANO À TRAÇÃO

Em Oliver *et al.* (2008) foi introduzido ao modelo de dano, tratando de forma diferente o material quando está submetido a um estado de tração ou de compressão. A formulação que está descrita nesta tese pode ser encontrada de forma mais ampla em Sánchez *et al.* (2014)

que tratou que quando o material estiver no estado compressivo o mesmo terá comportamento elástico linear.

E quando o dano estiver no regime de tração às equações constitutivas serão descritas introduzido o conceito de tensão efetiva de dano com o objetivo de descrever o comportamento do meio danificado.

Conforme descrito por Sánchez *et al.*, (2014), a lei constitutiva deste modelo está descrita da seguinte forma:

$$\sigma = (1 - d)\bar{\sigma} \quad (45)$$

Sendo σ é a tensão efetiva, d é a variável de dano ($0 \leq d \leq 1$) e $\bar{\sigma}$ é a tensão efetiva de dano, que é dada por:

$$\bar{\sigma} = C : \varepsilon \quad (46)$$

Onde C é o tensor constitutivo elástico. Sendo assim, a lei constitutiva para este modelo pode ser expressa por:

$$\begin{aligned} \sigma &= (1 - d)\bar{\sigma}, \text{ se } \bar{\sigma}_n > 0 && \text{Estado de tração} \\ \sigma &= \bar{\sigma}, \text{ se } \bar{\sigma}_n \leq 0 && \text{Estado de compressão} \end{aligned} \quad (47)$$

E o critério de dano no domínio elástico é definido por:

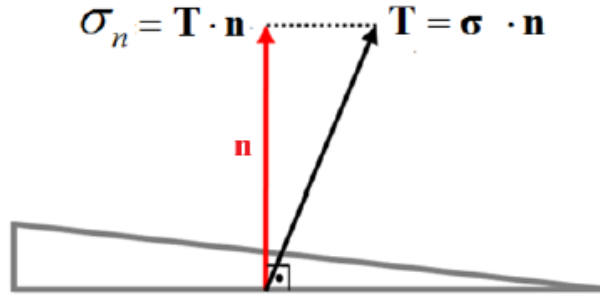
$$f(\sigma) = \tau(\sigma) - q(r) \leq 0 \quad (48)$$

Sendo que q e r são as variáveis internas de tensão e deformação, e τ é a tensão equivalente que define o domínio elástico. O tensor de tensões é projetado na direção normal à superfície de fraturas, o que resulta no vetor de tensões T (*traction*) e a componente normal deste vetor, σ_n , são utilizados na definição do critério de Dano, que pode ser descrito da seguinte forma:

$$\tau = \sigma_n \quad (49)$$

Na técnica de elementos finitos com elementos especiais de interface de alta razão de aspecto (fragmentação) a direção normal é definida como sendo à base do elemento de interface, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Projeção do vetor de tensões na direção normal a base do elemento de interface.



Fonte: Sánchez *et al.*, 2014.

Considerando que as tensões sejam efetivas o critério de dano é descrito da seguinte forma:

$$\bar{f}(\bar{\sigma}, r) = \bar{\sigma} - r \leq 0, \text{ com } r = \frac{q}{(1-d)} \quad (50)$$

Dessa forma r é o limite de dano, que controla a dimensão do domínio elástico no espaço das tensões efetivas. A superfície de dano é delimitada por $\bar{f}(\bar{\sigma}, r) = 0$. E a lei de evolução da variável r é dada por:

$$r = \text{Max} \left[\bar{\sigma}_n, r_0 \right] \text{ com } r_0 = f_t \quad (51)$$

Esta equação indica que a variável r assume o valor máximo que a tensão efetiva de tração $\bar{\sigma}_n$ atinge durante o processo de carregamento, e o valor inicial da variável r_0 é igual ao valor da resistência à tração do material f_t .

Ficando com a variável de evolução de dano descrita da seguinte forma:

$$d = 1 - \frac{q(r)}{r} \quad (52)$$

Então a evolução da variável do tipo tensão, q , pode ser expressa por uma lei de amolecimento exponencial, da seguinte forma:

$$q(r) = f_{te} \frac{f_t^2}{GfE} h \left(1 - \frac{r}{f_t} \right) \quad (53)$$

Onde E é o módulo de elasticidade, f_t é a resistência à tração, Gf é a energia de fratura do material e h é a espessura do elemento de interface.

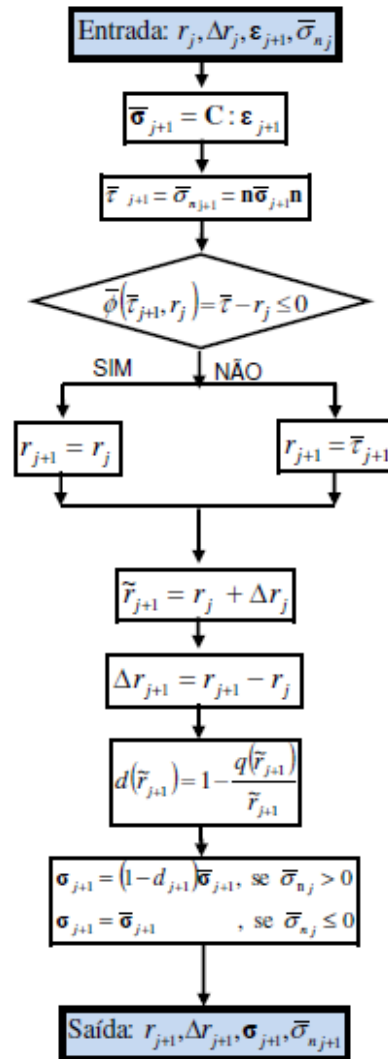
3.3.1 IMPL-EX Aplicado ao Modelo Constitutivo de Dano à Tração

Ao realizar simulações de problemas muito complexos, ou seja, com fortes acoplamentos e com as técnicas de elementos finitos de alta razão de aspecto e descontinuidades fortes incorporadas, os algoritmos são totalmente implícitos, pois apresentam alta não linearidade dificultando a convergência. Neste contexto, Oliver *et al.*, (2008) apresentaram um algoritmo de integração de tensões, a nível de pontos de Gauss, bastante robusto que é a simplificação do algoritmo implícito.

Este código está descrito de forma detalhada em BESERRA, (2015); SEIXAS, (2015) e MACIEL, (2017).

O objetivo desse algoritmo é diminuir a não linearidade do algoritmo de integração. A Figura 17 resume o algoritmo de integração de tensões, para o modelo de dano à tração, que está implementado no código numérico de elementos finitos CODE-BRIGHT (COupled DEformation BRine Gas and Heat Transport) (Olivella *et al.*, 1996).

Figura 17 - Algoritmo IMPL-EX de integração de tensões para o modelo de dano à tração.



Fonte: Seixas, 2015.

Neste algoritmo o IMPL-EX permite a violação da condição de consistência e os resultados podem perder a precisão ou até apresentar oscilações se utilizados incrementos de tempos muito grandes, o contrário pode também ocorrer, se reduzir bastante os incrementos de tempo a análise pode retardar de maneira desnecessária. Por esta questão, usa-se um algoritmo de controle automático do passo de tempo.

Em Seixas (2015) este algoritmo está definido como um algoritmo de controle automático do passo de tempo, que se baseia na taxa de degradação do material do passo de tempo atual, no qual se calcula o tamanho do próximo passo de tempo.

4 TÉCNICAS DE ELEMENTOS FINITOS

No presente capítulo serão abordadas as técnicas baseadas no método de elementos finitos (FEM), em especial duas técnicas, que são: Elementos Finitos Especiais de Interface de Alta Razão de Aspecto em problema puramente mecânico, que consiste em inserir elementos de interface na malha de elementos finitos (SÁNCHEZ *et al.*, 2014) e Descontinuidades Fortes Incorporadas que permite a representação dos efeitos de descontinuidades no interior do elemento finito (BESERRA, 2015).

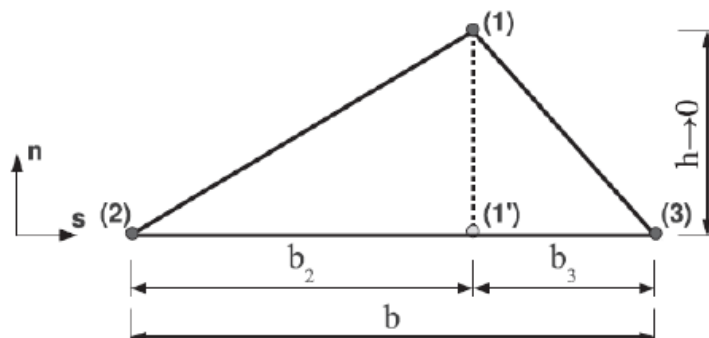
Estas técnicas expressam campos cinemáticos análogos a Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes (ACDF). Em Oliver J. *et al.*, (2003) define-se descontinuidades fortes como sendo saltos no campo de deslocamentos ocasionados pelo sólido no processo de deformação. Portanto rachaduras (no concreto), fraturas (em rochas), cisalhamento (no solo) são todos tipos diferentes de descontinuidades fortes.

Posteriormente será apresentada uma aplicação dessas técnicas. Esta aplicação consiste na união das técnicas citadas acima, tendo como objetivo representar no interior do elemento descontinuidades e possíveis formações e gerações de fraturas, tendo como modelo constitutivo o de dano à tração.

4.1 ELEMENTOS FINITOS DE INTERFACE DE ALTA RAZÃO DE ASPECTO EM PROBLEMA MECÂNICO

O comportamento do elemento que possui elevada razão de aspecto, ou seja, o elemento que possui uma das dimensões muito maior que a outra (Ver Figura 18, onde a base b do elemento é muito maior que a altura h).

Figura 18 - Representação do Elemento Finito de Alta Razão de Aspecto.



Fonte: Manzoli *et al.* 2012.

Pondere que o elemento finito triangular com base b que é formado pelo segmento de reta entre os nós (2) e (3), e altura h , logo definida pela distância entre o nó (1) e sua projeção na base (1') em um sistema de eixos coordenados (n,s) , onde n é a normal a base do elemento, conforme a Figura 18. Em Seixas (2015) define que o tensor que representa as deformações em qualquer ponto do elemento é aproximado por:

$$\varepsilon = \tilde{\varepsilon} + \hat{\varepsilon} \quad (54)$$

Onde:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{1}{b} \begin{bmatrix} 0 & 1/2(u_n^{(3)} - u_n^{(2)}) & 0 \\ u_n^{(3)} - u_n^{(2)} & u_n^{(3)} - u_n^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (55)$$

e,

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} [[u]]_n & 1/2[[u]]_n & 0 \\ 1/2[[u]]_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (56)$$

Definindo $u_n^{(i)}$ e $u_s^{(i)}$ são componentes do nó i de acordo com o sistema cartesiano (n,s) e $[[u]]_n = u_n^1 - u_n^{1'}$ e $[[u]]_s = u_s^1 - u_s^{1'}$ representam componentes do deslocamento relativo $[[u]]$ entre o nó (1) e o ponto que corresponde a projeção na base do elemento (1'):

$$[[u]]_n = u_n^1 - u_n^{1'} = u_n^1 - [\alpha u_n^{(3)} + (1 - \alpha)u_n^{(2)}] \quad (57)$$

$$[[u]]_s = u_s^1 - u_s^{1'} = u_s^1 - [\alpha u_s^{(3)} + (1 - \alpha)u_s^{(2)}] \quad (58)$$

Para encontrar o deslocamento do ponto projetado (1') é realizada uma interpolação dos nós (2) e (3) usando a constante $\alpha = b_2/b$. Então $\hat{\varepsilon}$ pode ser rescrito de forma geral, o que significa para qualquer sistema de coordenada, da seguinte forma:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{h} (n \otimes [[u]])^S \quad (59)$$

onde $(\bullet)^S$ se refere a parte simétrica de $(\bullet)$, n é o vetor unitário normal à base do elemento e $\otimes$ denota um produto vetorial. Então o tensor total de deslocamento é:

$$\varepsilon = \tilde{\varepsilon} + \underbrace{\frac{1}{h}(n \otimes [[u]])^S}_{\varepsilon} \quad (60)$$

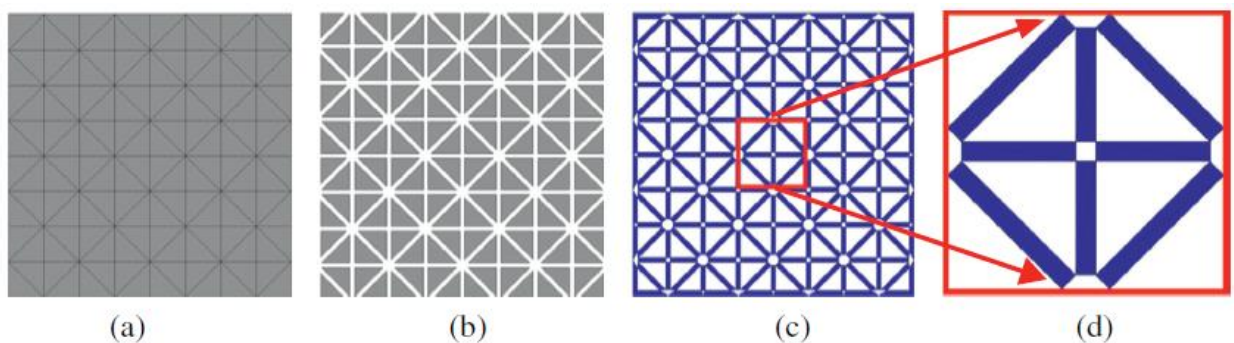
Então quando a altura h tende a zero, a componente $\tilde{\varepsilon}$, lembrando que esta componente não depende de h , mantém-se limitado, o mesmo não acontece com a componente ε , ou seja, esta componente se torna ilimitada e as deformações do elemento de interface são definidas quase que unicamente pelo componente do nó (1) e pela sua projeção (1') na base do elemento. Expondo que o vetor de deslocamentos do elemento, descontinuidades fortes. (MANZOLI, *et al.*, 2012; SÁNCHEZ *et al.*, 2014; MAEDO, 2015; SEIXAS, 2015; CLETO, 2016 e MACIEL, 2017).

4.1.1 Técnica de Fragmentação da Malha

Esta técnica utiliza elementos finitos sólidos com alta razão de aspecto (MANZOLI *et al.*, 2012) para descrever o processo de formação de fissuras em um meio inicialmente contínuo.

A peculiaridade do elemento usado que compõe a interface é um triângulo linear com alta razão de aspecto, cuja cinemática é comparada com a cinemática da aproximação de descontinuidades fortes em modelagens de problemas mecânicos. A Figura 19 mostra os passos da fragmentação de uma malha convencional de elementos finitos. O objetivo de tal técnica é usar uma espessura menor que a espessura do elemento finitos localizado no meio contínuo. Pois à medida que a espessura (h) diminui a razão de aspecto aumenta, resultando uma cinemática similar ao que pode ser observado na cinemática da Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes (ACDF).

Figura 19 - Principais passos associados à técnica de fragmentação de malhas.



Fonte: Sánchez *et al.*, 2014.

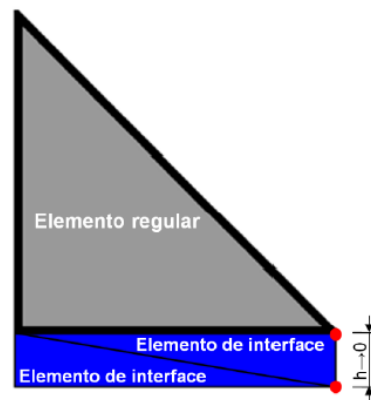
(a) Malha convencional de elementos finitos; (b) Fragmentação da malha; (c) Inserção de elementos de alta razão de aspecto; (d) Detalhe dos elementos de interface.

Desta forma a malha que passar pelo processo de fragmentação terá em sua composição elementos finitos regulares, que representam o meio contínuo ou o material não fraturado, e elementos finitos de interface que representam as descontinuidades ou os caminhos possíveis para a abertura de fraturas no meio.

De acordo com Manzoli, *et al.*, (2016) recomenda-se que a espessura do elemento de interface seja igual a 1% do tamanho dos elementos regulares. Desde que o tamanho dos elementos regulares tenha sido escolhido para capturar com precisão o campo de tensão, elástico, antes da formação da fissura, visto que os elementos regulares menores produzem respostas mais precisas.

A Figura 20 mostra em detalhes o posicionamento dos elementos de interface entre os elementos regulares.

Figura 20 - Detalhe do posicionamento dos elementos de interface entre os elementos regulares da malha de elementos finitos.



Fonte: Seixas, 2015.

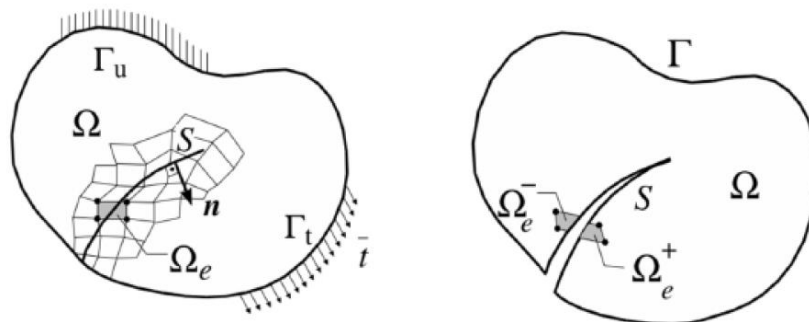
De acordo com Sánchez *et al.*, 2014 a malha fragmentada é composta de elementos finitos regulares, tais elementos representam o contínuo ou o material não fraturado, e de elementos de interface que representam as descontinuidades ou os caminhos possíveis para a geração e conseqüentemente propagação de fraturas no meio rochoso.

4.2 ELEMENTOS FINITOS COM DESCONTINUIDADES FORTES INCORPORADAS

Conforme Beserra (2015) a técnica de descontinuidades fortes incorporadas permite a representação de descontinuidades no campo de deslocamentos no interior do elemento finito o que isenta a utilização de malhas extremamente refinadas, ou o processo de consecutivos refinamentos de malhas, ou ainda de utilizar elementos especiais de interface discretos.

A inserção das descontinuidades no elemento finito contínuo se dá com as deformações que estão localizadas em bandas estreitas, denominadas descontinuidades fracas, sendo que os deslocamentos se concentram conforme a degradação do material, em zonas de processamento da fratura, até acarretar a ruptura completa da descontinuidade, quando isso ocorre desenvolve descontinuidade no campo dos deslocamentos sendo denominada de descontinuidade forte. A Figura 21 apresenta um corpo com descontinuidades incorporadas.

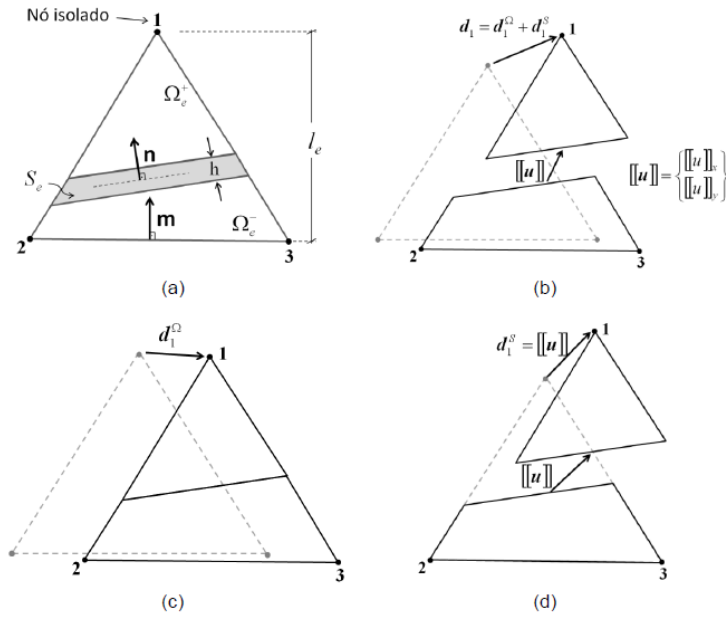
Figura 21 - Exemplo esquemático de um elemento geométrico representando um corpo com descontinuidades incorporadas.



Fonte: Manzoli, 2008.

O campo de deslocamento é constituído de elementos finitos triangulares de três nós, de domínio Ω_e , comprimento l_e , com uma banda de localização de deformações, S_e , de largura h , dividindo o elemento em duas partes, Ω_e^- e Ω_e^+ , isolando o nó (1) dos restantes dos nós (2) e (3). A Figura 22 mostra a decomposição do campo de deslocamento e o respectivo salto de deslocamento.

Figura 22 - Representação esquemática demonstrando a decomposição do campo de deslocamentos.



Fonte: Beserra, 2015.

(a) Elemento indeformado; (b) Elemento deformado; (c) Deformação da parte contínua; (d) Movimento relativo devido à descontinuidade.

Deste modo o campo de deslocamento, u , interno ao elemento pode ser decomposto em uma componente, u_Ω , associada com a deformação do meio contínuo e uma componente, u_S , relacionada ao movimento de corpo rígido entre as duas partes do elemento.

$$u = u_\Omega + u_S \quad (61)$$

O movimento relativo é considerado uniforme interno ao elemento, a componente de corpo rígido pode ser expressa como:

$$u_S = H_{S_e} \llbracket u \rrbracket \quad (62)$$

Portanto,

$$\llbracket u \rrbracket = \left\{ \begin{matrix} \llbracket [u] \rrbracket_x \\ \llbracket [u] \rrbracket_y \end{matrix} \right\} \quad (63)$$

A função *Heaviside*, uma função contínua definida em Ω_e contém as componentes do salto de deslocamentos na interface, que é definida como:

$$H_{S_e} = \begin{cases} 1 & \text{em } \Omega_e^+ \\ 0 & \text{em } \Omega_e^- \end{cases} \quad (64)$$

4.3 INTEGRAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ELEMENTOS FINITOS DE INTERFACE DE ALTA RAZÃO DE ASPECTO E DESCONTINUIDADES FORTES INCORPORADAS

Esta etapa se baseia na integração das técnicas de elementos finitos de alta razão de aspecto, consequentemente implica na fragmentação do meio rochoso com o objetivo de gerar fraturas ou simplesmente reativá-las. E a técnica de descontinuidades fortes incorporadas, que compreende na inserção de descontinuidades no meio rochoso.

Portanto serão descritos a seguir o passo-a-passo da simulação dos casos analisados nesta tese e como obter os resultados. Estas simulações foram subdivididas em três etapas, denominadas de pré-processo, processo e pós-processo.

Na fase de pré-processamento, primeiro foi utilizado o *software* gratuito Gmsh, para definir a geometria inicial, as condições de contorno mecânicas, as propriedades dos materiais e a geração do arquivo *.msh* que engloba todas as informações. Em seguida tal arquivo é processado pela rotina do P3MATPac (Pre-and Post-Processing MATLAB package) (TEIXEIRA *et al.*, 2017), que fundamenta-se numa galeria de rotinas, funções e extensões que fornece operações de alto nível para tarefas de pré e pós-processamento. Depois da utilização desta rotina origina-se o arquivo denominado de *_gri.dat* que contém todas as informações da malha de elementos finitos regulares a ser fragmentada.

Ainda na fase de pré-processo, utiliza-se a rotina *fragmenta.m* (SEIXAS, 2015 e MACIEL, 2017) a qual é responsável pela inserção dos elementos especiais de interface. Assim os arquivos de saída são gerados, sendo estes: *_gri.dat* e *_gen.dat*. Estes são os arquivos de entrada do *software* CODE-BRIGHT, contém todas as informações da malha final com os elementos de interface inseridos, condições de contorno e dados de entrada necessários para passar pela próxima etapa, que consiste no processamento dos dados.

A etapa de processamento é realizada no *software* CODE-BRIGHT. Depois de executada tal etapa o CODE-BRIGHT gera arquivos de saída, como por exemplo, *.msh* e *.res*

que permitem a prévia visualização de todas as condições iniciais da malha final através do *software* comercial GiD®. O arquivo *.msh* é incumbido pela visualização das informações dos elementos e materiais da malha e o arquivo *.res* é incumbido pela visualização das condições de contorno, o que viabiliza executar possíveis correções antes da análise (etapa de pós-processamento) em elementos finitos.

Na etapa de pós-processo os arquivos obtidos na etapa anterior *.msh* e *.res* são utilizados com os resultados das simulações, sendo visualizados e analisados pelo mesmo *software* GiD®.

Com base nas simulações prévias utilizando elementos finitos de interface para identificar zonas de ruptura no meio rochoso, foi inserido posteriormente descontinuidades fortes incorporadas com a pretensão de estudar a configuração de geração e propagação de fraturas e as possíveis reativações das falhas pré-existentes.

Para inserir estas descontinuidades, faz-se uso das seguintes rotinas desenvolvidas no *software* comercial MATLAB:

- **<fixmat.m>** Sub-rotina criada para acrescentar as descontinuidades pelo simples cálculo de distância entre dois pontos.
- **<fixbcond.m>** É responsável pela fixação da condição de contorno da descontinuidade inserida.
- **<gera_CB_gri.m>** Sub-rotina que gera o novo arquivo de saída *_gri.dat* contendo a descontinuidade inserida na malha fragmentada.

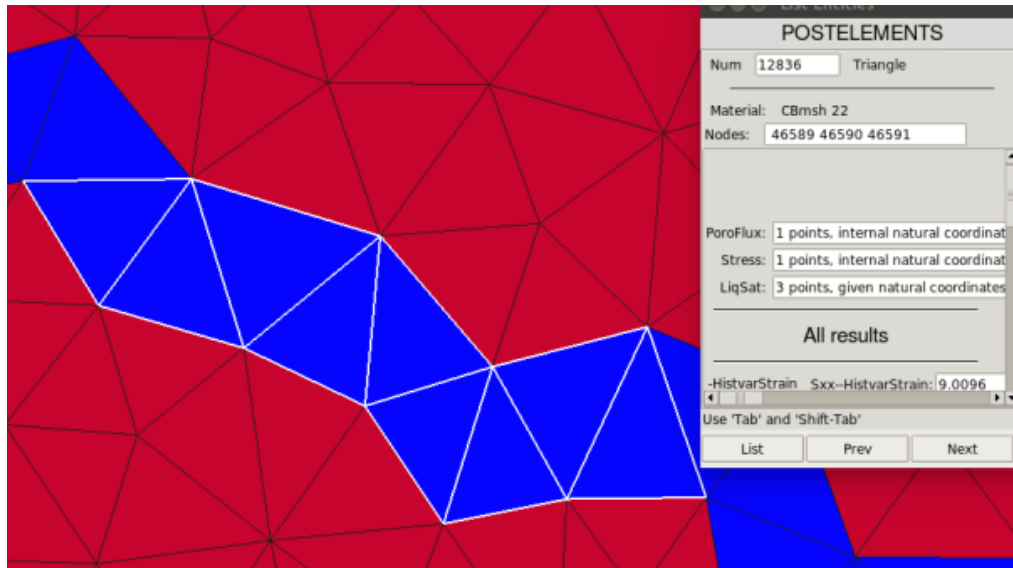
Como a malha de elementos finitos está fragmentada há a possibilidade de dividir o material da descontinuidade incorporada em dois materiais distintos, para isso utiliza-se a rotina P3MATPac munidos dos arquivos *_gri.dat*, *_gen.dat*, da seguinte forma:

- **<G=grid.processing.getGridInfo()>** Esta sub-rotina faz uma leitura dos e lista todos os nós e elementos da malha de elementos finitos.
- **<G.cells.nummat (A)>** Sub-rotina responsável por listar os materiais.
- **<G.cells.mat (A)>** Sub-rotina responsável por identificar materiais distintos.

- **<iotools.write.Grid(nome do arquivo novo)>** Está sub-rotina insere um novo material na descontinuidade incorporada.

Realizando as etapas destacadas acima a descontinuidade incorporada terá dois materiais distintos, tal etapa pode ser visualizada na Figura 23 que segue.

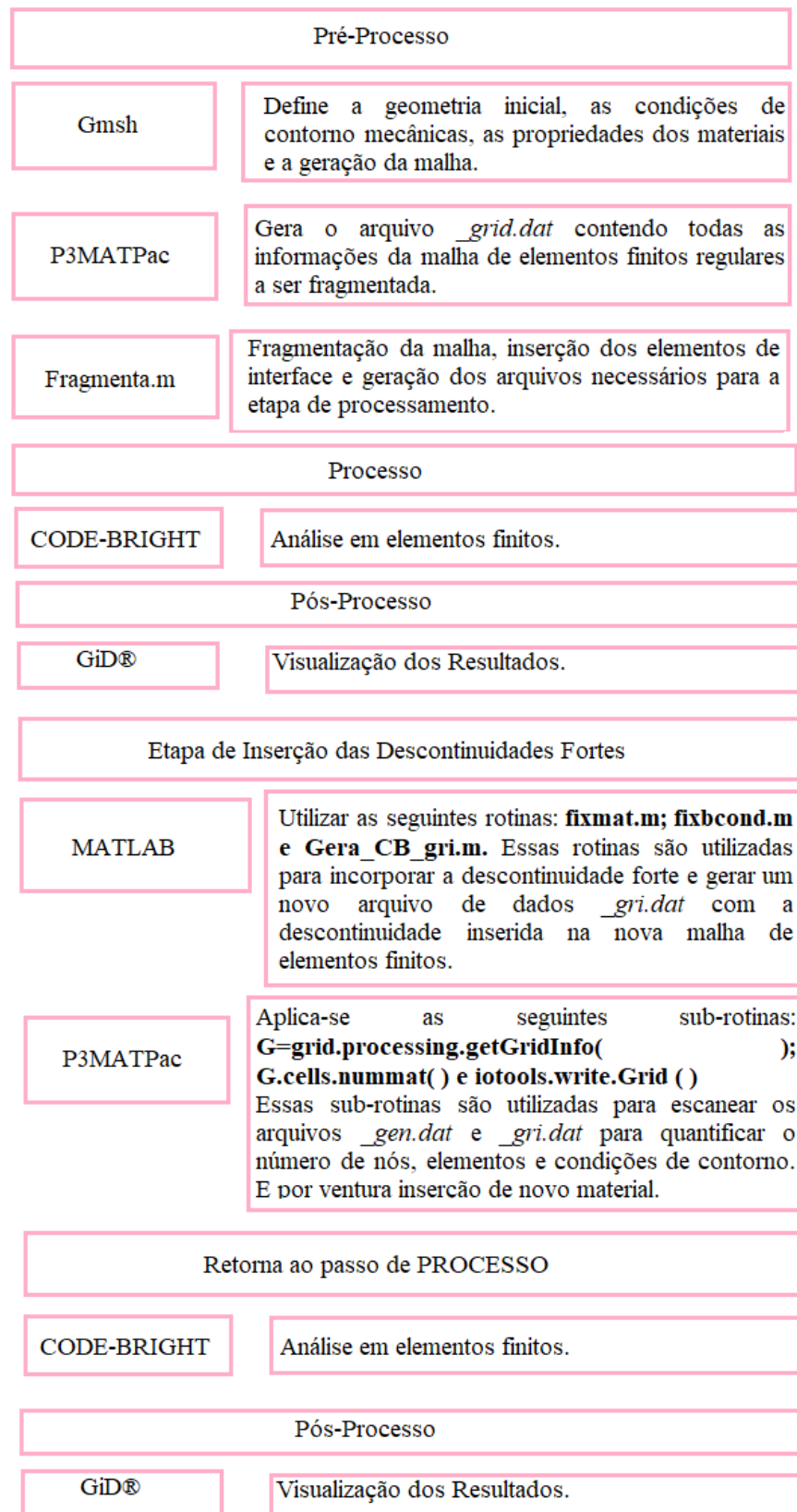
Figura 23 - Sub-rotina que divide em dois materiais a descontinuidade incorporada.



Fonte: A Autora, 2018.

Realizando a inserção da descontinuidade incorporada, a simulação volta pra etapa denominada de processamento. A Figura 24 apresenta o passo a passo das etapas operacionais detalhadas acima.

Figura 24 - Etapas operacionais das simulações.



Fonte: A Autora, 2018.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os estudos geológicos de afloramentos de formações rochosas como análogos de reservatórios de petróleo possibilitam a geração de modelos físicos a serem simulados numericamente, considerando diversos tipos de acoplamento entre diferentes físicas (fluxo de fluido, deformações, reações químicas e etc.). Este tipo de trabalho implica em uma abordagem multidisciplinar, uma vez que envolve levantamentos dos afloramentos por meio de modelagens geológicas.

Neste capítulo apresentam-se os resultados de análises cujo objetivo foi de estudar as rochas da Fm. Crato como análogo de reservatório e verificar a abertura de fraturas decorrentes da movimentação mecânica das rochas, aqui representadas por conduções de contorno (tensão ou deslocamento prescrito).

A geração e propagação de fratura em uma rocha intacta é um aspecto físico de fundamental importância no estudo de meios rochosos naturalmente fraturados, uma vez que para entender as características mecânicas e hidráulicas de um maciço rochoso, é necessária a análise do comportamento mecânico da rocha intacta. Isto envolve basicamente estudos de laboratório em amostras considerando diferentes escalas de medidas e formas de obtenção (testemunhos de poços de petróleo, amostragem de afloramentos, amostras em minas subterrâneas, por exemplo). Um aspecto importante é que na maioria dos tipos de rochas, o tamanho dos grãos são pequenos em relação à escala das amostras estudadas mecanicamente e com isso considera-se uma condição de homogeneidade e isotropia.

Portanto, aqui são descritos os problemas simulados nesta tese, bem como os resultados obtidos e as análises realizadas. Foram ao todo três cenários subdivididos em etapas que serão descritas a seguir. O primeiro problema é a simulação de um ensaio de compressão diametral. Já o segundo trata-se da simulação de geração e propagação de fraturas em um cenário bidimensional representado uma região, em planta, dos laminitos da Formação Crato. Por fim, o terceiro cenário consiste na simulação da geração e propagação de fraturas em um perfil sintético equivalente à variação litológica da Fm. Crato. Para todos os cenários foram adotadas propriedades geomecânica dos laminitos da Fm. Crato e aplicadas às técnicas de descontinuidades fortes apresentadas no capítulo 4 desta tese.

Desta forma, uma vez feito o estudo para casos de ensaios laboratoriais, a aplicação destas técnicas foi estendida nos desenvolvimentos seguintes a cenários de geração de fraturas

naturais da Fm. Crato como ambiente extensional no período de soerguimento da Bacia do Araripe.

Os exemplos numéricos aqui analisados foram simulados no código numérico de elementos finitos CODE_BRIGHT (COupled DEformation BRIne Gas and Heat Transport) (Olivella *et al.*, 1995) em análises de deformação plana empregando o modelos constitutivo de dano à tração para a modelagem da formação e propagação de fraturas.

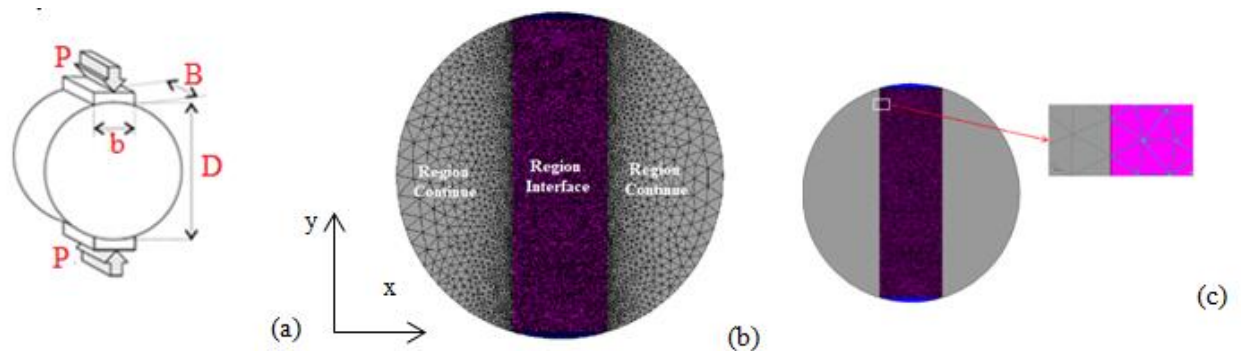
5.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de compressão diametral, mais conhecido como ensaio brasileiro, tem a solução analítica dada pela Equação 65 que fornece a medida da resistência à tração f_t do material calculada a partir da carga última (pico) de ruptura P , do comprimento B e do diâmetro D do corpo de prova.

$$f_t = \frac{2P}{\pi BD} \quad (65)$$

Para a simulação, foi adotada uma análise em deformação plana de uma seção circular com relação $D/B=0.7$, ver Figura 25(a), cuja malha de elementos finitos está apresentada na Figura 25(b). Foi definida uma região retangular considerando a fragmentação da malha com adoção de elementos especiais de interface, cujo eixo coincide com a linha de ação da força de compressão. Já as demais porções da geometria da malha compreendem de elementos finitos regulares (ditos como contínuos). O objetivo desta simulação é empregar uma malha com alta densidade de elementos especiais para permitir a captura mais realista da geração das fraturas por tração e observar a evolução dessas fraturas. A malha de elementos finitos possui um total de 44999 nós e 53560 elementos do tipo triângulo linear. A espessura inicial dos elementos de interface adotada foi de 1×10^{-5} m. Como condições de contorno foram prescritas no nó extremo superior da seção uma taxa de deslocamento de $5,0 \times 10^{-5}$ m/s e a restrição de deslocamento nos nós extremo inferior.

Figura 25 - Ensaio de Compressão Diametral.



Fonte: A Autora, 2018.

- (a) Descrição esquemática do ensaio de compressão diametral; (b) Malha de elementos finitos; (c) Detalhe dos elementos especiais de interface localizados na região fragmentada.

Para todos os elementos da malha foi empregado o modelo de dano à tração, sendo adotadas as propriedades mecânicas de módulo de Young (E) e coeficiente de Poisson (ν). Estas propriedades foram obtidas a partir dos resultados de ensaios elastodinâmicos em amostras de laminitos da Formação Crato realizado no Laboratório de Petrofísica da UFCG.

Os valores obtidos nestes ensaios foram de $E_{din} = 40.83$ GPa e $\nu = 0.247$. Com isso, calculou-se o módulo de Young elástico estático a partir do dinâmico empregando-se a equação $E_{est} = 0,675E_{din} - 3,84$ obtida no estudo de calcários, arenitos e folhelhos por Bastos *et al.* (1995).

Além disso, empregou-se um valor aproximado de 9.MPa para a resistência à tração com base no menor valor observado nos ensaios de compressão diametral para as amostras aqui consideradas. Estes foram realizados do Laboratório de Mecânica das Rochas do CENPES-Petrobras (Correia *et al.*, 2015) empregando um equipamento MTS 816.

Os ensaios à tração foram realizados conforme esquematizado na Figura 25(a) e as resistências à tração foram obtidas conforme a equação 65, sendo consideradas as forças na ruptura (tensão de pico). As amostras apresentaram resistências relativamente altas, relativos a experiência de ensaios desse tipo já realizados no laboratório, principalmente por ser um material bastante laminado.

Os ensaios foram realizados com aplicação de carga perpendicular ao acamamento. Houve o aparecimento de rupturas adjacentes secundárias, perpendicular à ruptura vertical, as

quais serviram como um modelo experimental a ser simulado posteriormente, dando robustez e servindo de calibração aos modelos numéricos desenvolvidos.

A Tabela 1 apresenta a descrição dos materiais que foram adotados na simulação, sendo empregados tanto para os elementos de interface quanto para os elementos regulares com o objetivo não só de capturar a formação das fraturas como também ter a indicação de possíveis rupturas em áreas fora do núcleo do corpo de prova.

Tabela 1 - Propriedades dos Materiais empregados na simulação de compressão diametral.

Materiais	Módulo de Young (E)GPa	Poisson (ν)	Energia de Fratura (G_f)N/m	Resistência a Tração (δ_y)MPa
Região Continua	23720,00	0,247	----	9,00
Região Interface	23720,00	0,247	420,00	9,00

Fonte: A Autora, 2018.

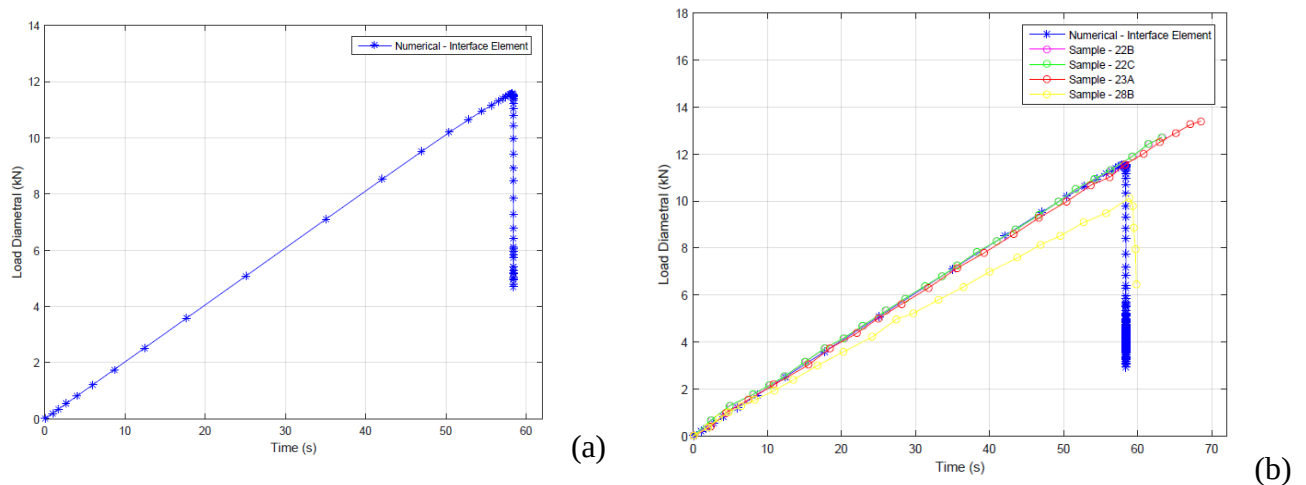
A partir da descrição realizada acima, a seguir serão discutidas as análises das simulações que foram realizadas em duas etapas distintas: A primeira adotando apenas os elementos especiais de interface na região central do corpo de prova, a rocha foi denominada de rocha intacta.

A segunda etapa ocorreu à combinação das técnicas de elementos finitos de interface e descontinuidades fortes incorporadas com o objetivo de reproduzir a formação de fraturamento na direção da laminação da rocha (rocha com elementos incorporados).

5.1.1 Rocha Intacta

Na simulação inicial, apenas com elementos especiais de interface, a curva de evolução de carga diametral com relação ao tempo, foi observado o comportamento elástico linear do material até o limiar da ruptura, onde ocorre o processo de danificação do núcleo da seção e propagação deste dano ao longo da região central. O tempo em que isso ocorre se dá a partir de 56,5 segundos. A Figura 26(a) mostra a curva de evolução de carga pré e pós-ruptura do material e a Figura 26(b) apresenta a comparação do resultado da simulação da rocha homogênea com as curvas de evolução de carga das amostras da solução experimental (amostras 22B, 22C, 23A e 28B).

Figura 26 - Curva de evolução de carga diametral antes e pós-ruptura.



Fonte: A Autora, 2018.

(a) Solução amostra homogênea; (b) Comparação da solução homogênea e soluções experimentais.

Verifica-se que no gráfico da comparação da solução numérica do cenário homogêneo e as curvas das soluções experimentais se apresentou dentro do intervalo das respostas experimentais, apresentando uma ruptura para tempo aproximadamente igual ao observado na amostra 28B, cuja resistência à tração é de 9.51MPa. Em relação a esta observou-se que na simulação atingiu-se uma carga diametral superior à do ensaio, possivelmente devido ao fato de o modelo ser intacto (não considerando a real laminação, microporosidade e demais heterogeneidades geomecânicas e petrofísicas que possam existir na rocha). Apesar disso, a resposta mecânica se mostrou adequada, representando de forma aproximada o comportamento do material no ensaio.

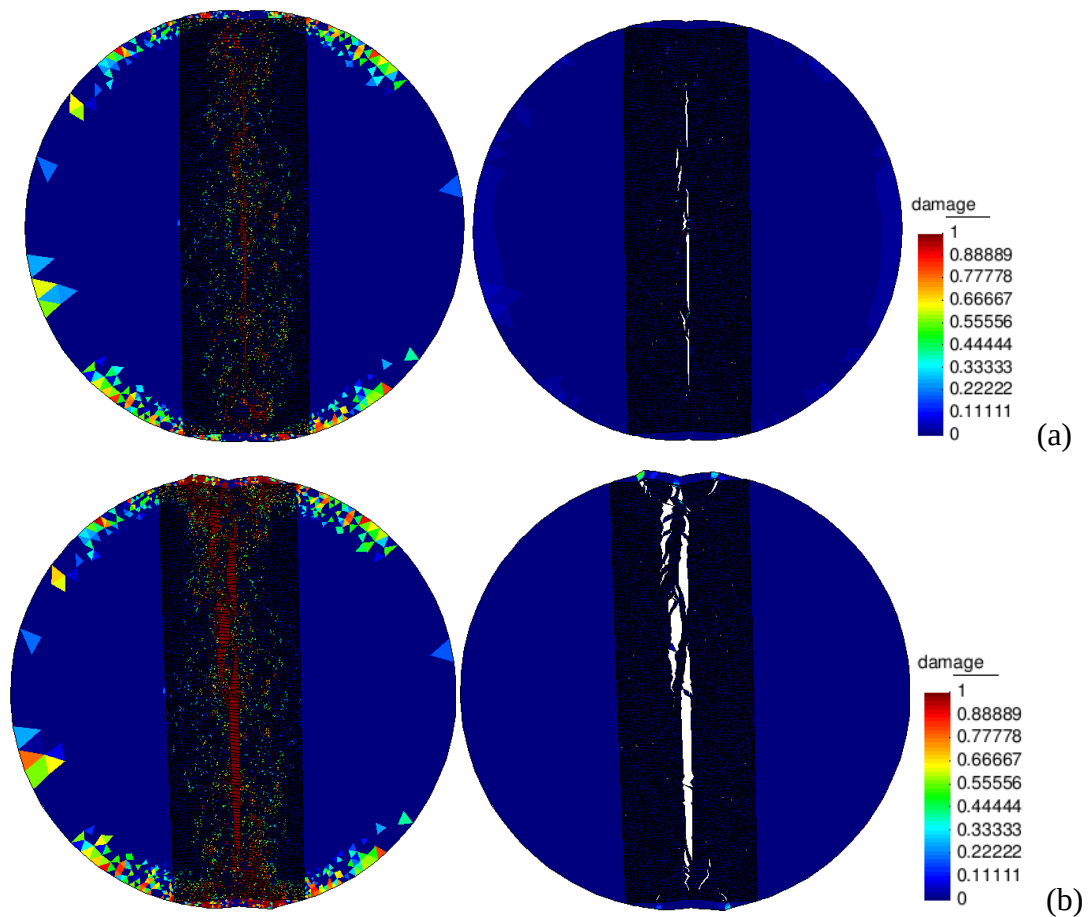
Já com relação às demais amostras, observa-se que a curva da simulação acompanha a trajetória das experimentais e apresenta uma queda (ruptura) antes das demais, uma vez que estas possuem resistência à tração da ordem de 11 MPa.

A Figura 27 mostra a ruptura do material para diferentes valores de tempo crescentes a partir de 56.5 segundos, medida pela variável de Dano e pela abertura de fratura. O processo se inicia no centro da amostra e se propaga na direção do topo e base na direção da linha de ação da carga de compressão diametral.

Isto se deve ao fato de tensões de tração ocorrerem nesta região, induzindo ao dano da rocha e à formação de micro fraturas que se propagam rapidamente do centro na direção dos pontos de carga e reação do corpo de prova. A descontinuidade é efetivamente observada quando o dano nos elementos de interface chega ao valor $d=1,0$. Neste caso, percebe-se a

formação de fraturas que se propagam e interagem entre si, formando uma zona de ruptura por tração. Observa-se ainda a formação de fraturas difusas na região próxima ao ponto de aplicação do carregamento e na base onde é gerada a reação de força na amostra, observar a Figura 27.

Figura 27 - Evolução do Dano e Abertura de Fraturas, em metros, para o passo de tempo 4 a 6.

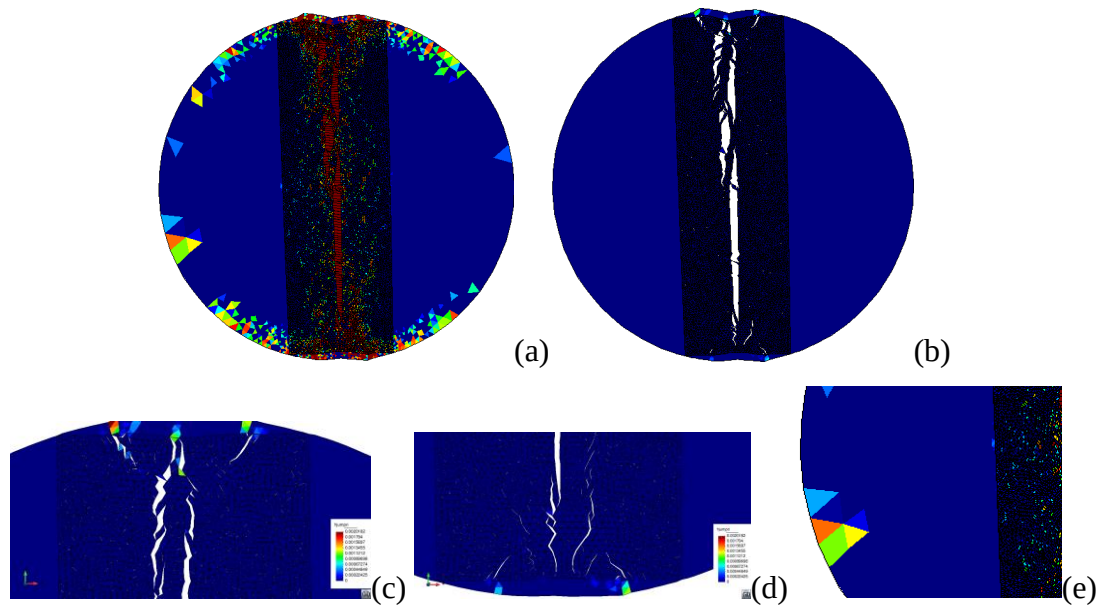


Fonte: A Autora, 2018.

(a) Dano 57,186s e Abertura de fratura de 57,186s; (b) Dano de 57,191s e Abertura de Fratura de 57,191s.

Observa-se, Figura 28, um maior detalhe da formação de fraturas distribuídas nas regiões no topo da amostra, na região próxima ao ponto de aplicação do carregamento e na base onde é gerada a reação de força na amostra.

Figura 28 - Variável de Dano à tração e abertura de fratura.

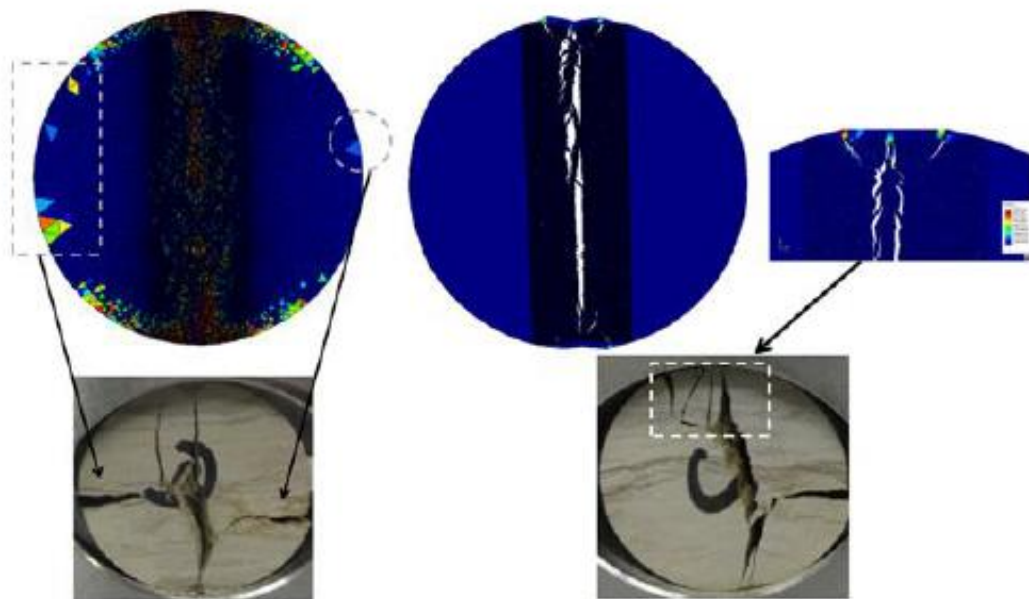


Fonte: A Autora, 2018.

- (a) Dano à tração; (b) Abertura de Fratura; (c) Detalhe de abertura de fratura, na posição do topo da amostra; (d) Detalhe de abertura de fratura, na posição base da amostra; (e) Detalhe da região lateral, onde será inserida a fratura incorporada.

A Figura 29 destaca que as simulações realizadas obtiveram um padrão de ruptura do material parecido com as amostras realizadas em laboratório.

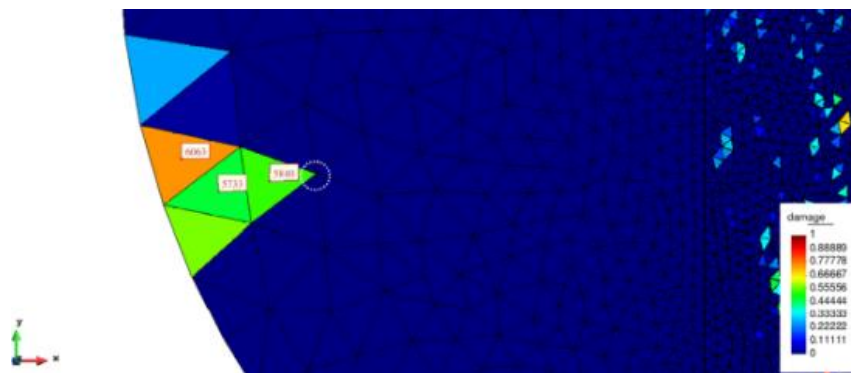
Figura 29 - Evolução do dano e abertura (metros) de fratura.



Fonte: A Autora, 2018.

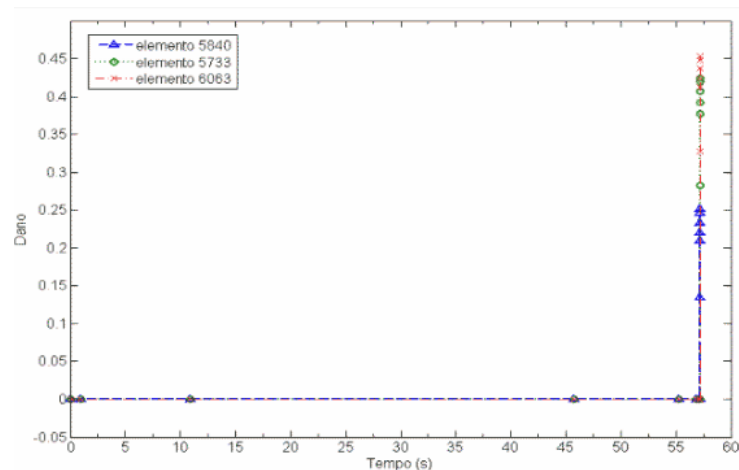
Ao verificar a tendência de fraturamento lateral devido à evolução da variável de dano nos elementos contínuos na região lateral da amostra, (Ver Figura 30) foi selecionado alguns destes elementos e foram construídos os gráficos de evolução da variável de dano com o tempo, (Ver Figura 31) de forma a avaliar a tendência de ruptura do material e em que instante isso tende a ocorrer, uma vez que as fraturas por compressão diametral tendem a ocorrer no centro da amostra e a região lateral desta deve apresentar-se sob compressão.

Figura 30 - Região de análise de ocorrência de dano e tendência de fraturamento lateral: elementos finitos selecionados.



Fonte: A Autora, 2018.

Figura 31 - Evolução da variável de Dano para os elementos da região com dano lateral.



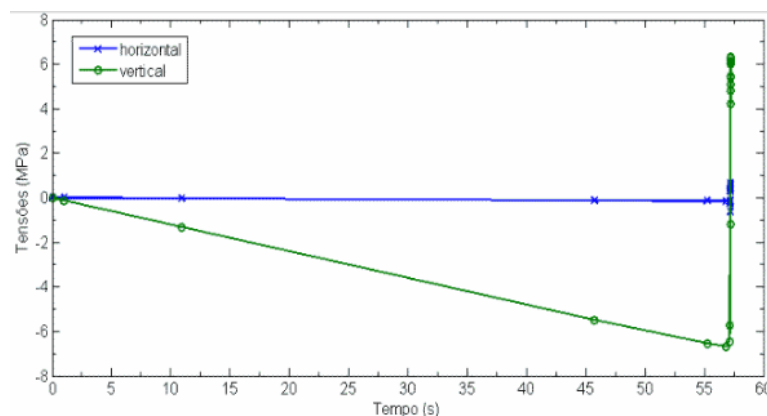
Fonte: A Autora, 2018.

Observa-se que a variável de dano atinge valor próximo a 0,5 que não leva à total degradação do material e geração de fraturas, porém indica a tendência de que isso ocorra caso haja uma zona de fraqueza da rocha nesta região quanto a um esforço de tração, ou seja, a existência de laminação.

Além disso, verificou-se a ocorrência de tração nesta região através da evolução das tensões horizontal e vertical com o tempo no nó da extremidade do elemento danificado, conforme destacado por um círculo pontilhado na Figura 30. Dado que os elementos que sofreram ruptura apresentam uma forma de propagação horizontal, deduz-se que nesta região há a possibilidade de geração de fratura normal à fratura da região central. Isto pode ser observado na Figura 32, onde é possível ver que as tensões verticais são de compressão nesta zona, mas, após a ruptura da amostra na parte central devido à compressão diametral, há uma mudança na trajetória da tensão vertical na região lateral da amostra. Esta passa de um regime de compressão para o regime de tração, atingindo valor próximo à resistência à tração adotada.

Enquanto isto as tensões horizontais apresentam valores próximo de zero e não apresentam efeitos de tração consideráveis após a ruptura. Fica evidente que, havendo a consideração de níveis de laminação da amostra, é possível que na modelagem numérica com a fragmentação total da malha reproduza a geração de fratura horizontal conforme observado nos ensaios de laboratório (28). Isso também pode ser capturado ao se adotar uma estratégia de elementos de descontinuidades fortes incorporadas, conforme será descrito no item seguinte.

Figura 32 - Evolução das tensões horizontais (x) e tensões verticais (y).



Fonte: A Autora, 2018.

Em Lee H. P. *et al.* (2018) realizou-se uma comparação de um modelo experimental (folhelho, *Marcellus shale*) com simulação numérica baseado no método de elementos discretos.

As fraturas foram induzidas com angulações diferentes (veios) e a partir disso foi estudado a curva de evolução da carga diametral, com a pretensão de determinar a ruptura do material (bico de ruptura). Nesta tese também será realizado uma comparação da simulação

númerica com ensaios de laboratório, pode-se destacar neste gráfico a curva diametral correspondente a amostra 28B e a simulação numérica, tais resultados foram semelhantes ao de Lee H. P. *et al.* (2018) e Lee H. P. *et al.* (2016).

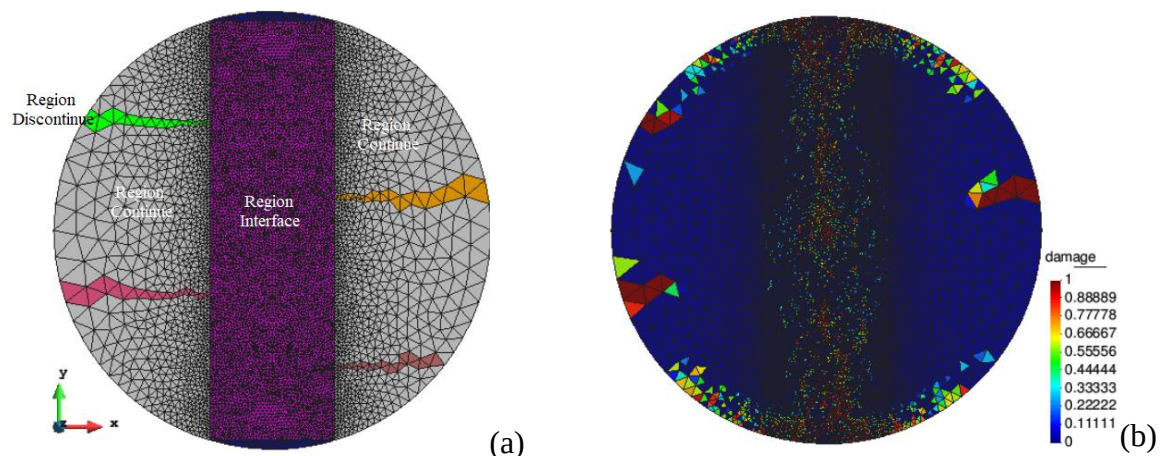
Em Mahabadi *et al.*, (2010) o material estudado consiste em um granito. Realizou-se a simulação combinando os modelos de elementos finitos e elementos discretos para analisar a propagação de fraturas em diferentes passos de tempo. Os resultados mostram que o material também degrada na região central do corpo de prova, característica fundamental no ensaio de compressão diametral, sem geração de fraturas perpendiculares ao eixo de carregamento.

Então depois de realizado todos esses estudos, foram inseridos elementos finitos de descontinuidades fortes incorporadas para capturar a ocorrência de fraturas distribuídas na lateral da amostra, ou seja, devidas à laminação da rocha.

5.1.2 Rocha com Elementos Incorporados

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na segunda etapa das simulações com a integração das técnicas de elementos especiais de interface e descontinuidades fortes incorporadas. Foram inseridos elementos incorporados nas regiões de possível ruptura na lateral da amostra. A Figura 33 destaca a descontinuidade incorporada e a variável de Dano. As propriedades são as mesmas da simulação com a amostra homogênea, destacando apenas que na região onde foram inseridos os elementos incorporados a resistência à tração é igual a $\sigma_y = 6$. MPa representando assim a laminação como uma zona de fraqueza à tração.

Figura 33 - Amostra com elementos incorporados.



Fonte: A Autora, 2018.

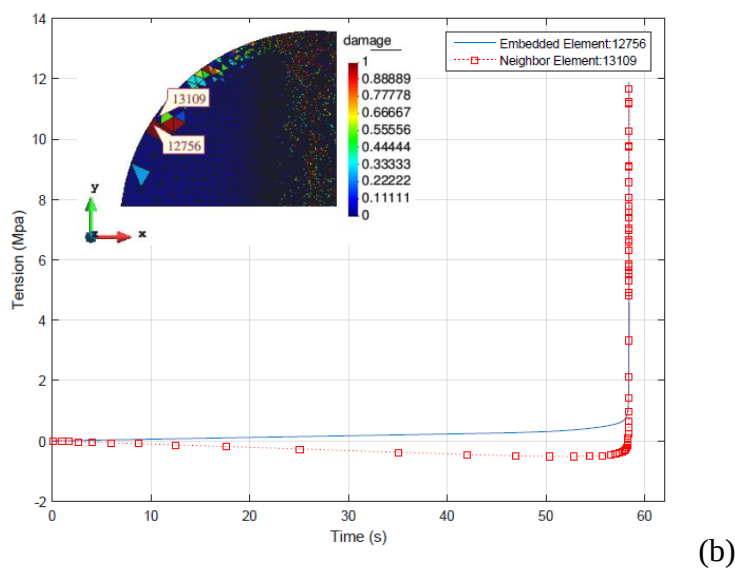
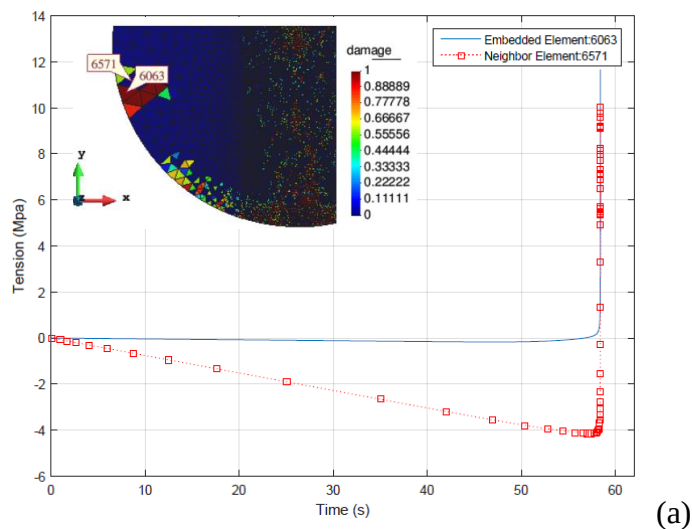
(a) Detalhe dos elementos incorporados; (b) Variável de Dano à tração.

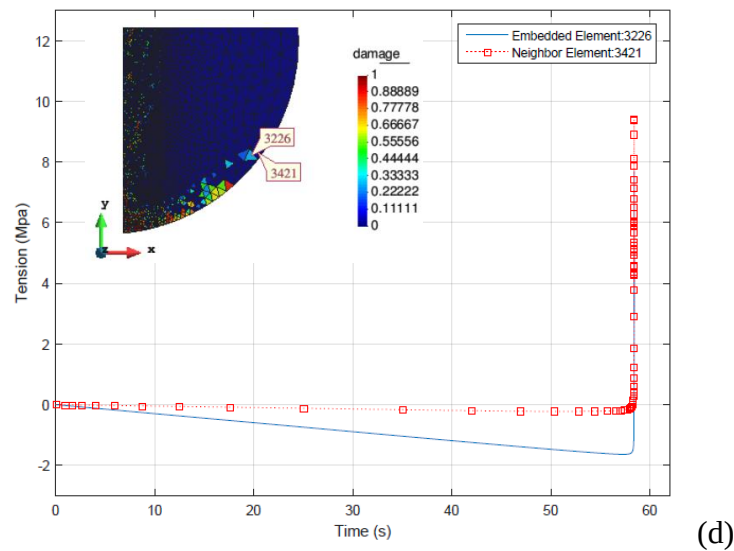
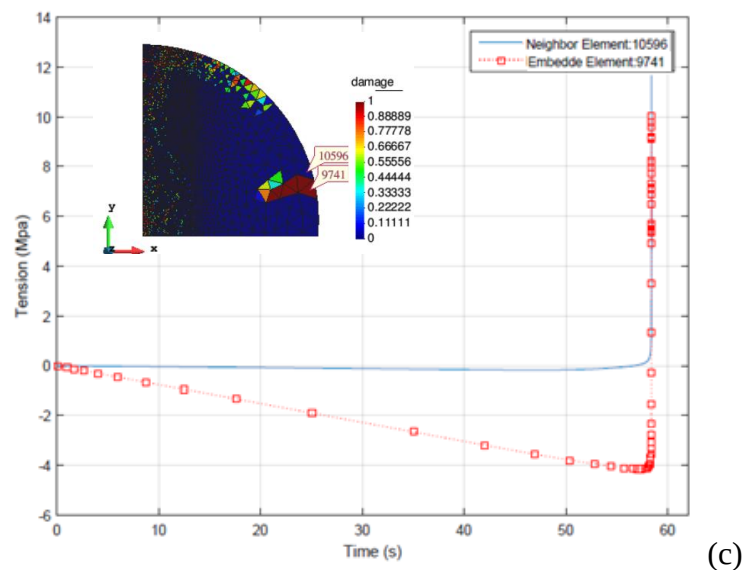
Observa-se ainda a formação de fraturas na região próxima ao ponto de aplicação do carregamento, na base onde é gerada a reação de força da amostra e nas laterais da amostra, conforme observado na Figura 28(e).

Então foram inseridos elementos finitos de descontinuidade fortes incorporadas nesta região com o propósito de verificar a evolução das tensões verticais e comparou-se com a evolução de tensões horizontais da região central da amostra.

A Figura 34 destaca a evolução das tensões verticais (y), localizado no elemento incorporado e o elemento vizinho ao elemento incorporado. Pelos respectivos gráficos, percebe-se que houve ruptura do material, validando a hipótese levantada com a simulação puramente homogênea.

Figura 34 - Evolução das tensões verticais.



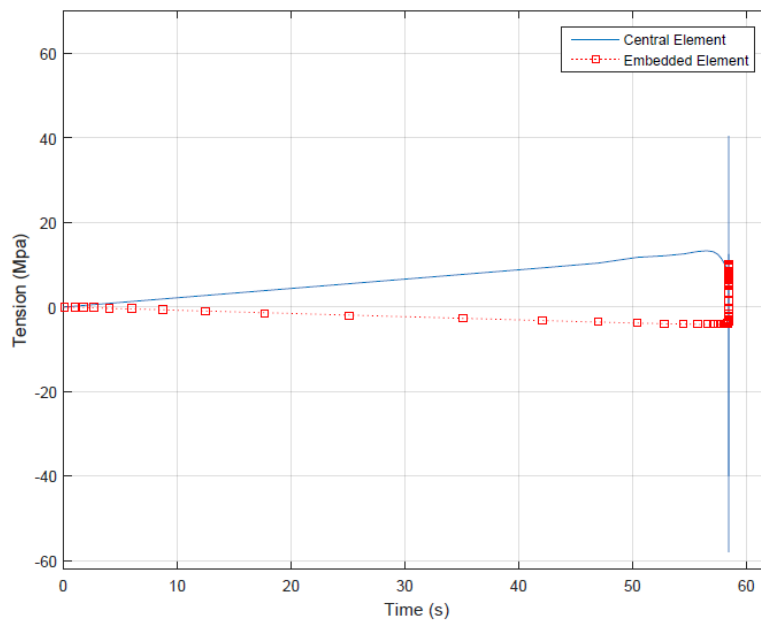


Fonte: A Autora, 2018.

(a); (b); (c); (d) Comparação das tensões verticais do elemento incorporado e o elemento vizinho ao mesmo e as respectivas localizações dos elementos incorporados e o elemento vizinho.

Percebe-se que ao atingir a tensão máxima, o material atinge o critério de Dano e se rompe. Então ao se chegar à ruptura do material pela compressão diametral na região central da amostra, tais fraturas promovem uma redistribuição de tensões no corpo de prova. Desta forma surgem outras fraturas em áreas distintas o que pôde ser verificado aqui com a adoção de descontinuidade incorporada.

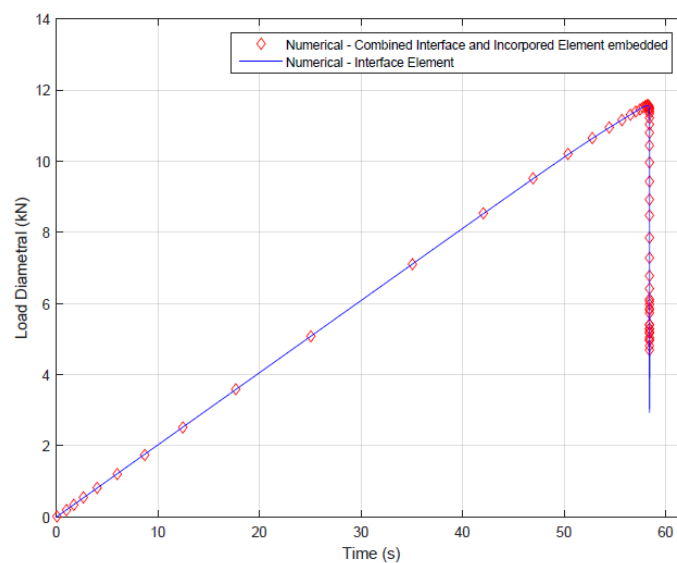
Figura 35 - Comparação das evoluções das tensões verticais (elemento incorporado) e tensões horizontais (elemento localizado no centro do corpo de prova).



Fonte: A Autora, 2018.

Na Figura 36 apresenta-se a comparação das curvas de evolução temporal de carga diametral para o caso empregando apenas fragmentação de malha (rocha intacta) e o caso combinando a técnica de fragmentação e incluindo descontinuidades fortes para representação de zonas de laminação nas laterais da amostra.

Figura 36 - Comparação das evoluções de carga diametral pré e pós-ruptura.



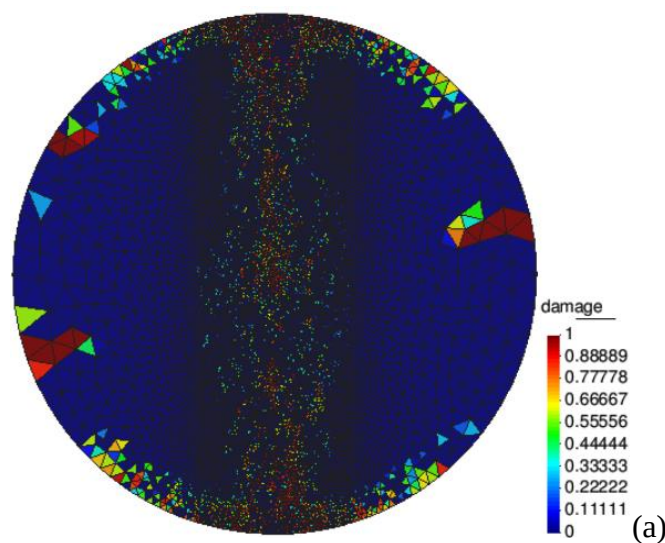
Fonte: A Autora, 2018.

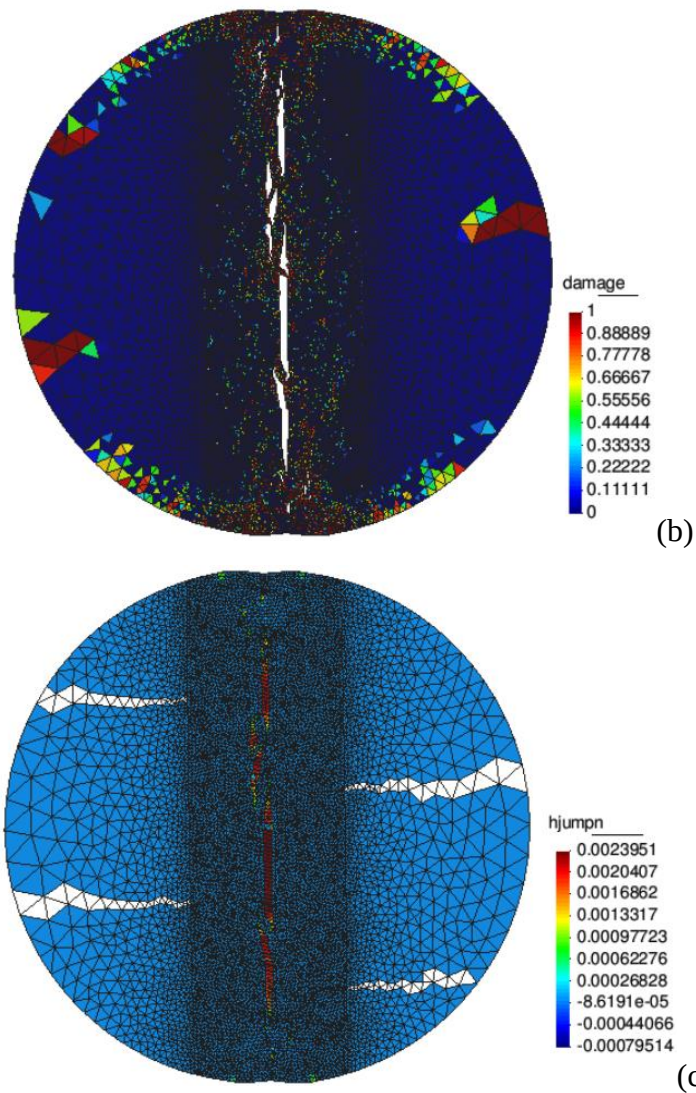
O tempo em que isso ocorre se dá a partir de 58 segundos de carregamento na simulação, tanto na simulação com a amostra homogênea como com a amostra com elementos incorporados inseridos, enquanto que o tempo de ruptura em laboratório foi de 59 segundos para a amostra com resistência à tração de 9.51MPa (amostra 28B).

O processo de ruptura se inicia no centro da amostra definida pela variável de Dano e pela abertura de fratura (formação da descontinuidade).

Tensões de tração ocorrem nesta região, induzindo ao dano da rocha e as formações de micro fraturas que se propagam rapidamente do centro da direção dos pontos de carga a reação do corpo de prova. A descontinuidade é efetivamente observada quando o dano nos elementos de interface chega ao valor de 1 (Ver Figura 37(a)). Neste caso, percebe-se a formação de fraturas que se propagam e interagem entre si, formando uma zona de ruptura por tração (Ver Figura 37(b)). Observa-se ainda a formação de pequenas fraturas próxima ao ponto de aplicação do carregamento e na base onde é gerada reação de força da amostra, pode-se observar tal evento na Figura 37(c).

Figura 37 - Variável de dano e abertura de fratura.





Fonte: A Autora, 2018.

(a) Variável de dano; (b) Destaque da região danificada; (c) Abertura de fraturas (hjump n).

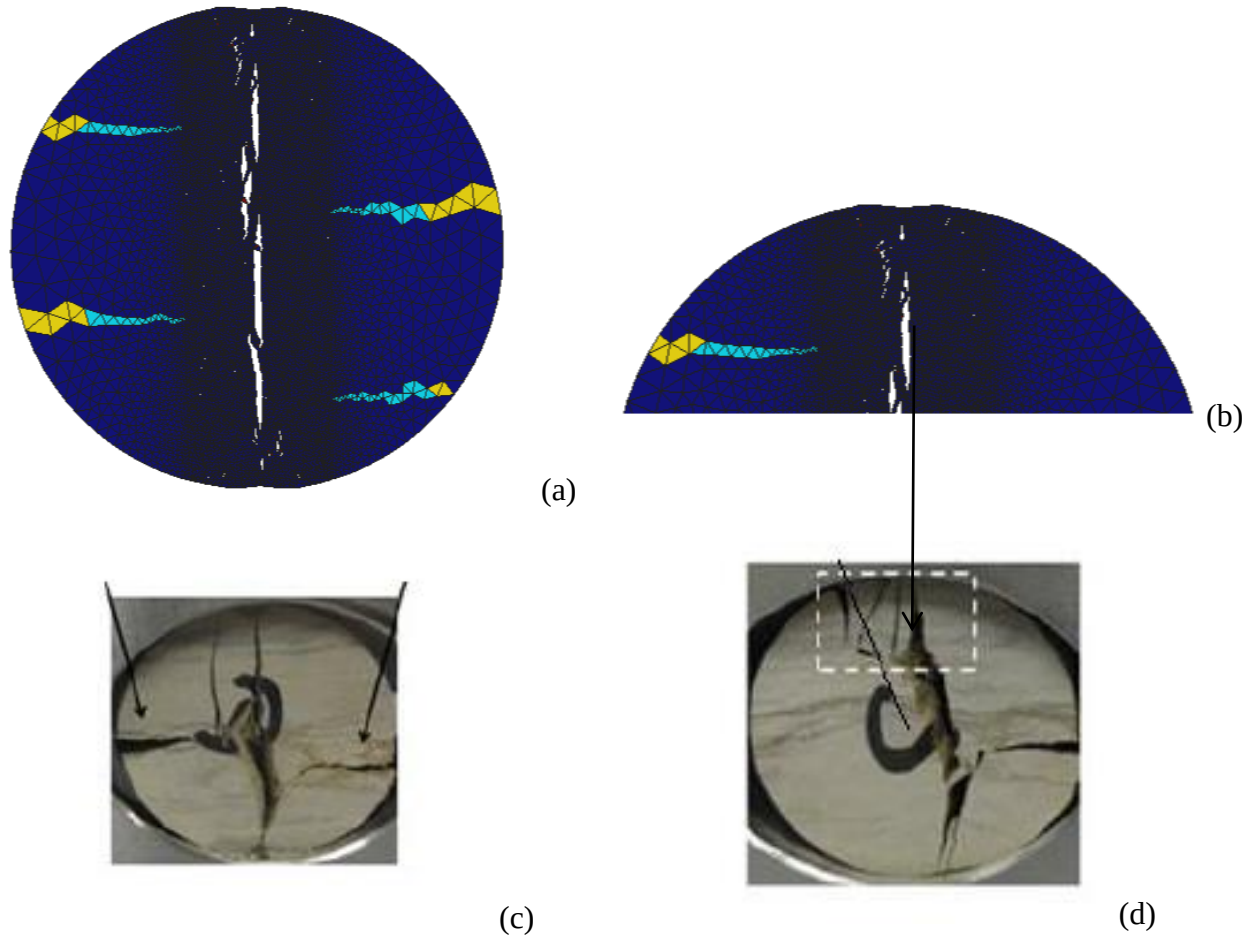
Portanto além da comparação quantitativa, através da evolução das cargas diametrais, foi realizada uma comparação qualitativa dos resultados da simulação numérica com ensaios de compressão diametral realizados por Correia *et al.*, (2015). Observou-se uma relevante aproximação entre a resposta numérica e a experimental, conforma a Figura 38.

Verificou-se a formação de uma zona principal de fratura que foi gerada no centro da amostra e se propagou na direção dos pontos de reação e carregamento, compatível com o observado do ensaio em laboratório, bem como a concordância quanto as pequenas fraturas que se originaram no topo, base e em outras regiões da amostra.

Além disso, a modelagem permitiu reproduzir a formação de fraturas nas regiões laterais da amostra identificando que estas ocorrem devido às laminações da rocha decorrentes da formação de zonas de tração após a ruptura na parte central da rocha. A

integração das técnicas de fragmentação de malha e de descontinuidades fortes incorporadas permitiu uma melhor reprodução e entendimento deste comportamento.

Figura 38 - Destaque dos elementos incorporados e suas respectivas aberturas.



Fonte: A Autora, 2018.

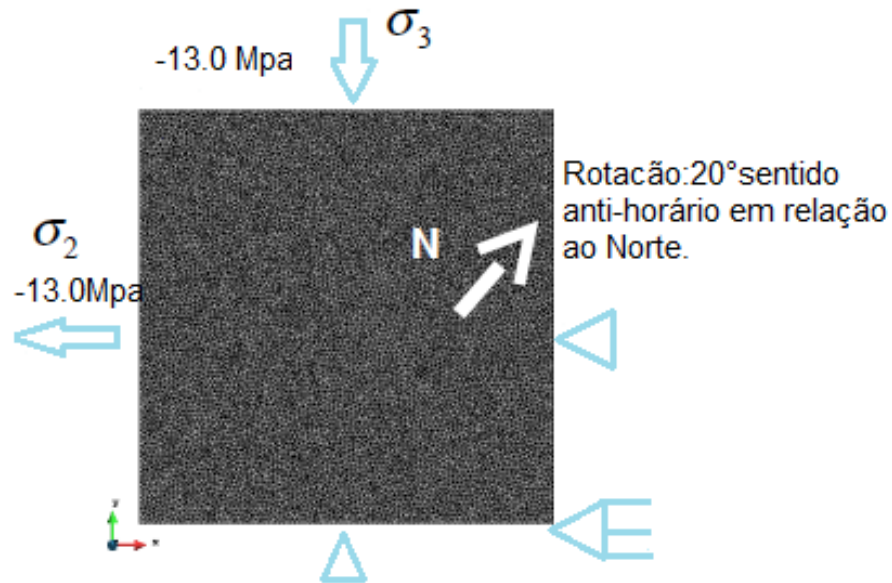
5.2 GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FRATURAS EXTENSIONAIS EM MAPA

Baseado nos resultados obtidos nas simulações numéricas do ensaio de tração de amostra de laminitos da Fm. Crato, neste item apresentam-se as análises para a simulação da formação (geração) e propagação de fraturas naturais de uma área de 100×100 metros, com características geomecânicas da Formação Crato, submetida a esforços extensionais. O objetivo foi simular numericamente a formação de uma família de fraturas (veios) decorrente do regime compressional que a Fm. Crato sofreu no período de arqueamento da Bacia do Araripe.

As condições de contorno do problema consistem na aplicação de uma tensão de tração (Ver Figura 39) que simula esforços extensionais laterais resultantes do arqueamento

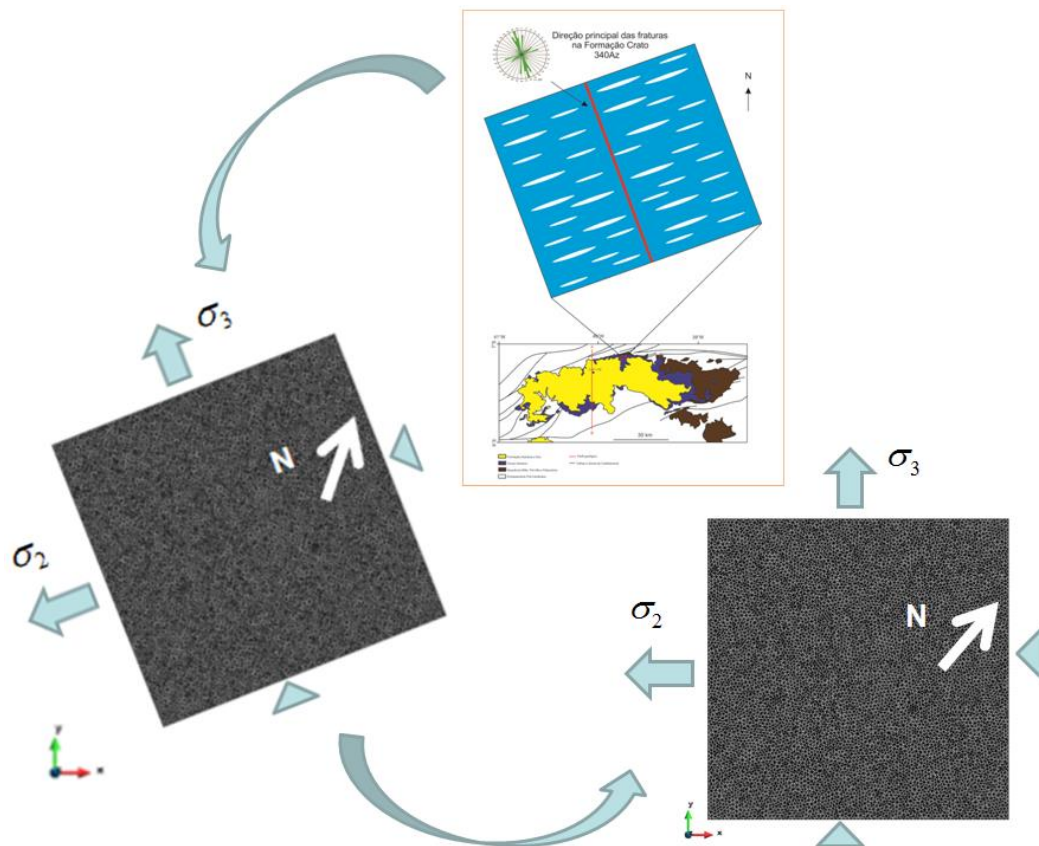
da bacia na direção normal à família de fraturas que se deseja gerar que consiste na direção 340Az, direção da família primária de fraturas medidas em campo. O polígono, para a análise, está rotacionado a 20° para o sentido anti-horário em relação ao Norte, posicionando a direção de propagação das fraturas simuladas de forma perpendicular ao *trend* de fraturas. Conforme se pode verificar na Figura 40.

Figura 39 - Condições de contorno.



Fonte: A Autora, 2018.

Figura 40 - Padrão de fraturas geradas aleatoriamente, observado em diferentes escalas seguindo a lei de potência que melhor se ajustou aos dados do micro e macro *scanline*.



Fonte: A Autora, 2018.

Desta forma espera-se reproduzir a geração da Família 1 (340Az), o nível de tensões para o qual estas são geradas e a interação entre estas discontinuidades.

Para a análise foi empregada à técnica de fragmentação considerando a formulação de elementos finitos especiais de interface e o modelo constitutivo de dano à tração.

As propriedades empregadas para materiais foram as mesmas da Tabela 2, sendo o modelo de dano aplicado apenas aos elementos especiais de interface.

Tabela 2 - Propriedades dos Materiais empregados no modelo de mapa de fraturas extensionais.

Materiais	Módulo de Young (E)GPa	Poisson (ν)	Energia de Fratura (G_f)N/m	Resistência a Tração (δ_y)MPa
Rocha Homogênea	23720,00	0,247	100,00	Elástico.
Região Interface	23720,00	0,247	100,00	9,00
Região Contorno	23720,00	0,247	-----	Elástico.

Fonte: A Autora, 2018.

5.2.1 Rocha Intacta

Inicialmente analisa-se a geração das fraturas através da malha de elementos finitos deformada. Através desta é possível observar, para diferentes estágios de extensão lateral, a geração de fraturas e sua propagação e interação. A Figura 41 ilustra isto onde se apresenta a geometria deformada da secção analisada em quatro diferentes estágios, sendo estes o cenário imediatamente antes do fraturamento (Figura 41(a)), no instante do fraturamento (Figura 41(b)), imediatamente depois (Figura 41(c)) e no instante imediatamente anterior à perda de representatividade física do campo de deslocamentos, onde se excede o limite de pequenas deformações na formulação de elementos finitos levando a uma posterior perda de convergência.

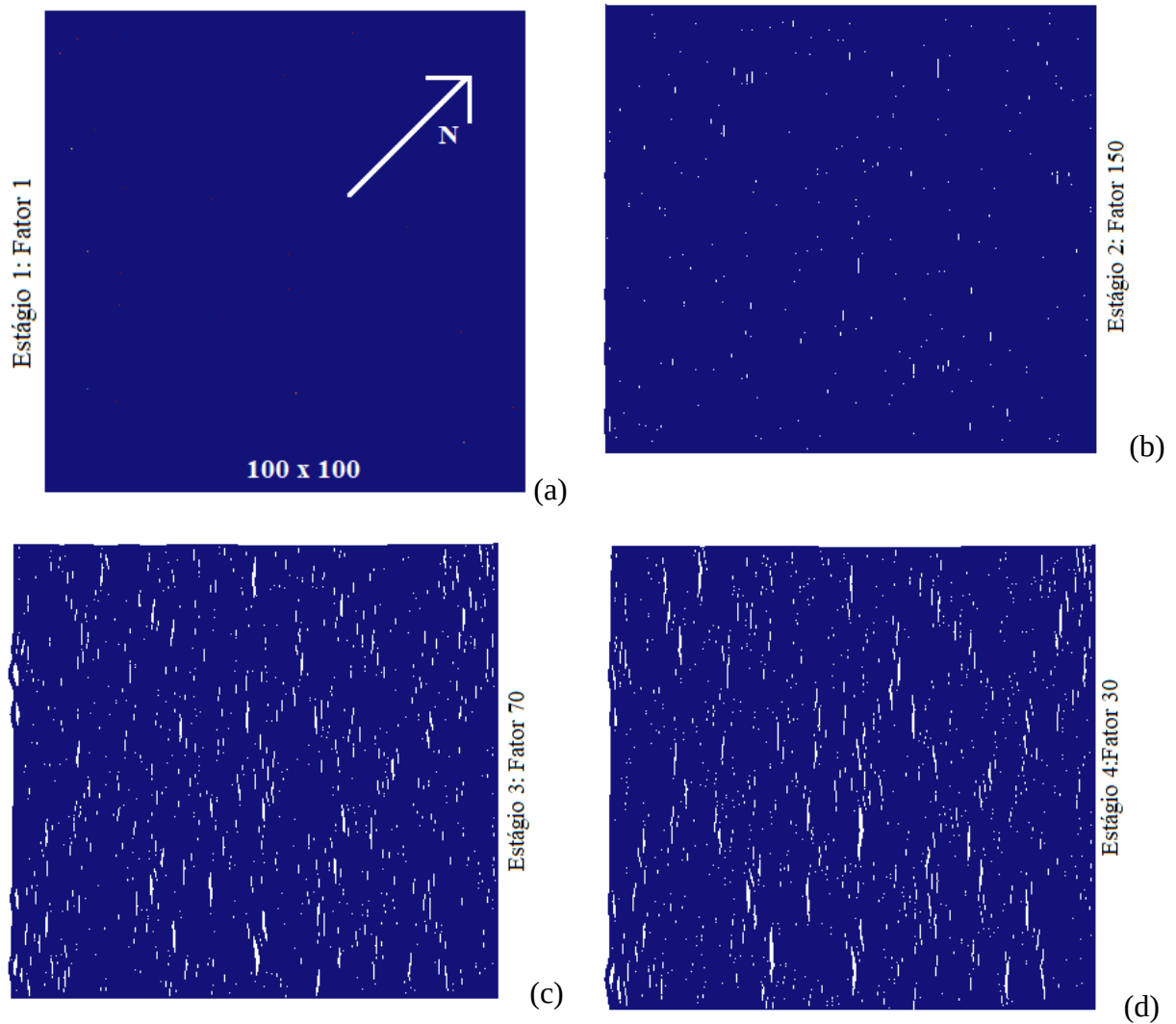
Observa-se que as fraturas se iniciam em pequenas dimensões, em relação ao tamanho total da secção, e estas passam a aumentar em comprimento e abertura, interagindo umas com as outras em sua vizinhança, formando fraturas maiores pela união destas ou gerando uma área com *clusters* de fraturas.

Estas fraturas consistem nos elementos especiais de interface que, ao sofrerem uma evolução na variável de dano à unidade, têm sua rigidez degenerada induzindo a uma descontinuidade no campo de deslocamentos em relação ao meio contínuo. Estes elementos estão destacados em cor branca, o que permite a visualização das fraturas.

É possível ainda observar, na Figura 42, fazendo-se um destaque das zonas de fratura, a interação entre as fraturas levando à formação de fraturas contínuas pela sobreposição das menores. Há também a observação de fraturas secundárias, de menor porte. Observa-se uma consistência física do modelo em representar a geração e propagação de estruturas anastomosadas e com truncamento seguido de novas estruturas vizinhas com fraturas de menor porte entre fraturas de maior porte.

Para a melhor visualização das fraturas, foram adotados fatores de ampliação da deformada para cada estágio os quais dependem do campo de deslocamentos observado.

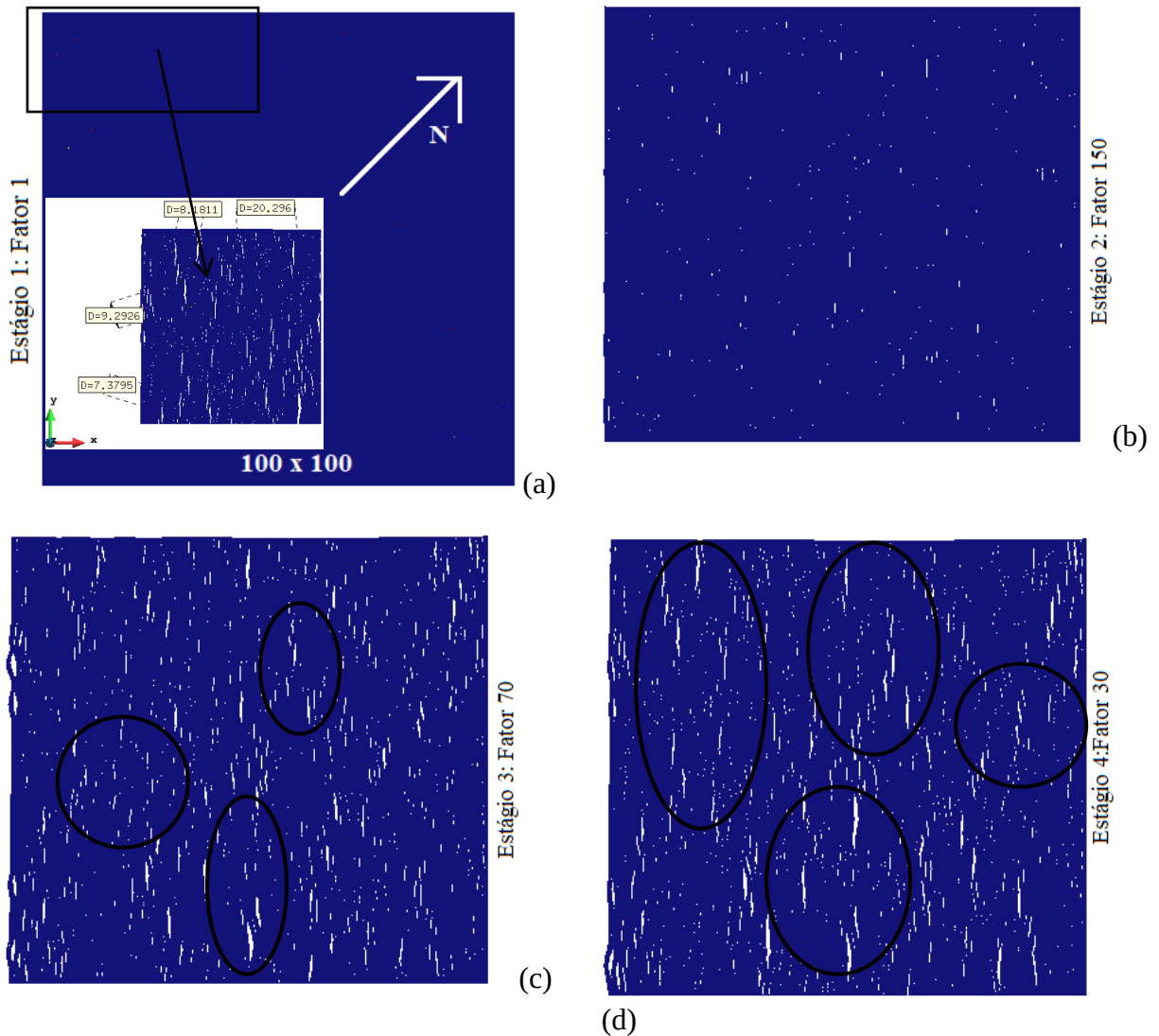
Figura 41- Resultados de geração de fraturas extensionais.



Fonte: A Autora, 2018.

(a) Estágio pré-fraturamento; (b) Estágio inicial de fraturamento; (c) Estágio pós-fraturamento; (d) Estágio final de fraturamento.

Figura 42 - Destaque na evolução e interação entre as fraturas gerada em cada estágio de carregamento.



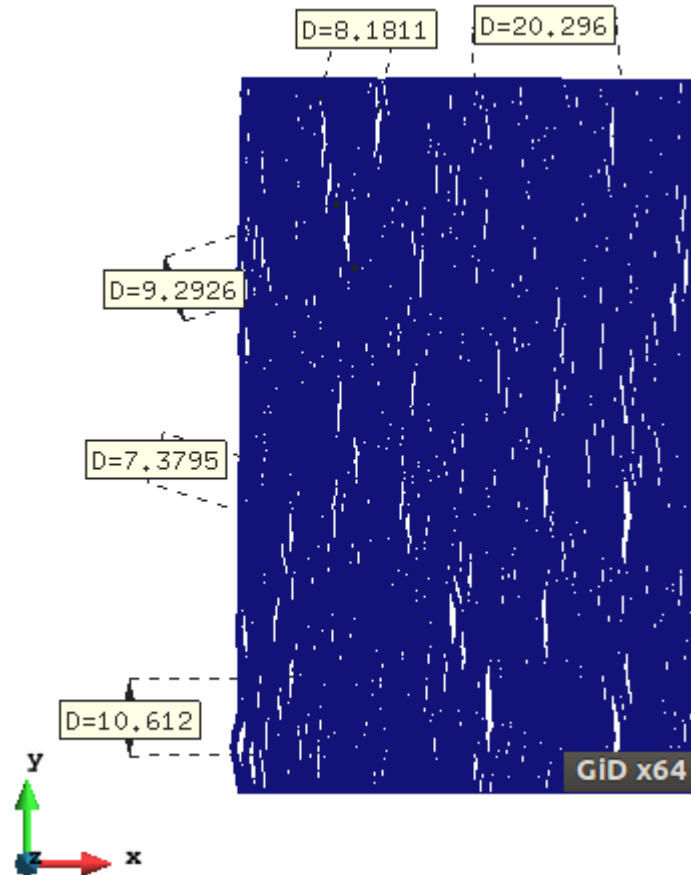
Fonte: A Autora, 2018.

(a) Destaque da geração e evolução das fraturas na região topo; (b) Estágio pré-fraturamento; (c) Estágio pós-fraturamento; (d) Estágio final de fraturamento.

A Figura 43 apresenta o destaque na visualização de uma região fraturada da secção, conforme ilustrado na Figura 42(a), onde é possível verificar uma amostra das dimensões das fraturas obtidas, bem como o espaçamento entre elas, sendo estes compatíveis com o observado nos afloramentos da Fm. Crato.

Outro aspecto evidenciado neste detalhe é a ocorrência de fraturas de menor dimensão, bem como a forma elíptica das fraturas, onde a maior abertura ocorre na sua parte central e esta tende à zero nas suas extremidades, levando assim a uma consistência física da modelagem.

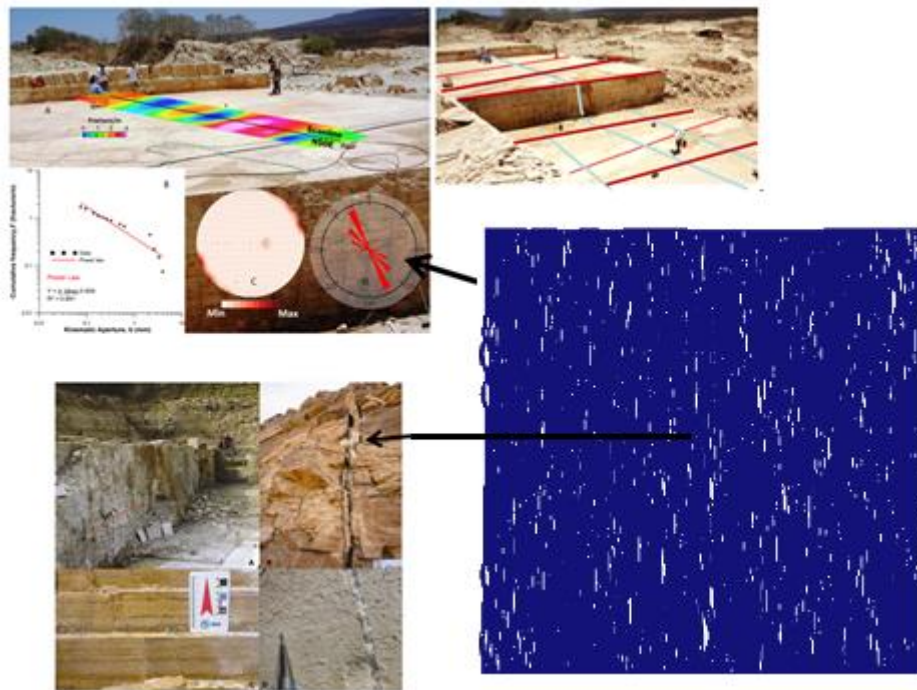
Figura 43 - Detalhe das fraturas geradas: dimensões e espaçamento em metros.



Fonte: A Autora, 2018.

Desta forma, é possível observar a reprodução, de forma qualitativa, da geração das fraturas naturais do Set 1 da Fm. Crato (Figura 44). Observa-se também que há uma tendência principal de orientação 340AZ com algumas fraturas apresentando pequenos desvios de angulação em relação a esta direção, porém sendo estas pertencentes à mesma família.

Figura 44 - Ilustração do meio fraturado numericamente e sua relação com as observações de campo.

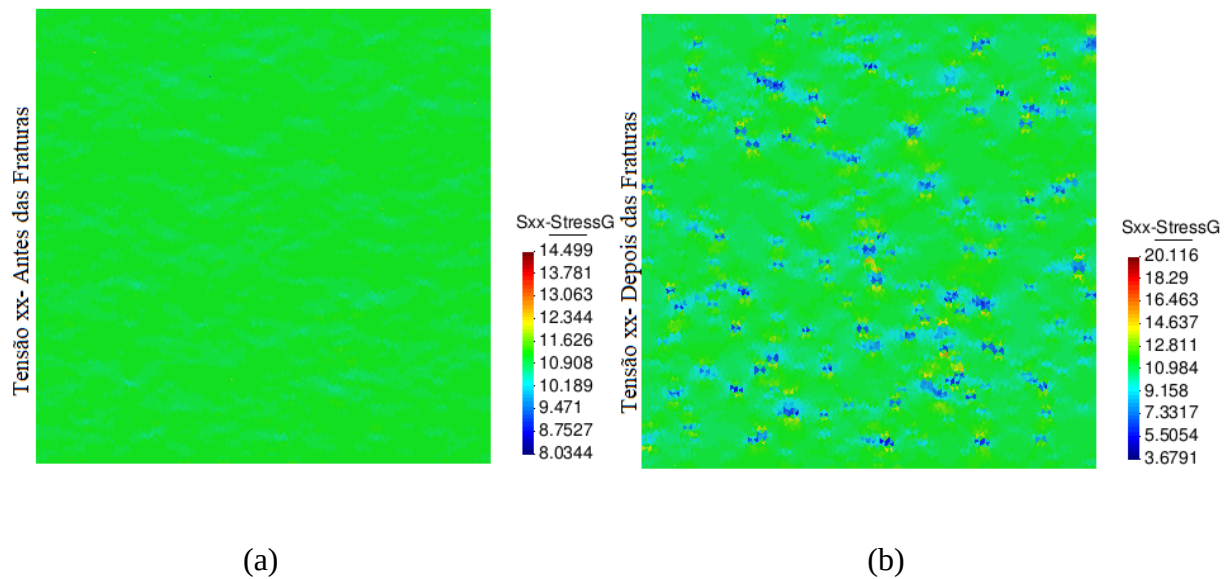


Fonte: Adaptado Miranda, 2015.

Partindo para uma análise de tensões, observa-se na Figura 45 o estado de tensões (na direção horizontal, ou seja, da extensão aplicada) antes e depois da ruptura do material, isto é, imediatamente antes (Figura 45(a)) e logo após (Figura 45(b)) o fraturamento da rocha.

Verifica-se que há uma concentração de tensões que variam entre 11.MPa e 12.MPa em diferentes regiões da secção na direção normal aos planos de fratura a serem formados. Então estes são os valores limites de tensão de ruptura, onde as tensões sofrem um alívio nos entornos das fraturas geradas (Figura 45(b)) no entorno das discontinuidades (cor azul escuro).

Figura 45 - Distribuição de tensões horizontais.



Fonte: A autora, 2018.

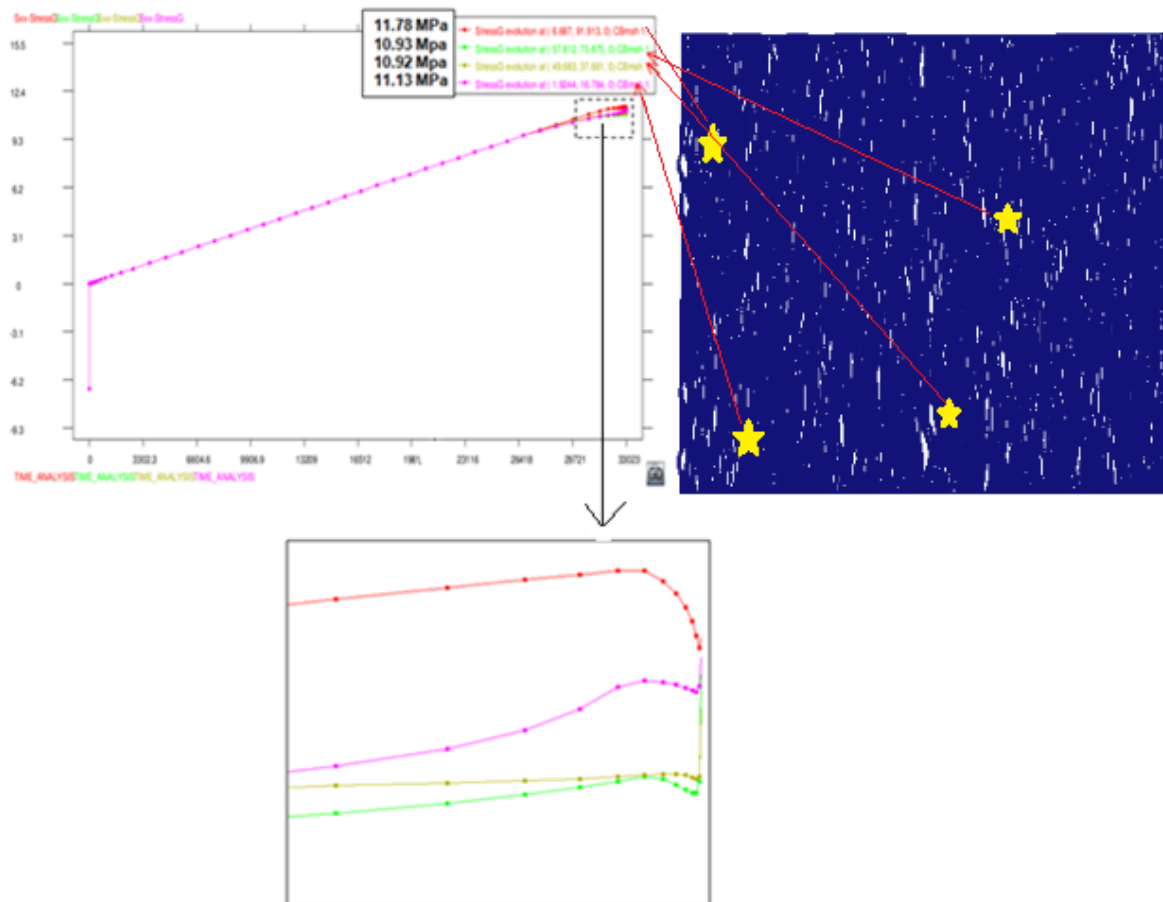
(a) Antes do fraturamento; (b) Após o fraturamento.

Isto pode ser observado na Figura 46, onde é expresso graficamente a curva de variação de tensão com o tempo para pontos adjacentes a fraturas em diferentes regiões da secção. Verifica-se que a tensão para a qual ocorre a total ruptura varia em um intervalo de 10,92 e 11,78MPa.

Outra análise importante é a da distribuição final de tensões cisalhantes. Observa-se na Figura 47 que, uma vez geradas as fraturas, há a formação de zonas de cisalhamento (pares conjugados) formando angulação de 45° em relação aos planos de fratura. Destaca-se ainda que estas zonas de cisalhamento sejam definidas pela interligação das extremidades das fraturas. Isto indica a suscetibilidade de a rocha também romper por cisalhamento a depender de suas propriedades de coesão e ângulo de atrito o que pode ser modelado ao se empregar modelos constitutivos de plasticidade para o material contínuo.

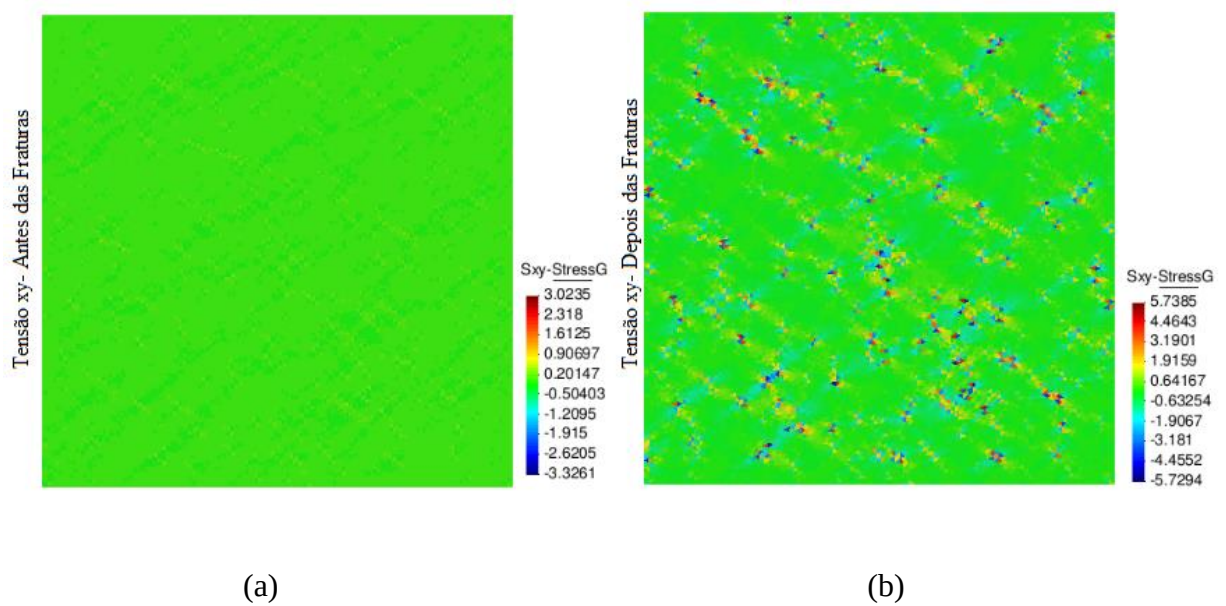
Esta análise é uma informação importante no estudo do fraturamento deste material, uma vez que há uma tendência de que haja uma ruptura inicial por tração, e uma consequente formação de descontinuidades secundárias por cisalhamento.

Figura 46 - Curvas de tensões x tempo.



Fonte: A Autora, 2018.

Figura 47 - Distribuição de tensões cisalhantes.

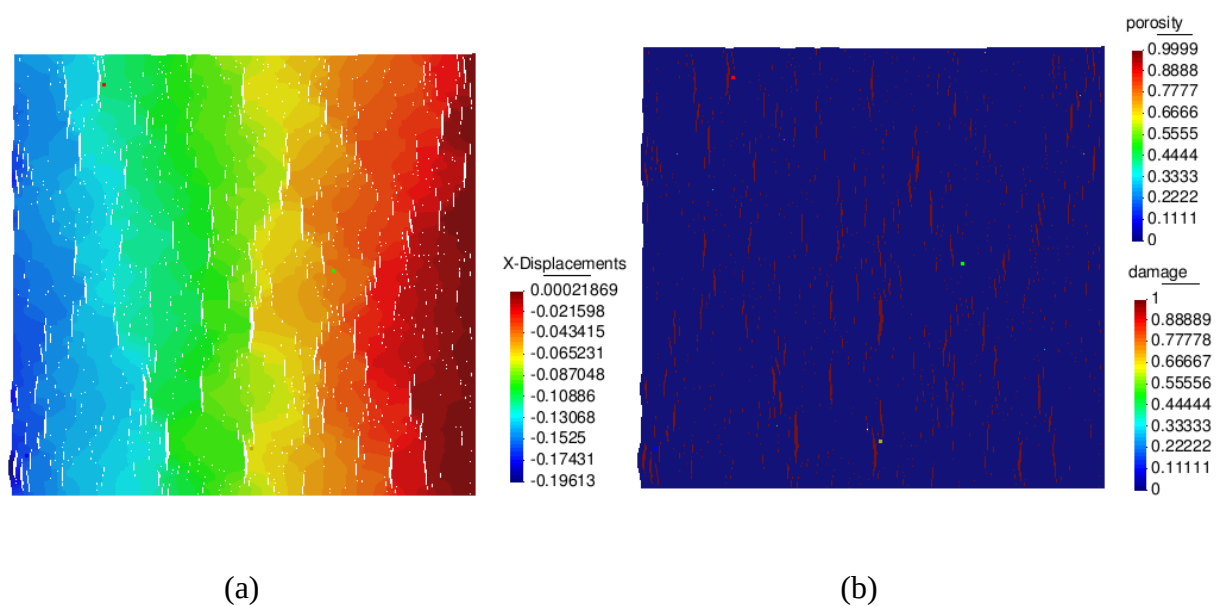


Fonte: A Autora, 2018.

(a) Antes do fraturamento; (b) Após o fraturamento.

O campo final de deslocamentos é mostrado na Figura 48(a) sendo possível observar que a variação destes segue a distribuição das fraturas geradas. Outras variáveis foram observadas na Figura 48(b), sendo uma delas a variável de dano (azul escuro) que atinge o valor máximo, isto é, a unidade, o que leva à degeneração total do módulo elástico do material de interface provocando a geração da fratura. Os valores de deslocamento são consideravelmente associados às aberturas das fraturas. A outra variável observada é a porosidade, onde fica evidenciado que nas fraturas a porosidade do elemento de interface, inicialmente igual à da rocha sã, fica igual a 100% quando a fratura é aberta.

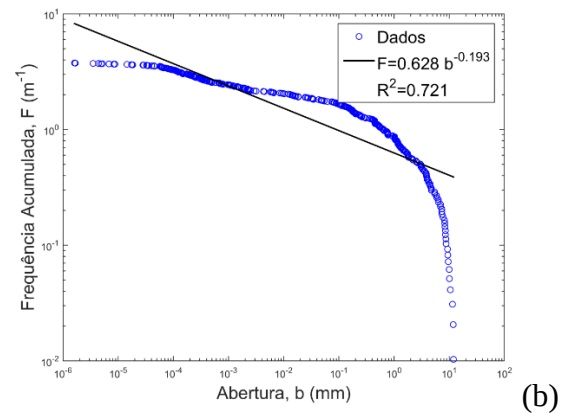
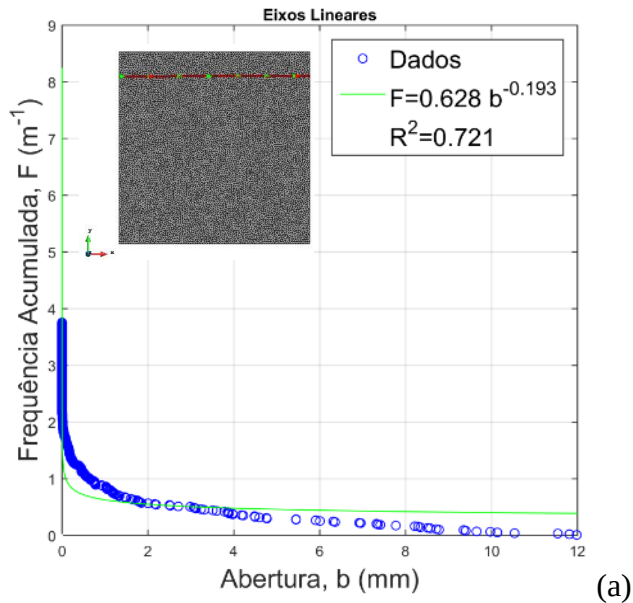
Figura 48 - Distribuição de variáveis para o estágio pós fraturamento.



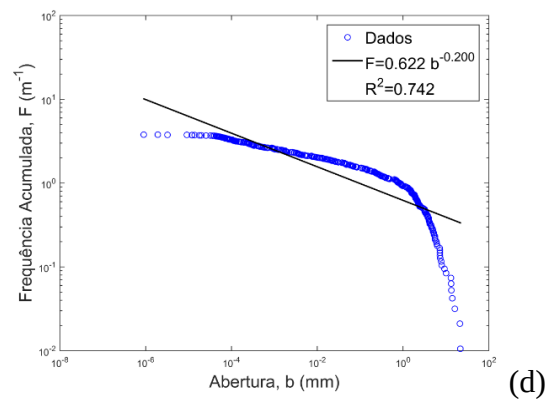
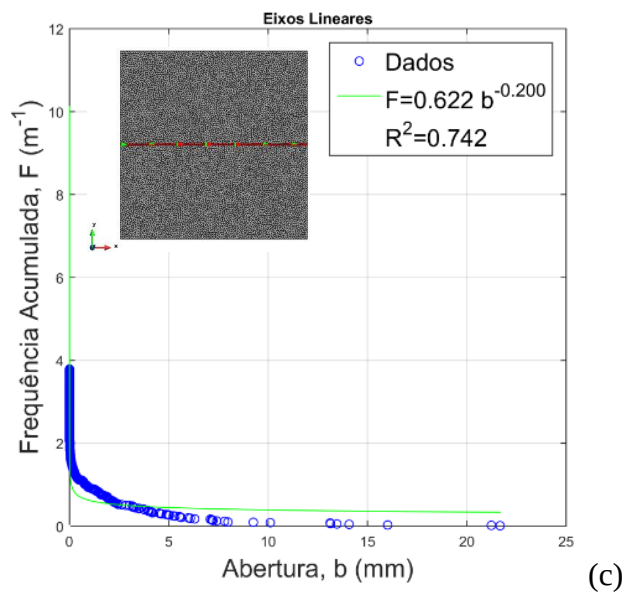
Fonte: A Autora, 2018.
(a) Campo de deslocamentos; (b) Variável de dano e porosidade.

De forma a quantificar as fraturas geradas, suas aberturas e seus respectivos espaçamentos, realizaram-se *scanlines* lineares em três linhas ao longo da secção e *scanlines* aleatórias ao longo de toda região da malha. Assim estudou-se a existência ou não de correlação espacial entre os dados bem como a caracterização e influência dos padrões das fraturas.

A Figura 49 mostra os resultados das *scanlines* geradas em três posições ao longo da secção da malha, sendo estes resultados obtidos aqui através do emprego do método proposto por Ortega *et al.*, (2006), que consiste em encontrar a frequência acumulada em função dos tamanhos das aberturas das fraturas.

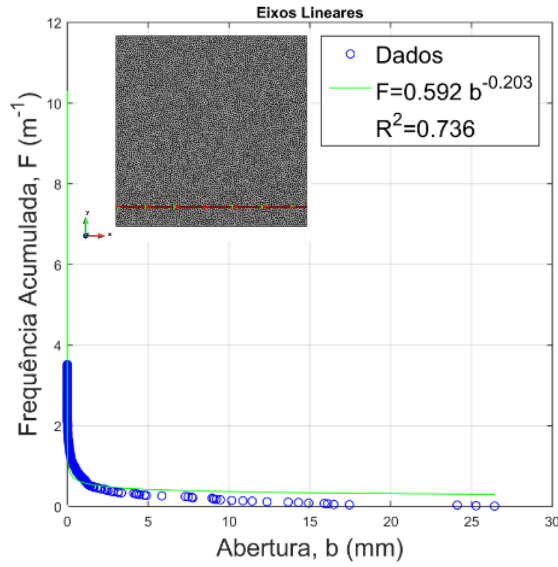
Figura 49 - Estudo das *scanlines* lineares na simulação.

(b)

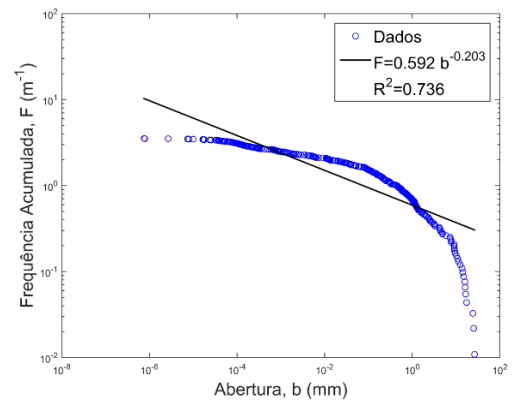


(d)

(c)



(e)



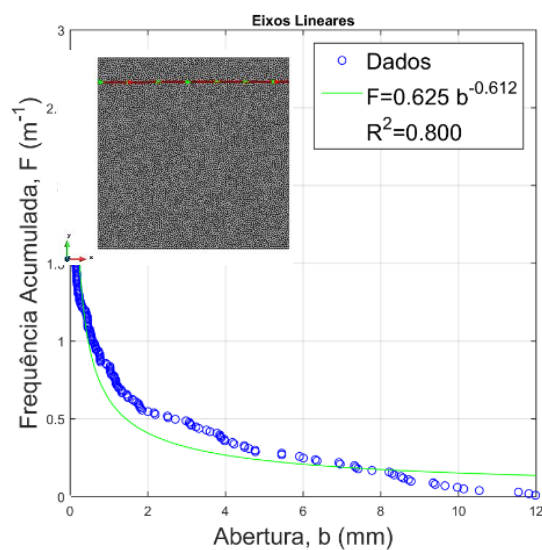
(f)

Fonte: A Autora, 2018.

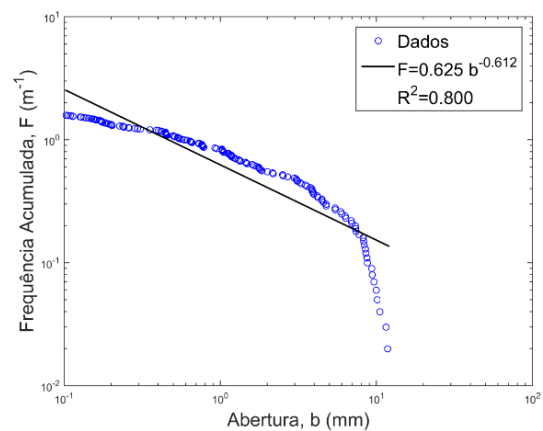
(a) Dados ajustados em escala linear, *scanline* na posição superior; (b) Dados ajustados em escala log-log; (c) Dados ajustados em escala linear, *scanline* na posição intermediária; (d) Dados ajustados em escala log-log; (e) Dados ajustados em escala linear, *scanline* na posição inferior; (f) Dados ajustados em escala log-log.

Na Figura 49 observa-se que existem artefatos na região de *truncation* e *censoring* (Priest, 1995; Ortega *et al.*, 2006). Assim a Figura 50 apresenta o resultado quando os pontos (artefatos) são removidos parcialmente. O intervalo levado em consideração foi de (10^{-1} a 10 mm) e foram construídos os gráficos a partir do cálculo de uma nova regressão com os dados remanescentes.

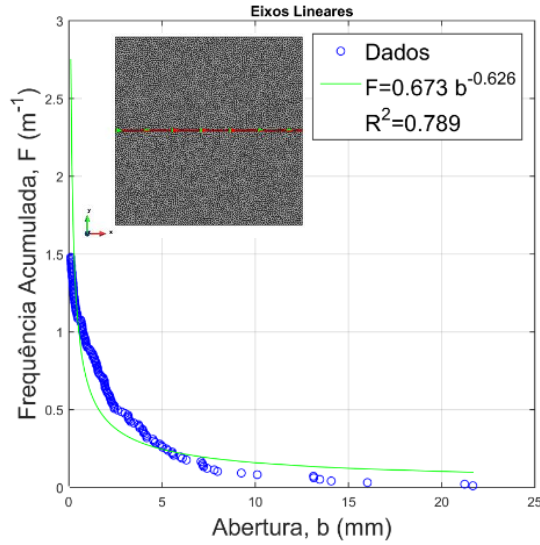
Figura 50 - Estudo das *scanlines* lineares na simulação com novo ajuste sem os artefatos



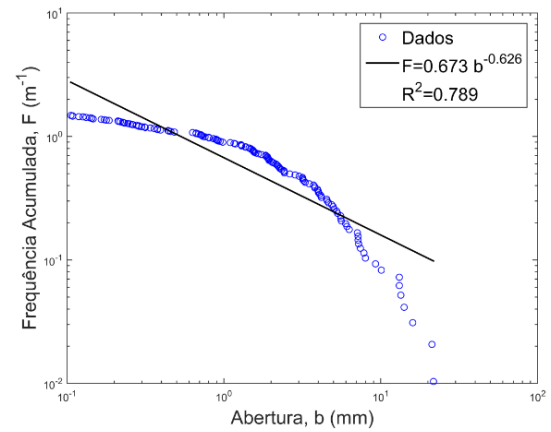
(a)



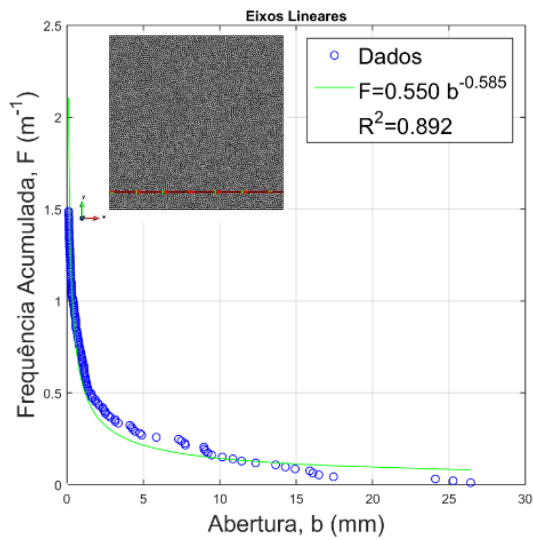
(b)



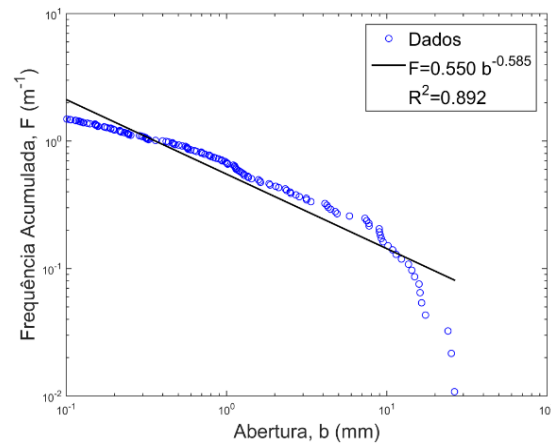
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: A Autora, 2018.

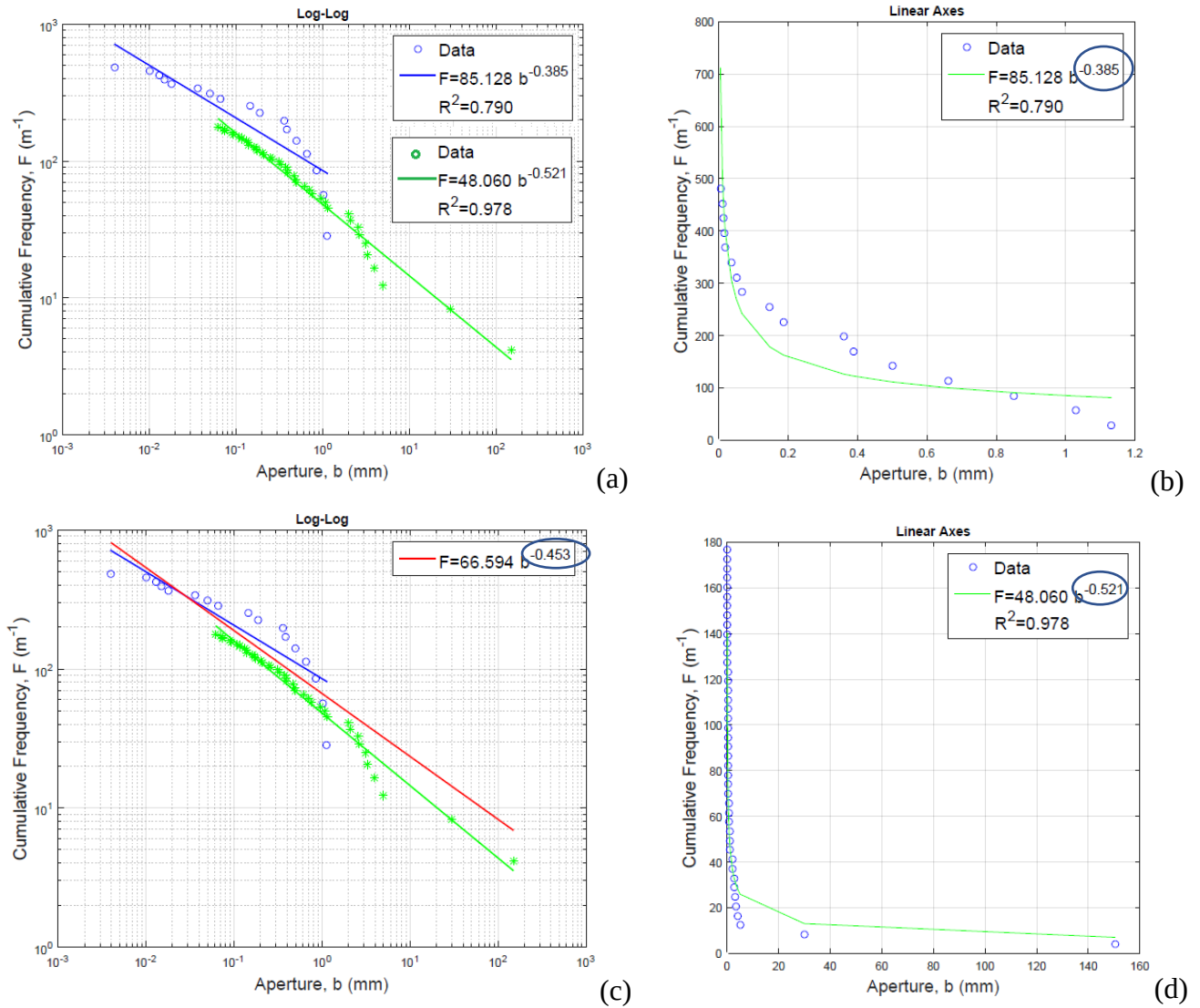
(a) Dados ajustados em escala linear; (b) dados ajustados em escala log-log; (c) Dados ajustados em escala linear; (d) dados ajustados em escala log-log; (e) Dados ajustados em escala linear; (f) dados ajustados em escala log-log.

Nota-se que os artefatos influenciam significativamente os coeficientes da lei de potência. Por esse motivo a partir de agora se apresentam todos os resultados sempre com o artefato de *truncation* e/ou *censoring* para a determinação dos coeficientes da lei de potência. Em seu trabalho, Santos *et al.*, (2015) e Santos (2017) detalham matematicamente este artifício de truncamento.

Para validar o estudo das *scanlines* obtidas desta simulação, foram realizadas comparações com *scanlines* obtidas em trabalhos de campo (Miranda, 2015) na caracterização geológica da Fm. Crato.

A Figura 51 foram duas medidas de campo, a *scanline* na cor azul corresponde a *microscanlines* e a *scanline* na cor verde corresponde a *macroscanlines* e a *scanline* na cor vermelha é a média entre elas (micro e macro), a Figura 51(a) e (c) correspondem os dados na escala log-log e a Figura 51(b) e (d) correspondem os resultados da frequência acumulada e a média da frequência acumulada entre elas, respectivamente.

Figura 51 - *Scanlines* de campo.

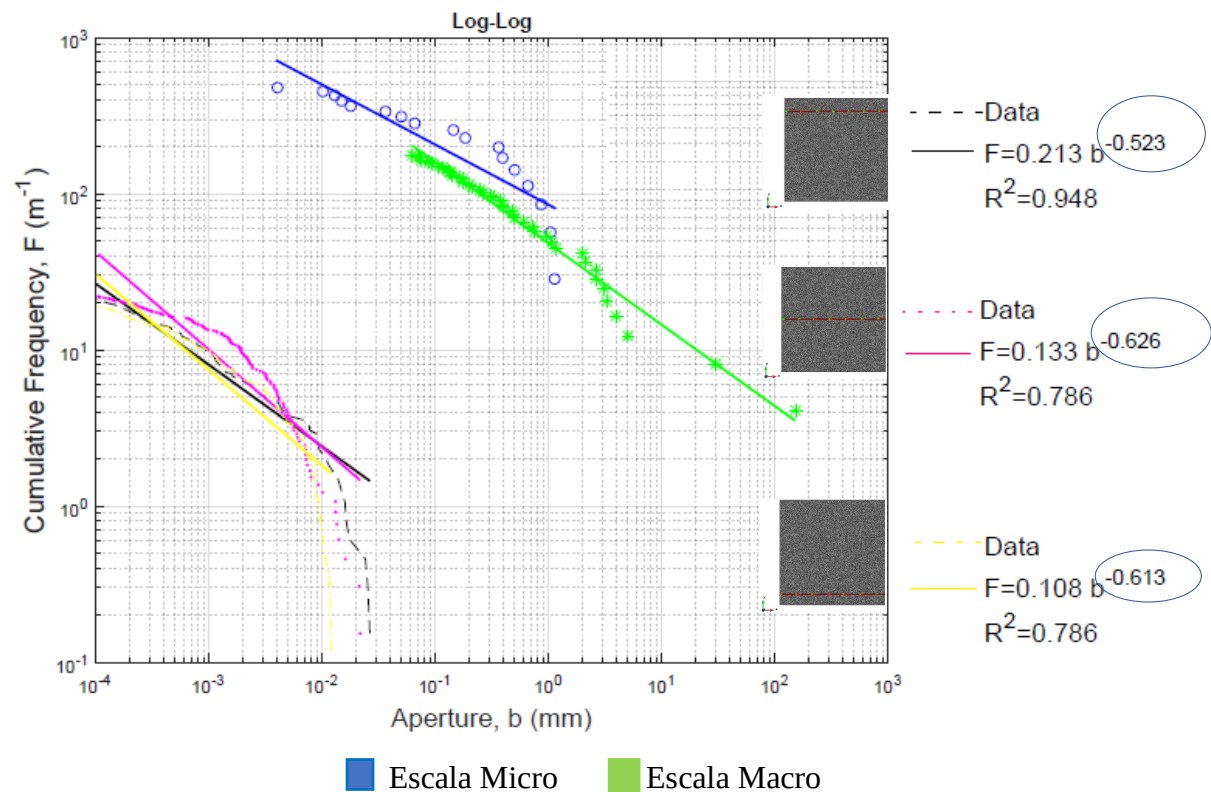


Fonte: A Autora, 2018.

- (a) Dados em escala log-log e resultado das frequências acumulada; (b) Gráfico da frequência em escala linear da primeira *scanline*; (c) Destaque do resultado da frequência acumulada mediana; (d) Gráfico da frequência em escala linear da segunda *scanline*.

Tendo tais dados, podem-se comparar os mesmo com as *scanlines* realizadas para os cenários aqui simulados. A Figura 52 mostra esta comparação.

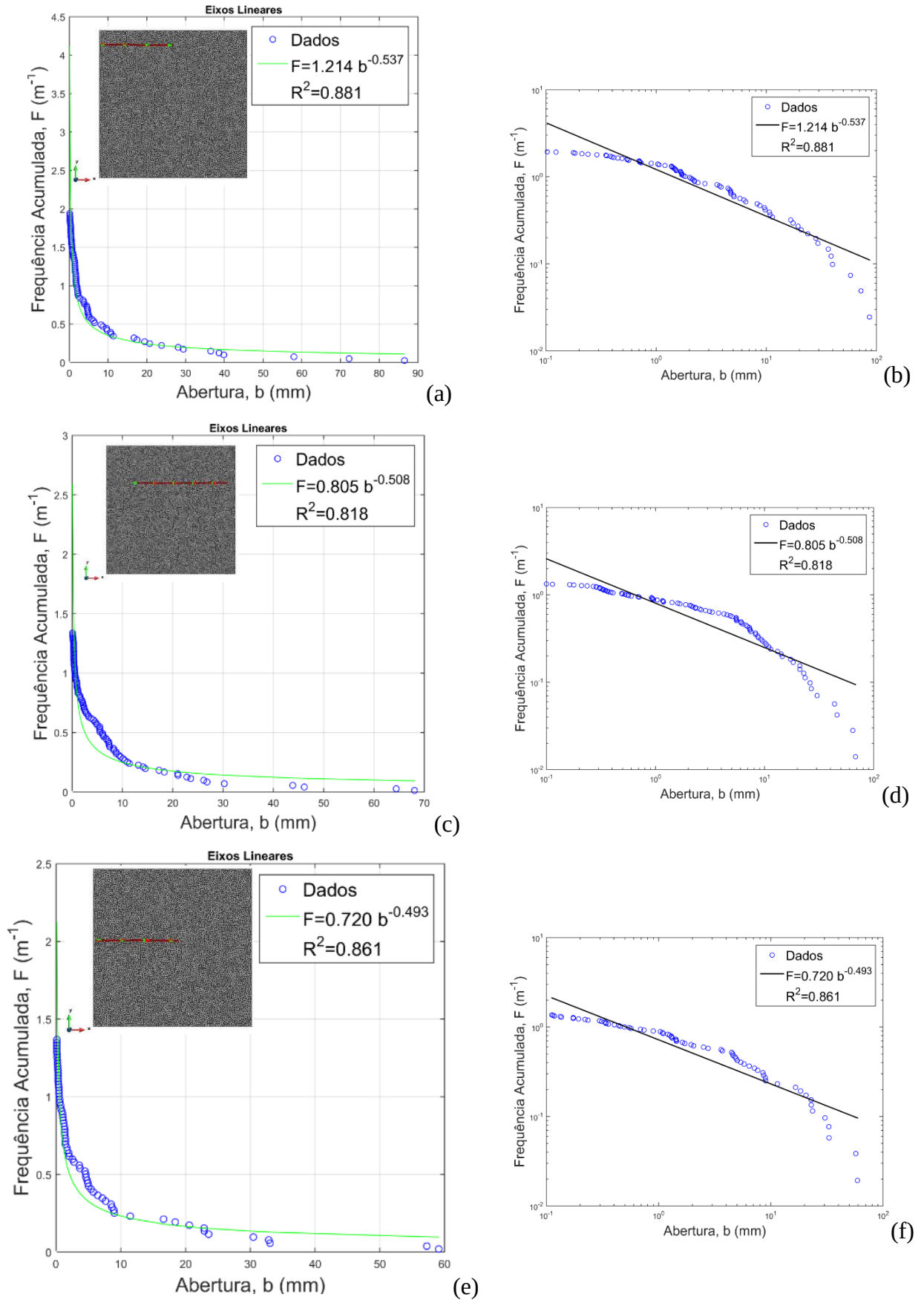
Figura 52 - Comparação das *scanlines* de campo com as *scanlines* da simulação, dado de frequência acumulada em escala linear.

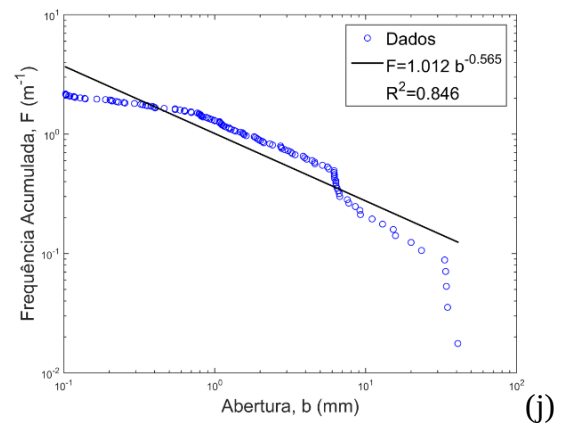
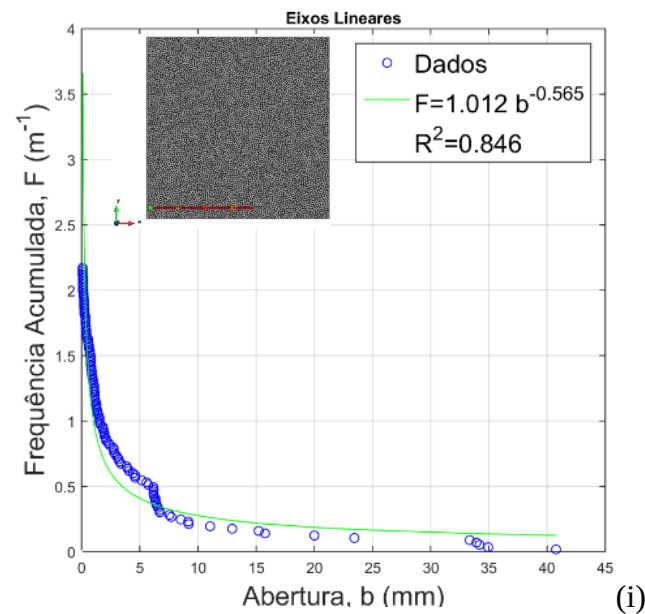
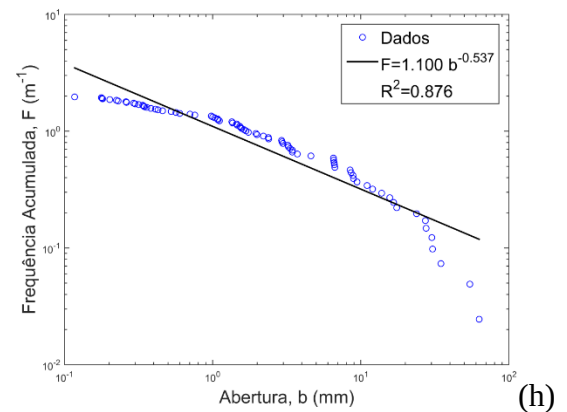
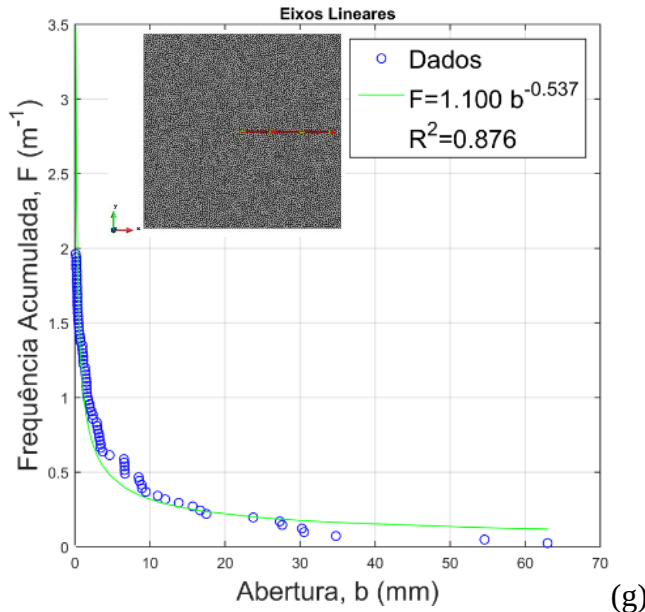


Fonte: A Autora, 2018.

Partindo para uma análise da variável que determina a densidade de fraturas geradas no meio CV_K que está em destaque na Figura 52 comparando com a mesma variável da Figura 51. Uma vez que esta variável é um dos coeficientes de variação da lei de potência, pode-se afirmar que a variação de fraturas (abertura e espaçamento) das *scanlines* de campo e da simulação obedece a um parâmetro parecido, e todas as *scanlines* ficaram paralelas às *scanlines* de campo, o que resulta em um padrão de similaridade.

Em um segundo momento analisaram-se *scanlines* aleatórias ao longo de toda região da malha, uma vez que desta forma a determinação dos coeficientes da lei de potência permitirá determinação e comparação ao longo de toda secção fragmentada. A Figura 53 mostra os resultados das *scanlines* geradas ao longo da secção da malha.

Figura 53 - Estudo das *scanlines* lineares na simulação.



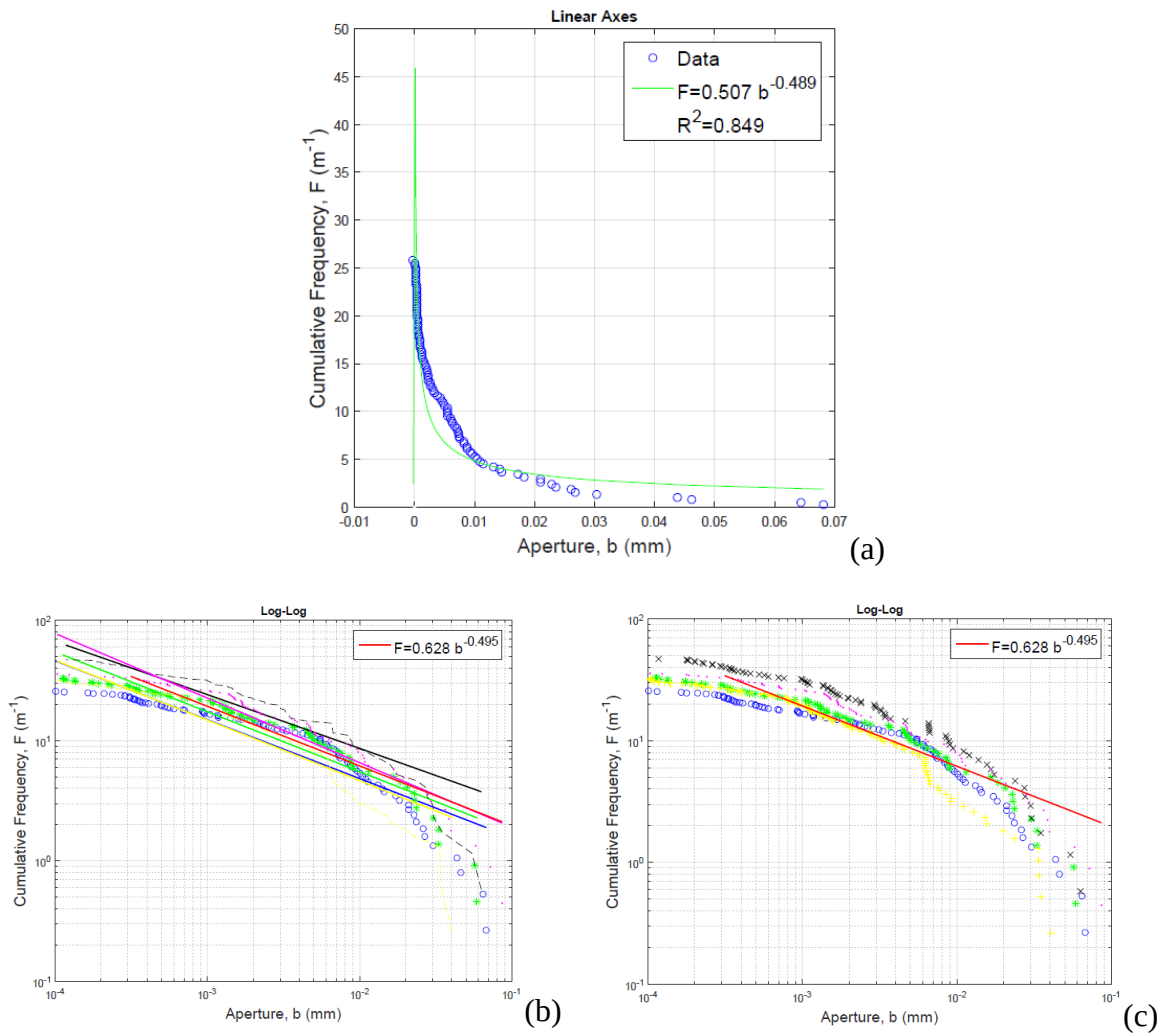
Fonte: A Autora, 2018.

(a) Dados ajustados em escala linear, posição (1); (b) dados ajustados em escala log-log; (c) Dados ajustados em escala linear, posição (2); (d) dados ajustados em escala log-log; (e) Dados ajustados em escala linear, posição (3); (f) dados ajustados em escala log-log ; (g) Dados ajustados em escala linear, posição (4); (h) Dados ajustados em escala log-log ; (i) Dados ajustados em escala linear, posição (5); (j) Dados ajustados em escala log-log.

A Figura 54(a) apresenta o gráfico de frequência acumulada na escala linear, com base na média das *scanlines* da Figura 53(a); (c); (e); (g); (i).

E a Figura 54(b); (c) mostra o dado de frequência acumulada das *scanlines* na escala log-log, com base na média das *scanlines* da Figura 53(b); (d); (f); (h); (j) e apresenta a *scanline* média (reta vermelha). Observa-se que as retas obtidas através das *scanlines* estão distribuídas paralelamente entre si, o que mostra a consistência dos dados obtidos.

Figura 54 - Comparações das scanlines.

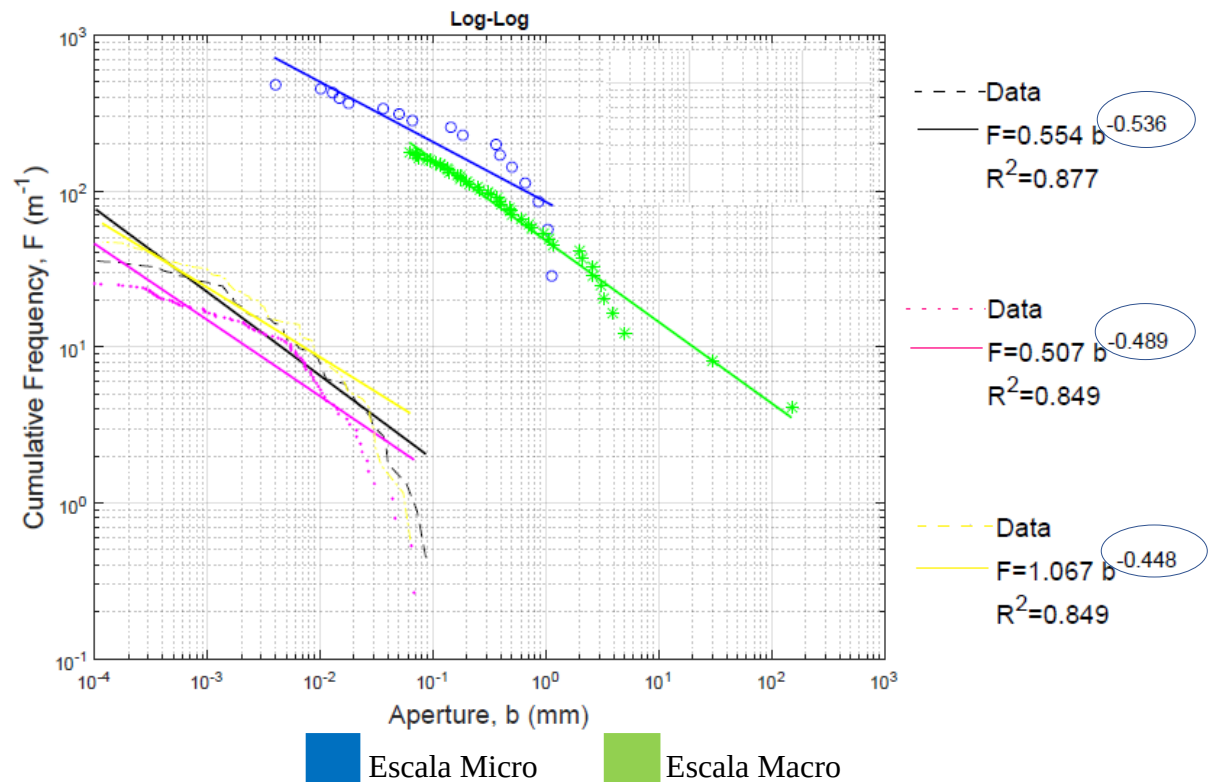


Fonte: A Autora, 2018.

(a) Dados da média das *scanlines* em escala linear; (b) dados ajustados em escala log-log e resultado da frequência acumulada média; (c) Destaque da reta média em escala log-log.

Depois desses resultados, foi realizada a mesma comparação das *scanlines* de campo (Ver Figura 51) com as *scanlines* geradas ao longo da simulação.

Figura 55 - Comparação das *scanlines* de campo com as *scanlines* obtidas na simulação ao longo do meio rochoso.



Fonte: A Autora, 2018.

Novamente analisando a variável CV_K que está em destaque na Figura 55 comparando com a mesma variável da Figura 51, lembrando que esta variável é um dos coeficientes de variação da lei de potência, pode-se afirmar que a variação de fraturas (abertura e espaçamento) das *scanlines* de campo e da simulação obedece a um parâmetro parecido, resultado de suma importância para a validação da simulação realizada com descontinuidades incorporadas inseridas na posição inclinada.

A seguir, serão apresentados os resultados inserindo descontinuidades incorporadas ao longo da secção da malha de elementos finitos na posição inclinada e horizontal.

5.2.2 Rocha com Elementos Incorporados: Fraturas naturais pré-existent (fratura EW: Leste-Oeste)

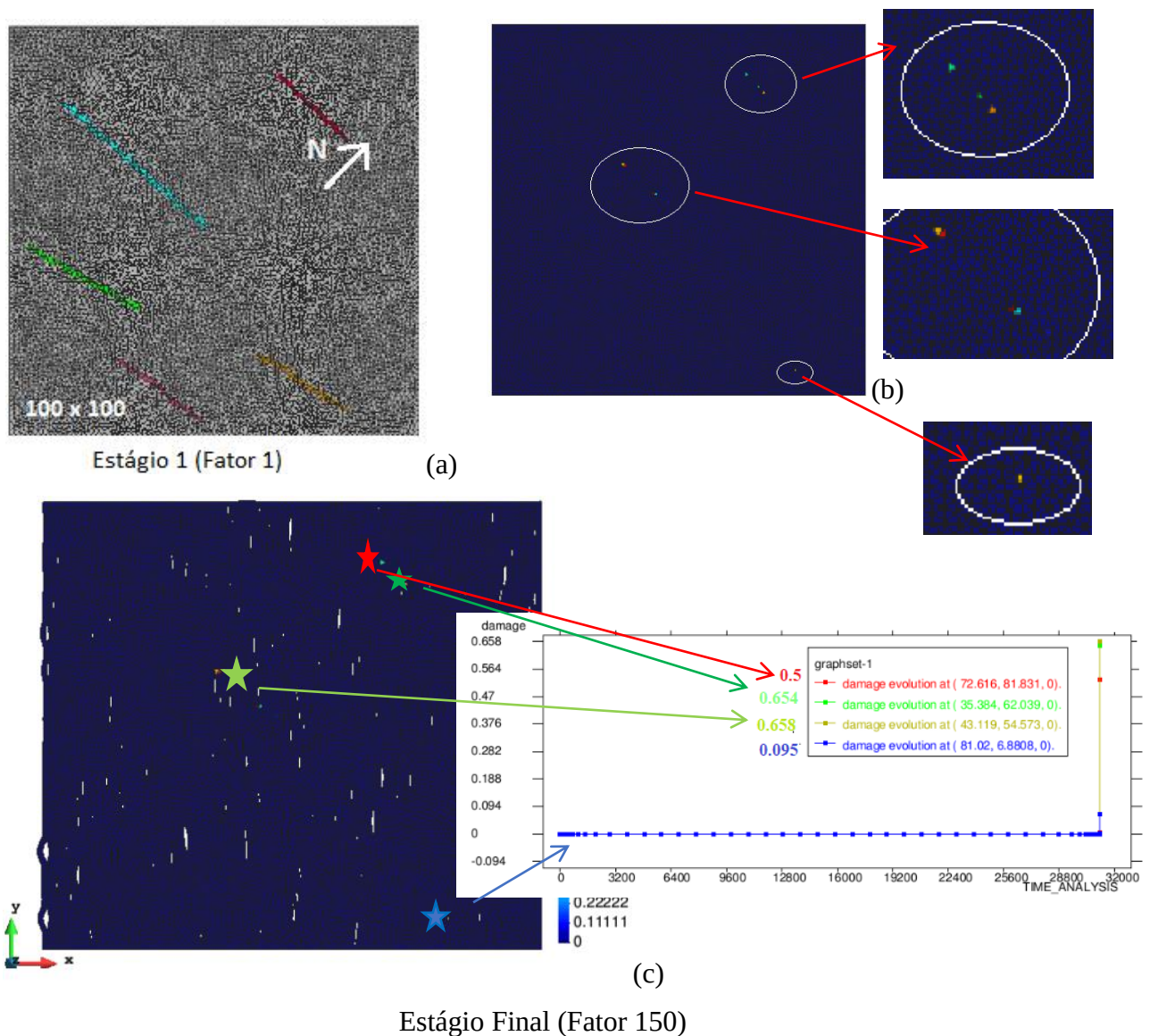
A partir dos dados obtidos na simulação da rocha intacta, foi simulado o mesmo cenário descrito anteriormente e com as mesmas condições de contorno, porém agora considerando uma família de fraturas pré-existente, ou seja, uma família de fraturas na direção Leste-Oeste (EW). As fraturas naturais foram tratadas através da adoção de descontinuidades fortes incorporadas e considerando também o modelo de dano à tração. O objetivo foi o de

avaliar a influência destas estruturas pré-existentes na formação e propagação de novas fraturas, bem como analisar a interação entre as fraturas, combinando ambas as técnicas.

Para visualizar as fraturas foram adotados fatores de ampliação da deformada para cada estágio os quais dependem do campo de deslocamentos observado. Tanto a rocha intacta quanto as fraturas naturais incorporadas apresentam evolução da variável de Dano.

A Figura 56(c) destaca a evolução do dano em alguns elementos incorporados, percebe-se que o meio antes intacto começa a formar fraturas, ou seja, o material atinge a ruptura por tração, e o elemento incorporado se aproxima ao critério de ruptura, o que indica que estes elementos são zonas de fraturas propensas à reativação.

Figura 56 - Malha de elementos finitos.

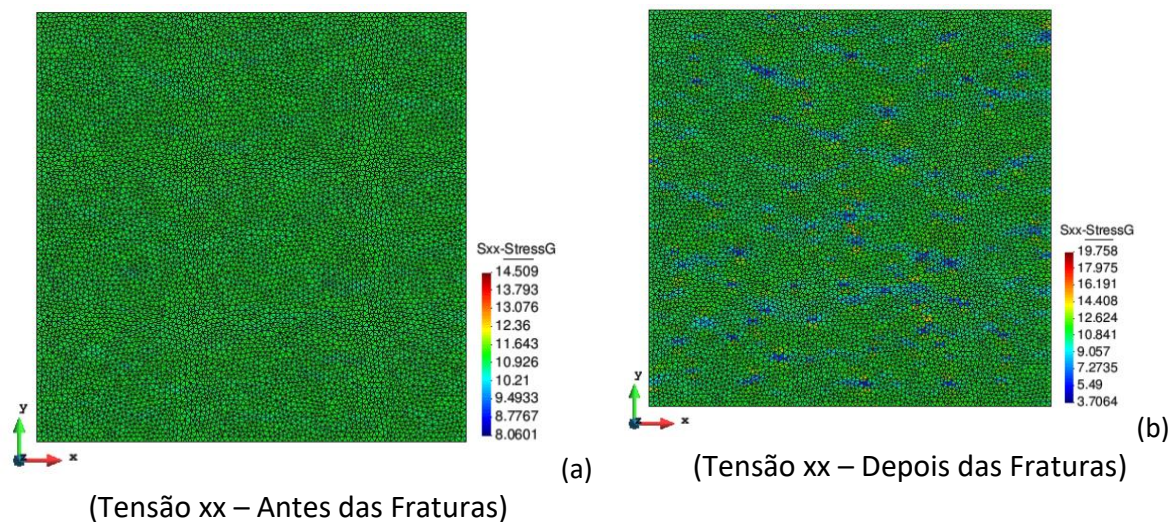


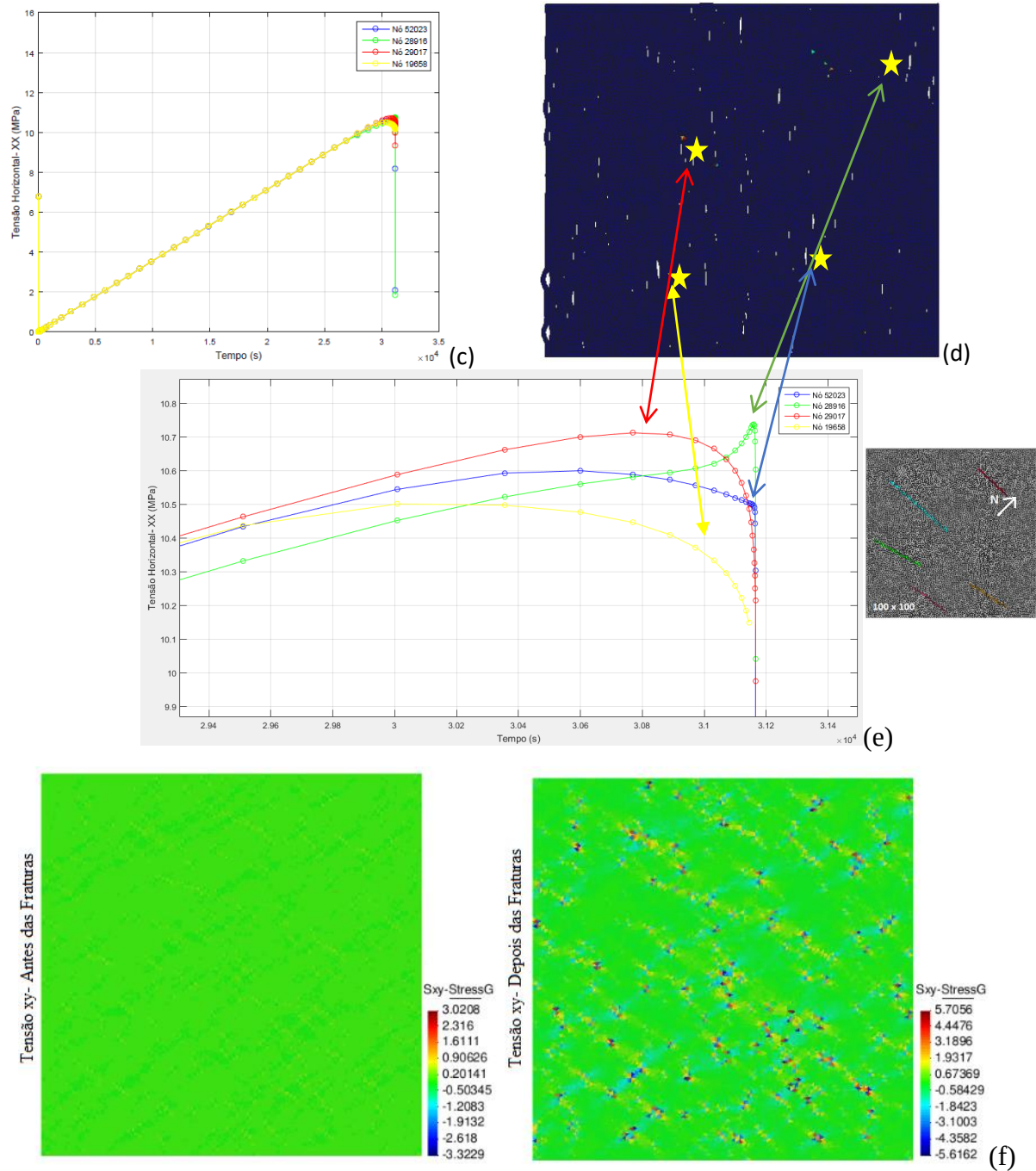
(a) Destaque do elemento incorporado, estágio pré-fraturamento; (b) Destaque das regiões com reativação de fraturas; (c) Estágio final de fraturamento, região totalmente danificada, estágio pós-fraturamento e evolução do Dano em elementos incorporados.

Partindo para uma análise de tensões, observa-se na Figura 57 o estado de tensões antes e depois da ruptura do material, isto é, imediatamente antes (Figura 57(a)) e logo após (Figura 57(b)) o fraturamento da rocha. Verifica-se que há uma concentração de tensões de cerca de 9.MPa em diferentes regiões na direção normal aos planos de fraturas que serão geradas o que consiste no pico de tensões pré ruptura da rocha o qual é levado a um alívio (queda de seus valores) a partir da ruptura em diante. Verificou-se que ao se considerar a inserção de descontinuidades incorporadas como fraturas pré-existentes, os valores de tensões de pico foram ligeiramente menores que no caso onde estas não foram incluídas.

Outra análise importante é a distribuição das tensões cisalhantes, que igualmente observada na análise anterior, existe formações de zonas de cisalhamento (pares conjugados) que formam uma angulação de 45° em relação aos planos de fratura (Ver Figura 57(f)).

Figura 57 - Distribuição de tensões horizontais e cisalhantes.



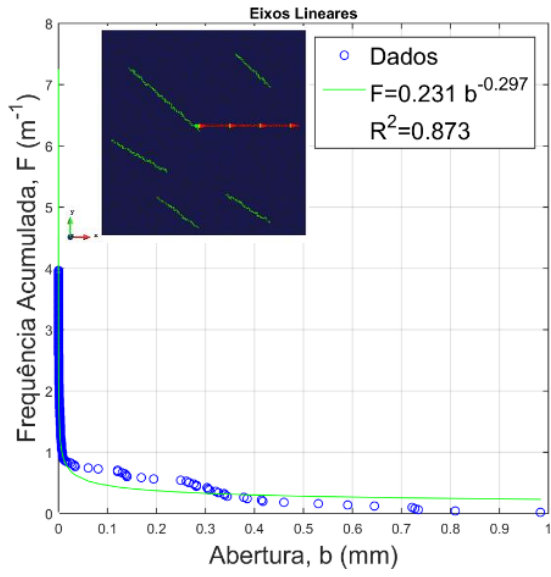


Fonte: A Autora, 2018.

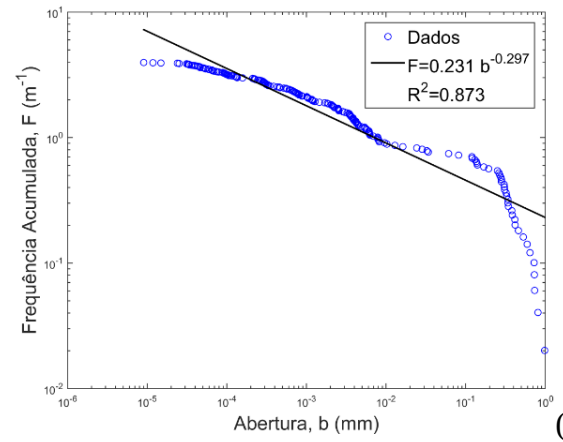
(a) Pré-Fraturamento; (b) Pós-Fraturamento; (c) Gráfico da Evolução de Tensões horizontais com relação ao Tempo; (d) Destaque dos nós contidos na malha; (e) Zoom da evolução das tensões horizontais dos respectivos nós e destaque das fraturas pré-existentes; (f) Tensão cisalhantes antes e pós-fraturamento.

Para realizar o estudo de quantificação de fraturas geradas, foram obtidas *scanlines* aleatoriamente em toda secção da malha. A Figura 58 mostra os resultados obtidos das *scanlines* na escala linear e na escala de log-log.

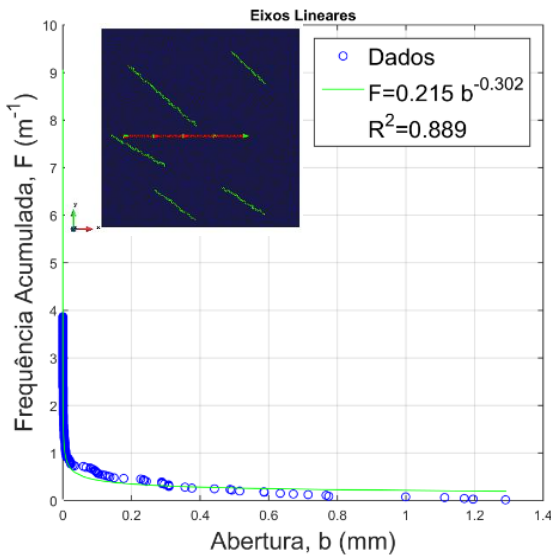
Figura 58 - Estudo das *scanlines* lineares da simulação com família de fraturas inclinadas.



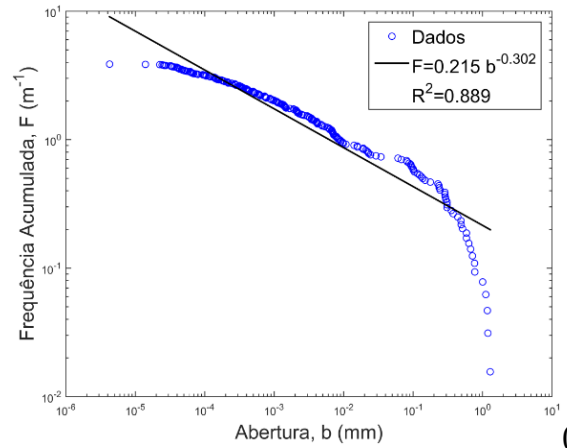
(a)



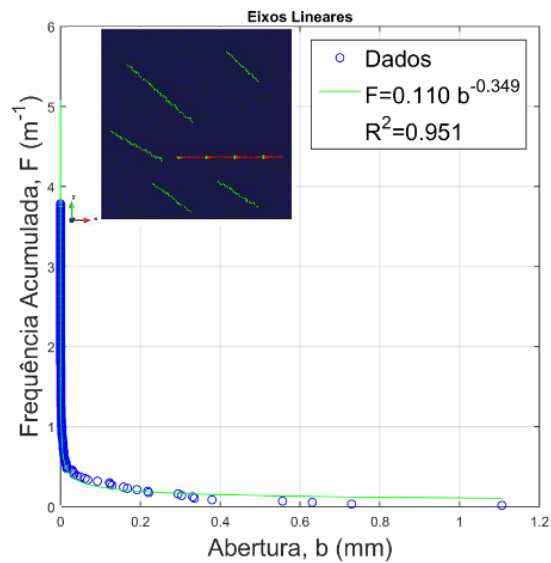
(b)



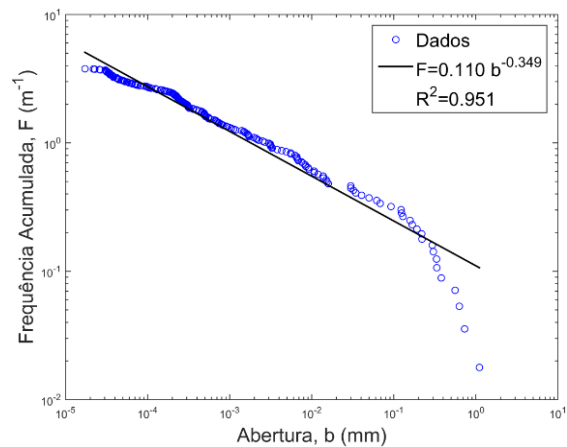
(c)



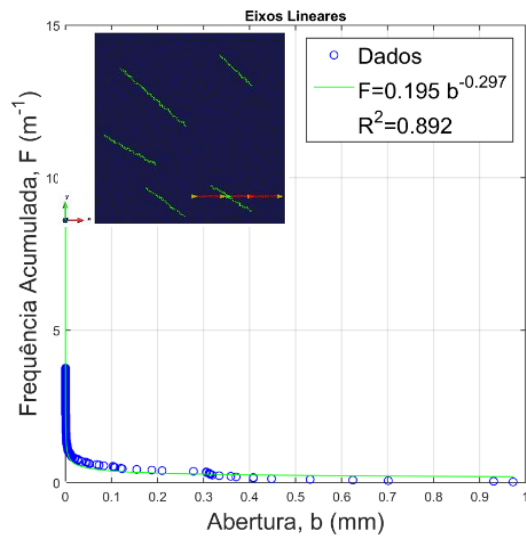
(d)



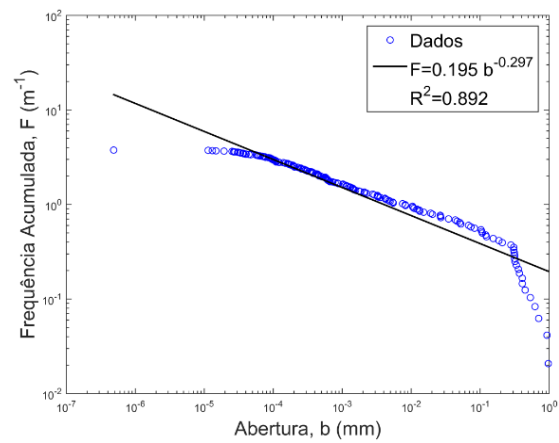
(e)



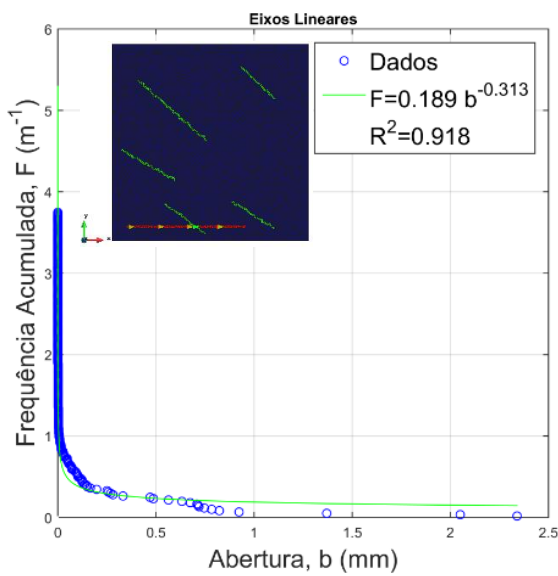
(f)



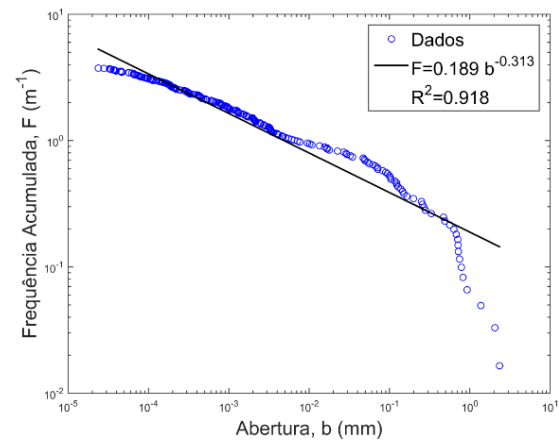
(g)



(h)



(i)

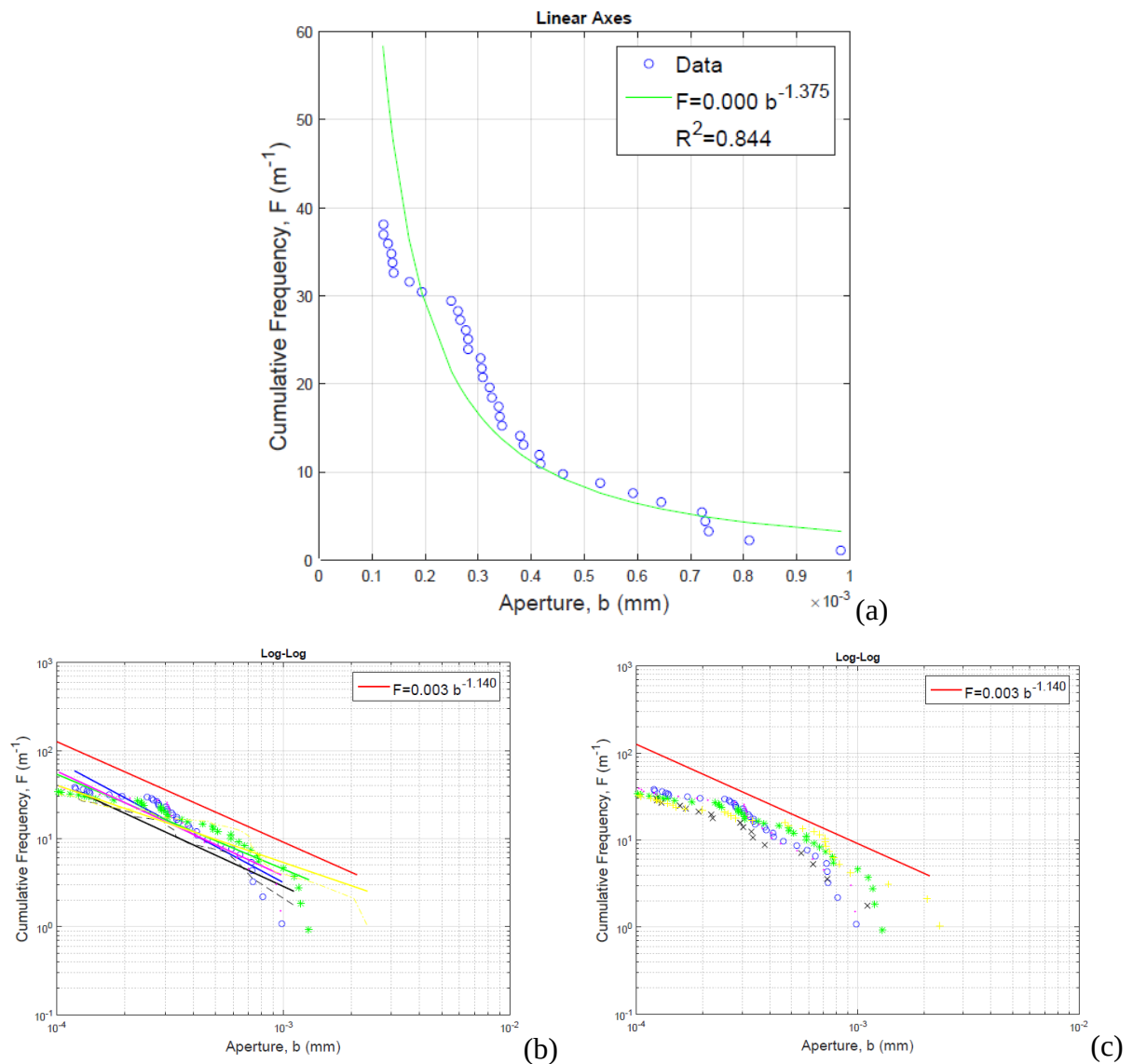


(j)

Fonte: A Autora, 2018.

(a) Dados ajustados em escala linear, posição (1); (b) Dados ajustados em escala log-log; (c) Dados ajustados em escala linear, posição (2); (d) Dados ajustados em escala log-log; (e) Dados ajustados em escala linear, posição (3); (f) Dados ajustados em escala log-log; (g) Dados ajustados em escala linear, posição (4); (h) Dados ajustados em escala log-log; (i) Dados ajustados em escala linear, posição (5); (j) Dados ajustados em escala log-log.

A partir dos dados obtidos foi realizado o estudo de comparação das retas dos coeficientes da lei de potência das *scanlines* geradas ao longo da malha, obteve-se o resultado em escala log-log da média das frequências acumuladas dos dados acima demonstrados. Conforme se pode observar na Figura 59.

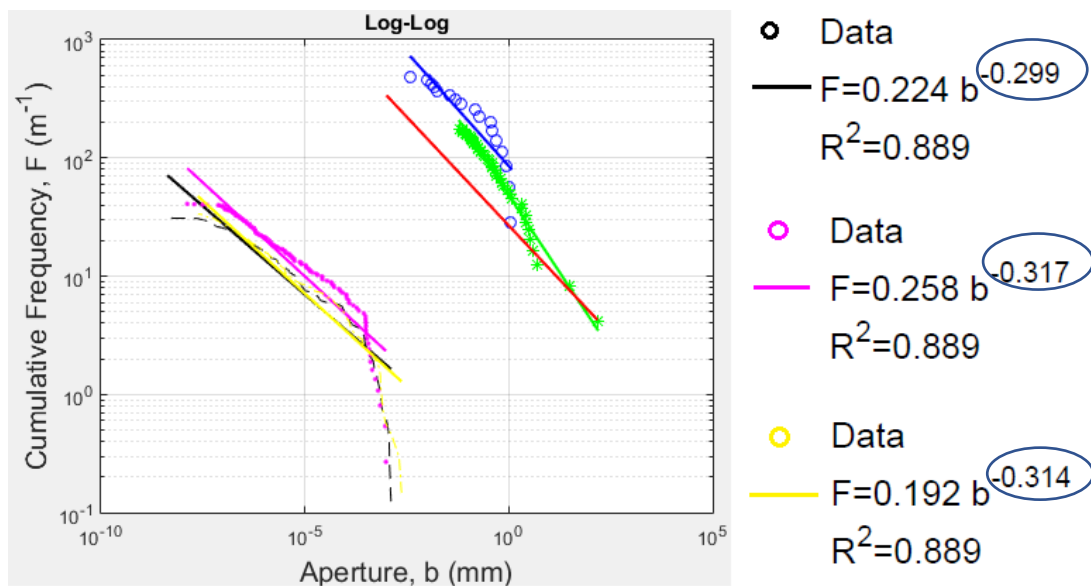
Figura 59 - Comparação das *scanlines* .

Fonte: A Autora, 2018.

- (a) Dados da média das *scanlines* em escala linear; (b) Dados em escala log-log e resultado da frequência acumulada média; (c) Destaque da reta média em escala log-log.

Novamente foi realizada a comparação dos resultados obtidos na simulação com a inserção de descontinuidades incorporadas com as *scanlines* de campo. A Figura 60 mostra tal comparação.

Figura 60 - Comparação das *scanlines* de campo com as *scanlines* obtidas na simulação com inserção de descontinuidades na direção inclinada.



Fonte: A Autora, 2018.

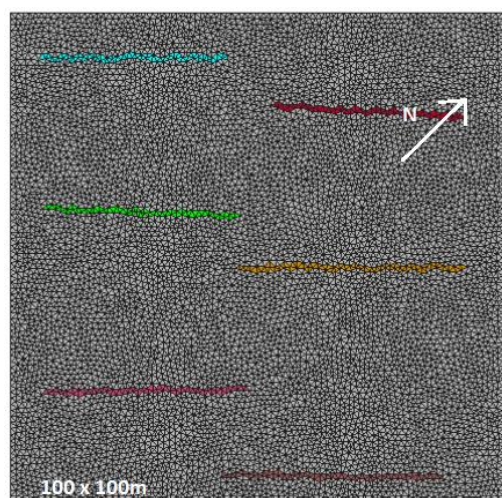
Analisando a variável CV_K que consiste no coeficiente de variação da lei de potência, que está em destaque na Figura 60 comparando com mesma variável da Figura 51 que são as *scanlines* de campo, pode-se afirmar que a variação de fraturas (abertura e espaçamento) das *scanlines* de campo e da simulação obedece a um padrão análogo da distribuição de fraturas que ocorreram na Fm. Crato.

Outro estudo realizado é a inserção de elementos incorporados na direção horizontal com relação à família de fraturas principais, tais análises estão detalhadas no tópico que segue.

5.2.3 Rocha com Elementos Incorporados Posição Horizontal

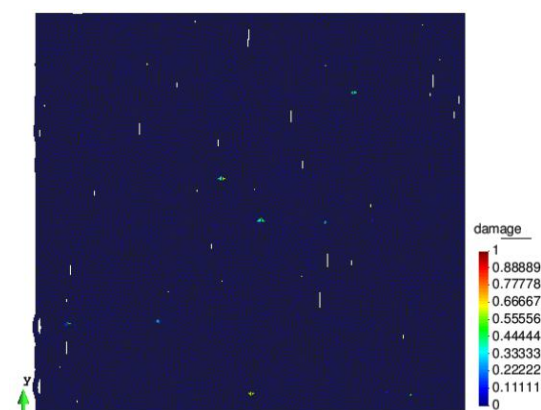
Nesta fase da análise foi simulado o problema com inserção de fraturas horizontais com relação à geração da família de fraturas 1 (340Az). Lembrando que as propriedades dos materiais são as mesmas da simulação sem elementos incorporados, ou seja, a rocha intacta. Para visualizar as fraturas foram novamente adotados fatores de ampliação da deformada para cada estágio os quais dependem no campo de deslocamentos observados.

Figura 61 - Malha de elementos finitos.



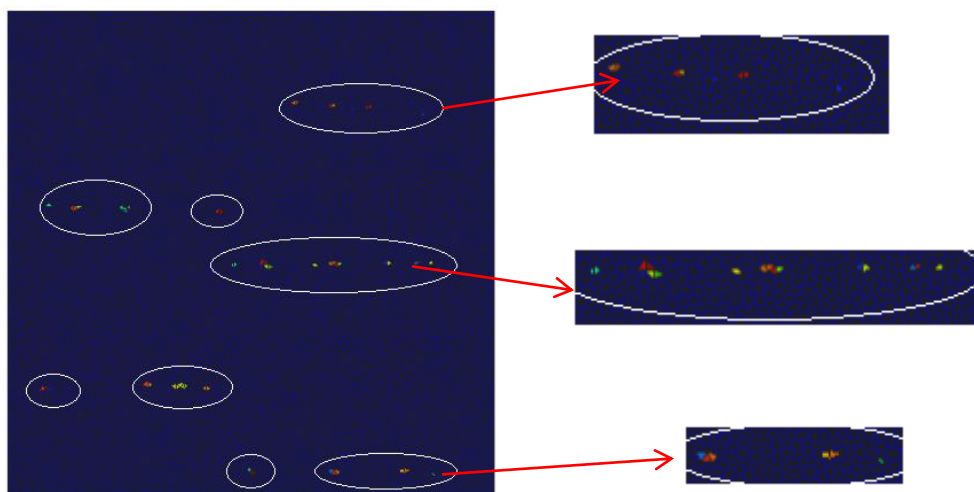
(a)

Estágio 1 (Fator 1)



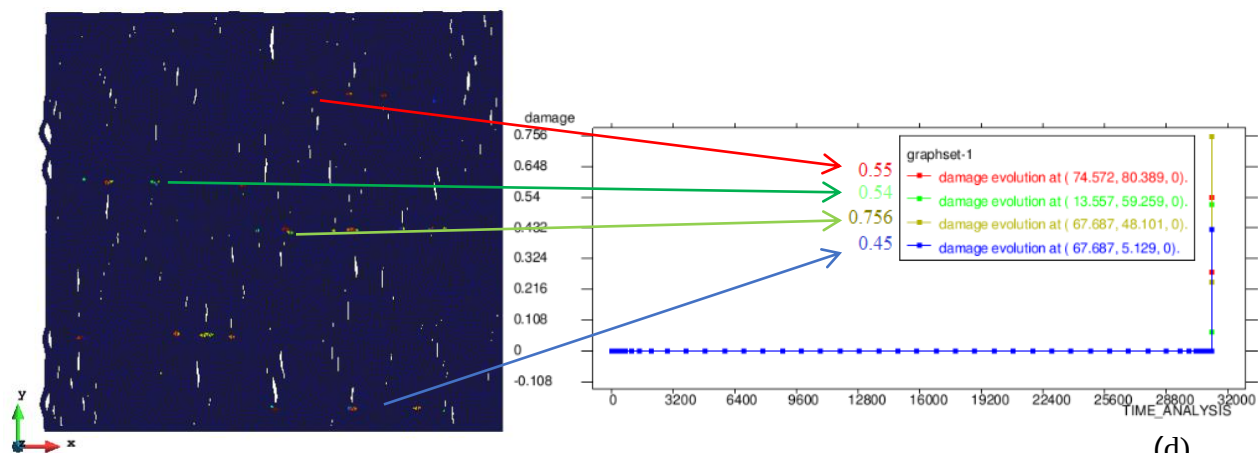
(b)

Estágio 2 (Fator 50)



(c)

Estágio 3 (Fator 1)



(d)

Estágio Final (Fator 100)

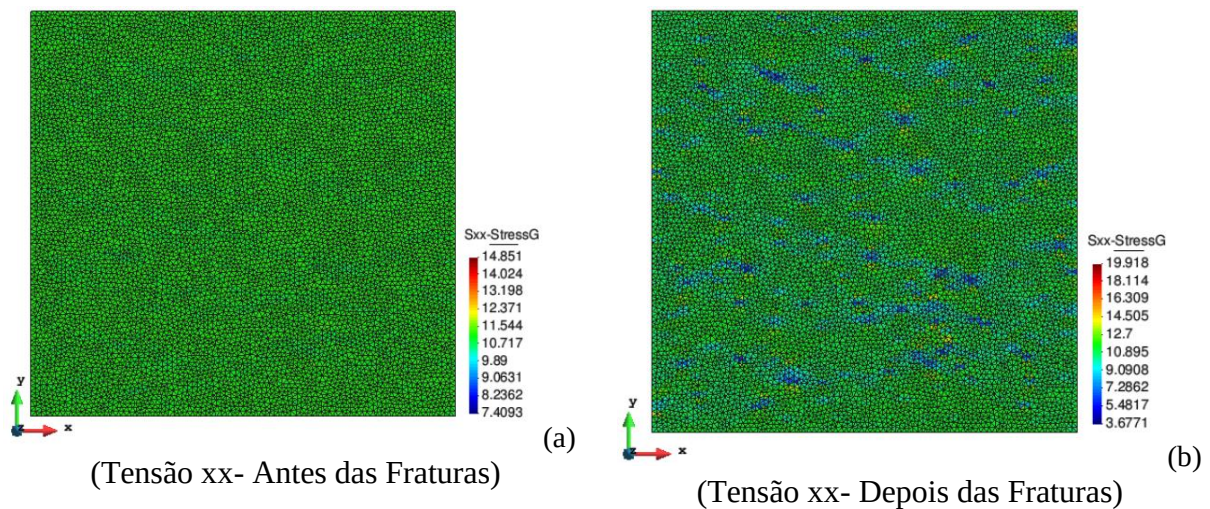
Fonte: A Autora, 2018.

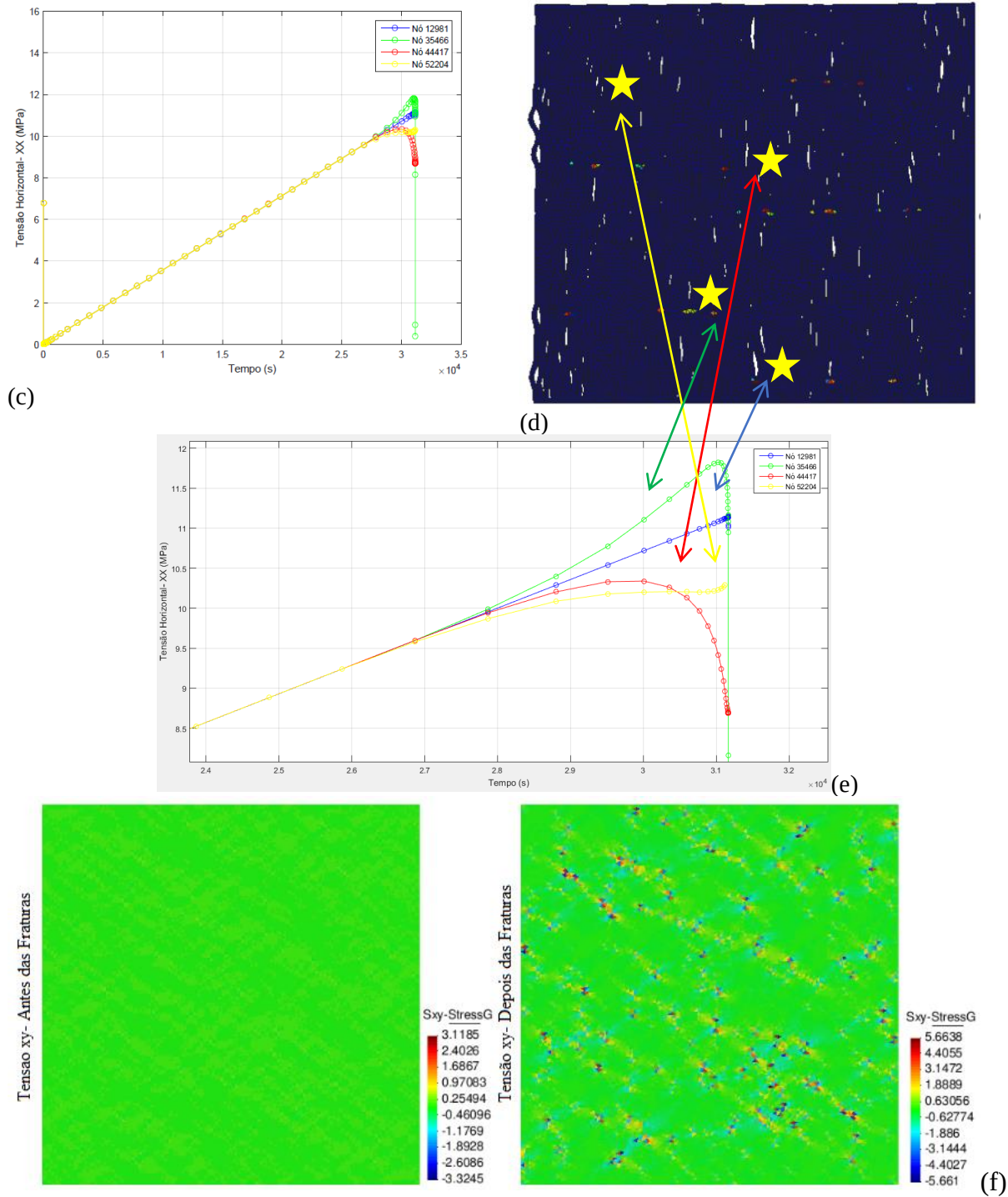
(a) Destaque da malha com inserção de elementos incorporados, estágio pré-fraturamento; (b) Estágio inicial do fraturamento; (c) Destaque das regiões de reativação de fraturas ; (d) Estágio Pós-fraturamento.

Assim como observado nas análises anteriores, as tensões apresentam picos, porém nesta análise a ordem é de 10. MPa, isso mostra a influência das fraturas pré-existent, bem como de sua direção.

Este aspecto é relevante para o impacto sobre a formação de novas fraturas e a propagação, em virtude da heterogeneidade geomecânica promovida e da interação entre as fraturas naturais e as geradas. A Figura 62(a) e (b) mostra o estado de tensões antes e depois da geração de fraturas, respectivamente. E a Figura 62(f) mostra o estado de tensões cisalhantes, mostrando que o meio além de gerar fraturas por tração, pode-se formar planos de fraturas por cisalhamento.

Figura 62 - Distribuição de tensões horizontais e cisalhantes.



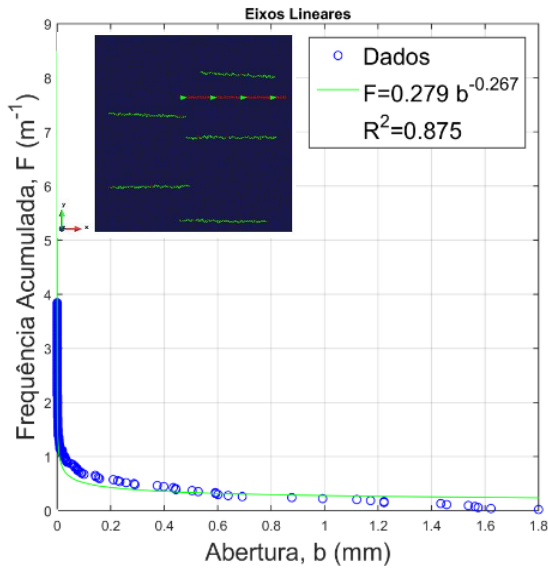


Fonte: A Autora, 2018.

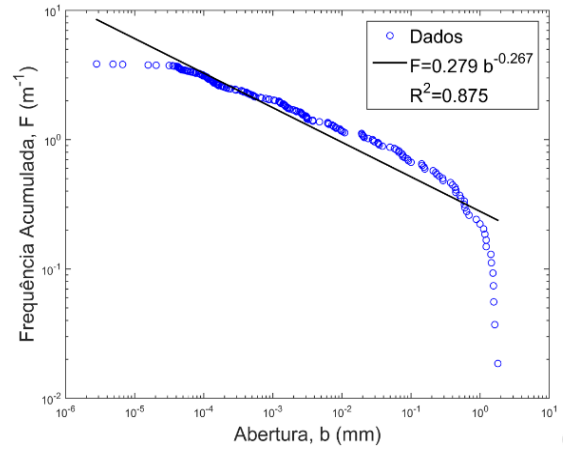
(a) Antes do fraturamento; (b) Depois do fraturamento; (c) Gráfico da Evolução de Tensões horizontais com relação ao tempo; (d) Destaque dos nós; (e) Zoom da evolução das tensões horizontais; (f) Tensões Cisalhantes antes e depois da ruptura.

A partir desse estudo das tensões e com o intuito de quantificar as fraturas geradas no meio foi aplicada a técnica de *scanlines*, lembrando que tais *scanlines* foram obtidas de forma aleatória. A Figura 63 apresenta os resultados da *scanlines* lineares ao longo de toda malha.

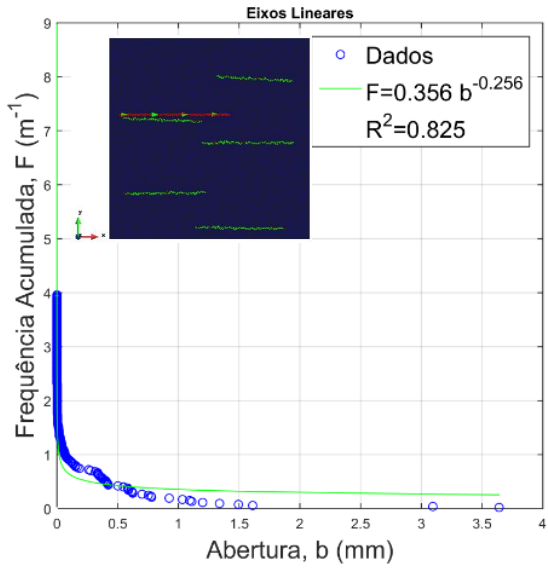
Figura 63 - Estudo das *scanlines* lineares na simulação com família de fraturas inclinadas.



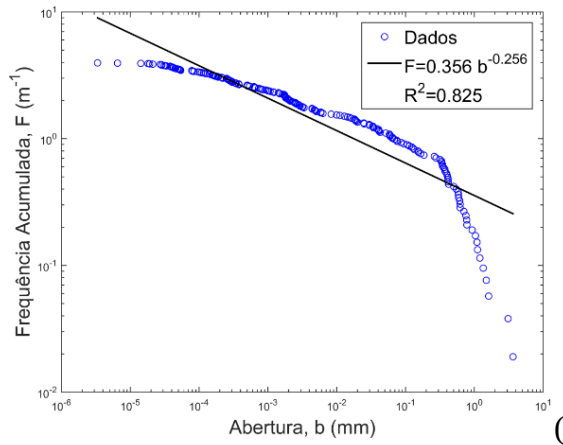
(a)



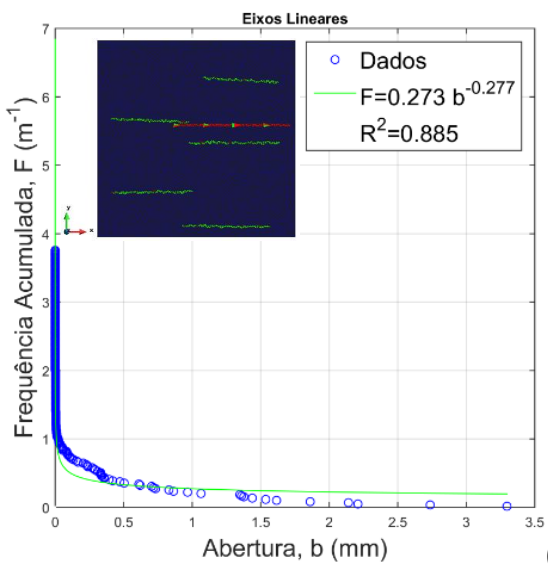
(b)



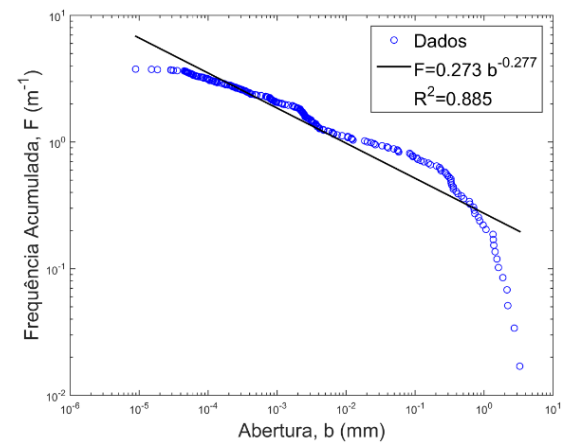
(c)



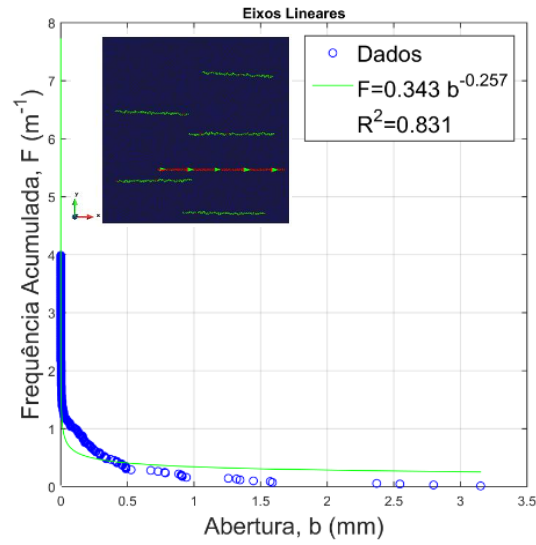
(d)



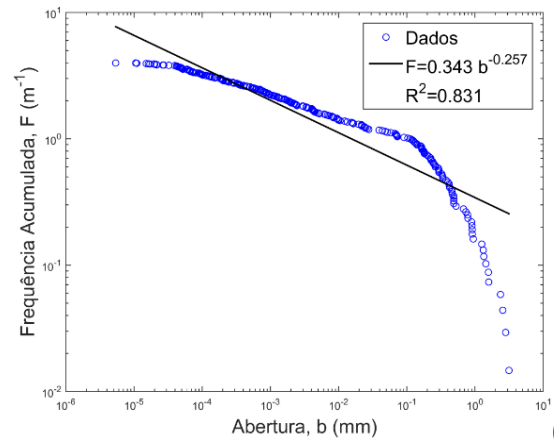
(e)



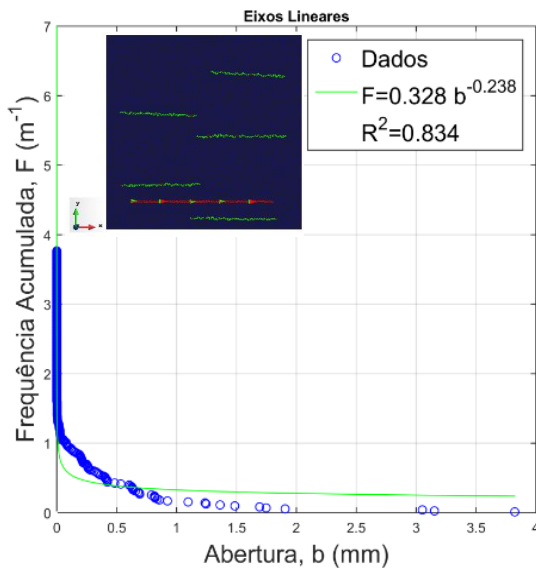
(f)



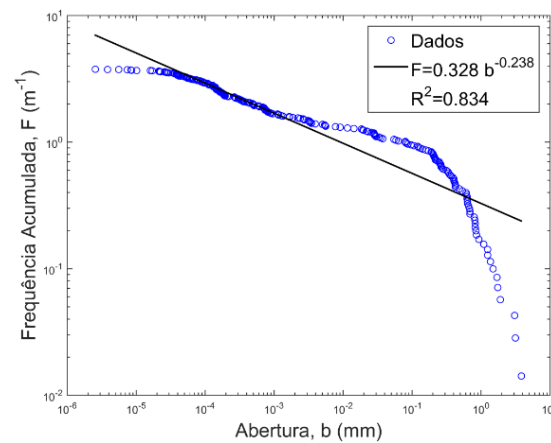
(g)



(h)



(i)

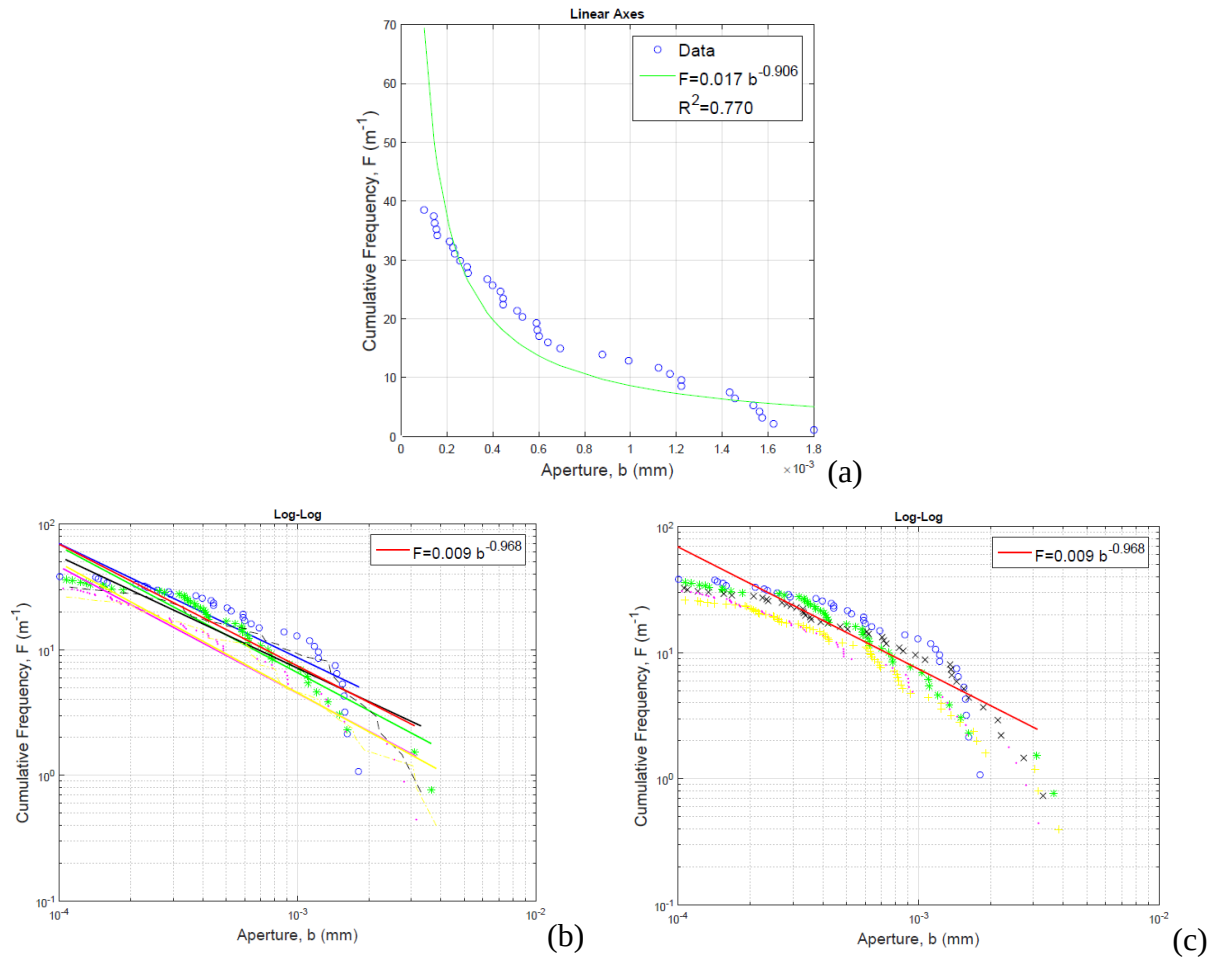


(j)

Fonte: A Autora, 2018.

(a) Dados ajustados em escala linear, posição (1); (b) Dados ajustados em escala log-log; (c) Dados ajustados em escala linear, posição (2); (d) Dados ajustados em escala log-log; (e) Dados ajustados em escala linear, posição (3); (f) Dados ajustados em escala log-log; (g) Dados ajustados em escala linear, posição (4); (h) Dados ajustados em escala log-log; (i) Dados ajustados em escala linear, posição (5); (j) Dados ajustados em escala log-log.

A partir dos dados obtidos realizou-se a comparação das retas dos coeficientes da lei de potência das *scanlines* geradas ao longo da malha para estudar a variação das *scanlines* ao longo da malha e obteve-se o resultado em escala log-log da média das frequências acumuladas dos dados referente à Figura 63. Portanto a Figura 64 apresenta esta análise.

Figura 64 - Comparação das *scanlines*.

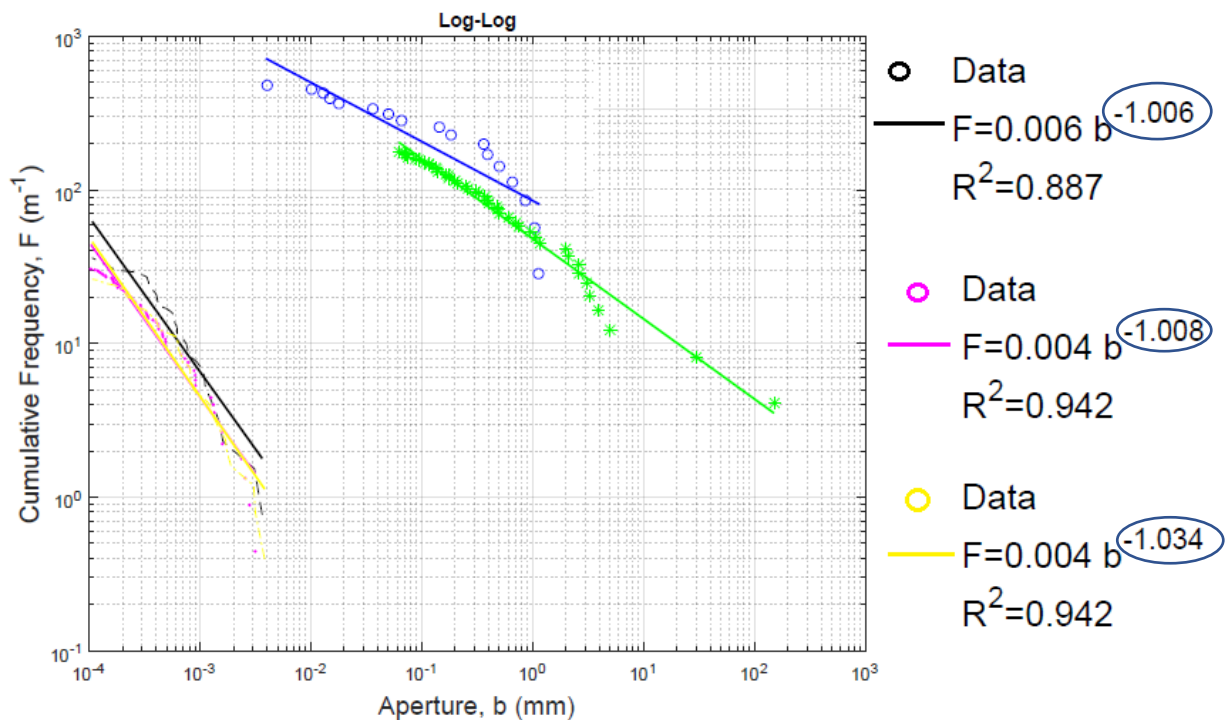
Fonte: A Autora, 2018.

(a) Dados da média das *scanlines* em escala linear; (b) Dados em escala log-log e resultados da frequência acumulada média; (c) Destaque da reta em escala log-log.

Percebe-se que as dimensões das fraturas obtidas são menores com relação às fraturas obtidas na simulação que não há elementos incorporados, uma das hipóteses para explicar este efeito é o alívio de tensões que ocorre no meio fraturado.

Também foi realizada a análise de comparação com as *scanlines* geradas em campo, conforme Figura 65 com as mesmas especificações realizadas na comparação de campo com a simulação de elementos incorporados na direção inclinada com relação à família de fraturas. Portanto a Figura 65 mostra o resultado obtido.

Figura 65 - Comparação das *scanlines* de campo com as *scanlines* obtidas na simulação com inserção de descontinuidades na direção horizontal.



Fonte: A Autora, 2018.

Partindo para uma análise da variável CV_K que está em destaque na Figura 65 comparando com a mesma variável da Figura 51 lembrando que esta variável é um dos coeficientes de variação da lei de potência, pode-se afirmar que a variação de fraturas (abertura e espaçamento) nesta análise foi menor, isso se dá a quantidade de fraturas e aberturas geradas nesta análise, olhando a frequência acumulada valida esta hipótese, ou seja, é bem menor da frequência acumulada encontrada em campo.

5.3 GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FRATURAS EXTENSIONAIS EM PERFIL DA FM. CRATO CONSIDERANDO HETEROGENEIDADE GEOMECÂNICA DAS FEIÇÕES.

Como continuidade das análises realizadas nos itens anteriores, empregou-se novamente o método de elementos finitos especiais de interface associado à técnica de fragmentação. Porém, a aplicação foi realizada para a simulação da formação (geração) e propagação de fraturas naturais em uma secção bidimensional representativa de um perfil estratigráfico da Fm. Crato considerando o efeito de heterogeneidade de camadas. O objetivo consistiu em analisar o efeito de diferenças propriedades mecânicas (módulo de Young e

resistência à tração) de cada camada sobre a geração e propagação das fraturas dado um regime extensional lateral, para simular o efeito de arqueamento da bacia, e uma compressão vertical para simular o soterramento da Fm. Crato pelas demais Formações.

O problema analisado consiste, portanto, na simulação da geração e propagação de fraturas extensionais em um perfil considerando intercalações de camadas de laminitos da Fm. Crato com os outros tipos de litogias, representando uma variação faciológica com impacto na competência mecânica das camadas sobre a gênese e propagação das fraturas extensionais.

O modelo composto nesta simulação foi elaborado de forma conceitual, tomando como base o estudo de estratigrafia mecânica da Fm. Crato realizado pela equipe de geologia do projeto Crato UFPE/Petrobras, realizado para o topo do nível C6 desta requerida Formação, ao longo do perfil litológico PC-0. Neste foram identificados quatro intervalos litológicos com diferentes valores de resistências elásticas, aferidas com medição *in situ* de UCS (*Uniaxial Compressive Strength*).

Portanto o cenário analisado consiste em um perfil hipotético composto por 5 camadas com propriedades mecânicas diferentes entre si sendo o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e resistência à tração da rocha. Assim considerou-se uma secção vertical (2D) representativa da Fm. Crato. O perfil é submetido a uma taxa de deslocamento vertical de $(-7.00076e^{-9}m/s)$, representando um estado de soterramento vertical, e a uma variação de taxa de deslocamento horizontal de $(0 \text{ a } -1.8103^{-8}m/s)$, no sentido de extensão, conforme ilustrado na Figura 66, que também mostra as condições de contorno de restrição de movimento na base e aresta do domínio. Esta análise foi em deformação plana.

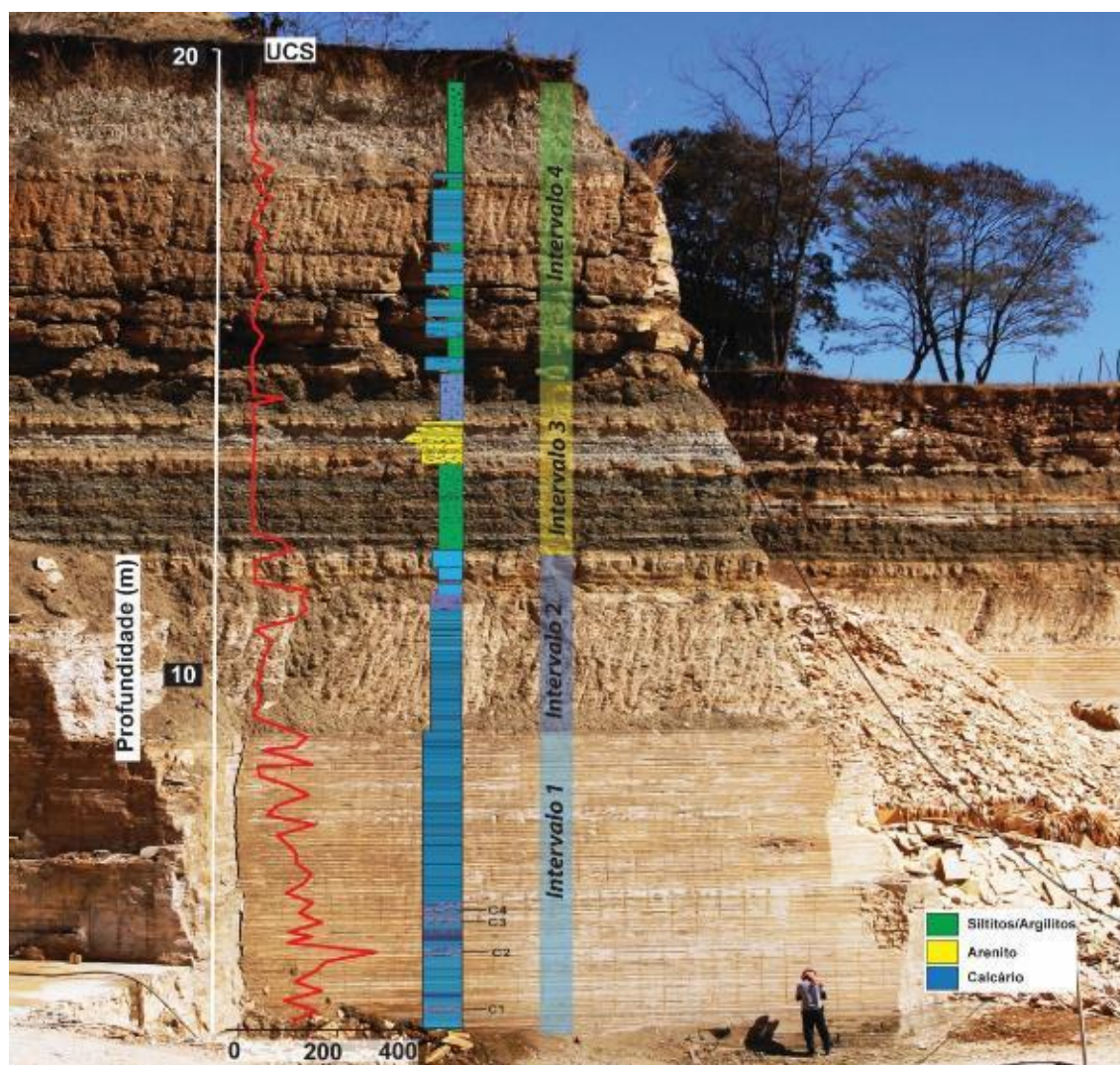
Figura 66 - Detalhamento do domínio e condições de contorno.



Fonte: A Autora, 2019.

A Figura 67 mostra o perfil de aquisição de dados para o estudo de estratigrafia mecânica de laminitos em afloramento da Fm. Crato.

Figura 67 - Perfil de aquisição de dados para o estudo de estratigrafia mecânica de laminitos em afloramento da Fm. Crato, na Mina Três Irmãos: Variação das fácies mecânicas.

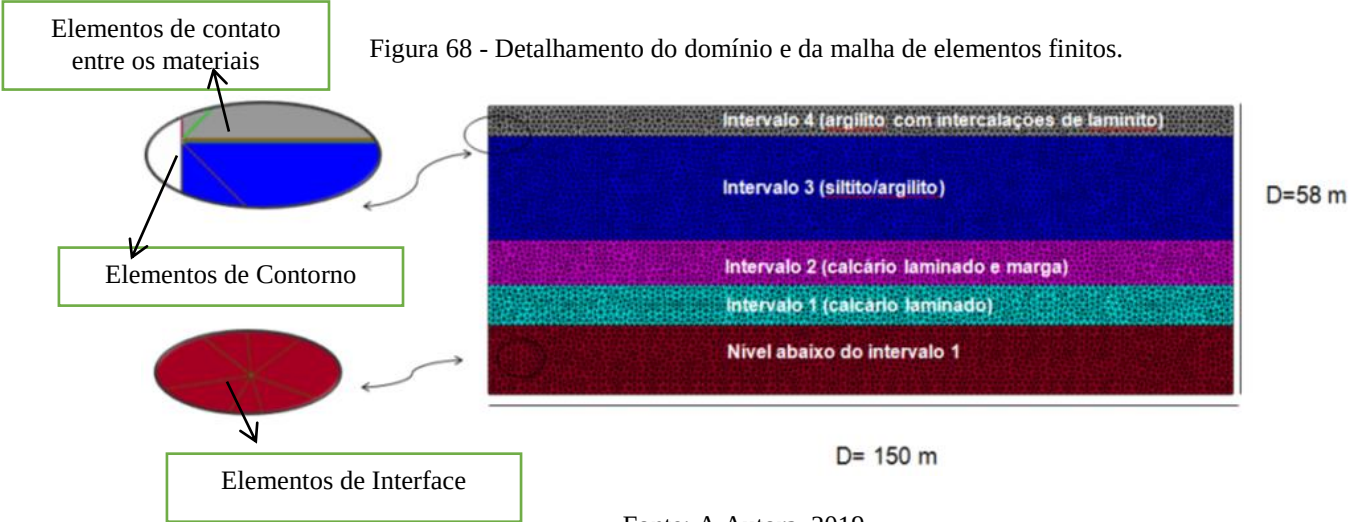


Fonte: Relatório Projeto Crato/UFPE/Petrobras, 2017.

A malha de elementos finitos apresenta 55525 nós e 64606 elementos, composta por elementos do tipo triângulo linear e considerando a aplicação da técnica de fragmentação que insere os elementos finitos com elevada razão de aspecto. Estes elementos possuem uma espessura inicial de $1,0 \times 10^{-5}$ m. O modelo constitutivo adotado é o modelo de Dano à Tração com critério de falha que assume a propagação da fratura na direção de máxima tensão de

tração. O modelo de dano foi aplicado apenas aos elementos de interface, ficando um modelo elástico linear associado aos elementos finitos regulares.

A Figura 68 apresenta a malha e seus respectivos materiais, sendo cinco tipos de feições e quinze materiais contendo os elementos finitos de interface especiais, munidos de relações constitutivas adequadas para representar os efeitos do processo de fraturamento.



Fonte: A Autora, 2019.

A Tabela 3 apresenta as propriedades utilizadas na análise, sendo estas o módulo de elasticidade (E), Coeficiente de Poisson (ν) e a resistência à tração (δ_y) de cada material desta simulação. A energia de fratura (G_F) adotada foi de 100 N/m.

A ordenação das camadas se dá de cima para baixo. A camada quatro, intervalo 1, consiste em um laminito de maior rigidez.

Tabela 3 - Propriedades dos Materiais empregados no modelo de fraturas extensionais em perfil.

Materiais	Módulo de Elasticidade (E)GPa	Poisson (ν)	Energia de Fratura G_f N/m	Resistência a Tração (δ_y)MPa
Intervalo 4 (contínuo)	24000,00	0,247	-----	Elástico
Intervalo 4 (Interface)	24000,00	0,247	100,00	8,50
Intervalo 3 (contínuo)	24000,00	0,247	-----	Elástico
Intervalo 3 (Interface)	24000,00	0,247	100,00	9,00
Intervalo 2 (contínuo)	25000,00	0,247	-----	Elástico
Intervalo 2 (Interface)	25000,00	0,247	100,00	9,05
Intervalo 1 (contínuo)	26000,00	0,247	-----	Elástico
Intervalo 1 (Interface)	26000,00	0,247	100,00	9,10
Base (contínuo)	24500,00	0,247	-----	Elástico
Base (Interface)	24500,00	0,247	100,00	9,00

Fonte: A Autora, 2019.

Conforme a classificação dos materiais e a taxa de deformação adotada, serão realizadas três análises distintas, a primeira análise denominada de rocha intacta, ou seja, sem elementos incorporados, apenas com a técnica de fragmentação da malha. E as demais análises além da técnica de fragmentação são inseridas elementos de descontinuidades fortes incorporadas, para simular uma heterogeneidade pela presença de descontinuidades já existentes no meio rochoso.

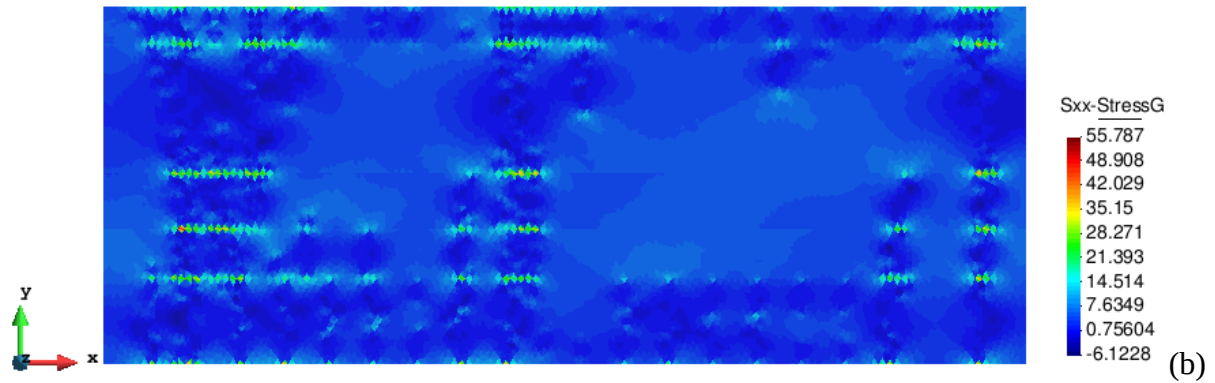
5.3.1 Rocha Intacta

Inicialmente apresenta-se a distribuição das tensões horizontais (direção da extensão) no domínio. Verificou-se que à medida que a taxa de deslocamento prescrita na face esquerda é aplicada tensões horizontais de tração se desenvolvem nas camadas, porém com uma maior concentração na camada 04 que consiste no laminito de maior rigidez e resistência à tração. Isso se dá em virtude das demais camadas, em relação a esta, sofrerem maior deformação antes da ruptura.

A Figura 69 mostra a distribuição da tensão horizontal imediatamente antes e imediatamente depois da ruptura, com a recorrência de geração de fraturas. Uma vez que as tensões atingem o valor de resistência à tração da rocha, as fraturas são geradas e há um alívio de tensões na camada. Uma concentração de tensão nas pontas (*tips*) das fraturas é observada, mostrando sua interação com a camada capeadora.

Figura 69 - Distribuição das tensões horizontais.





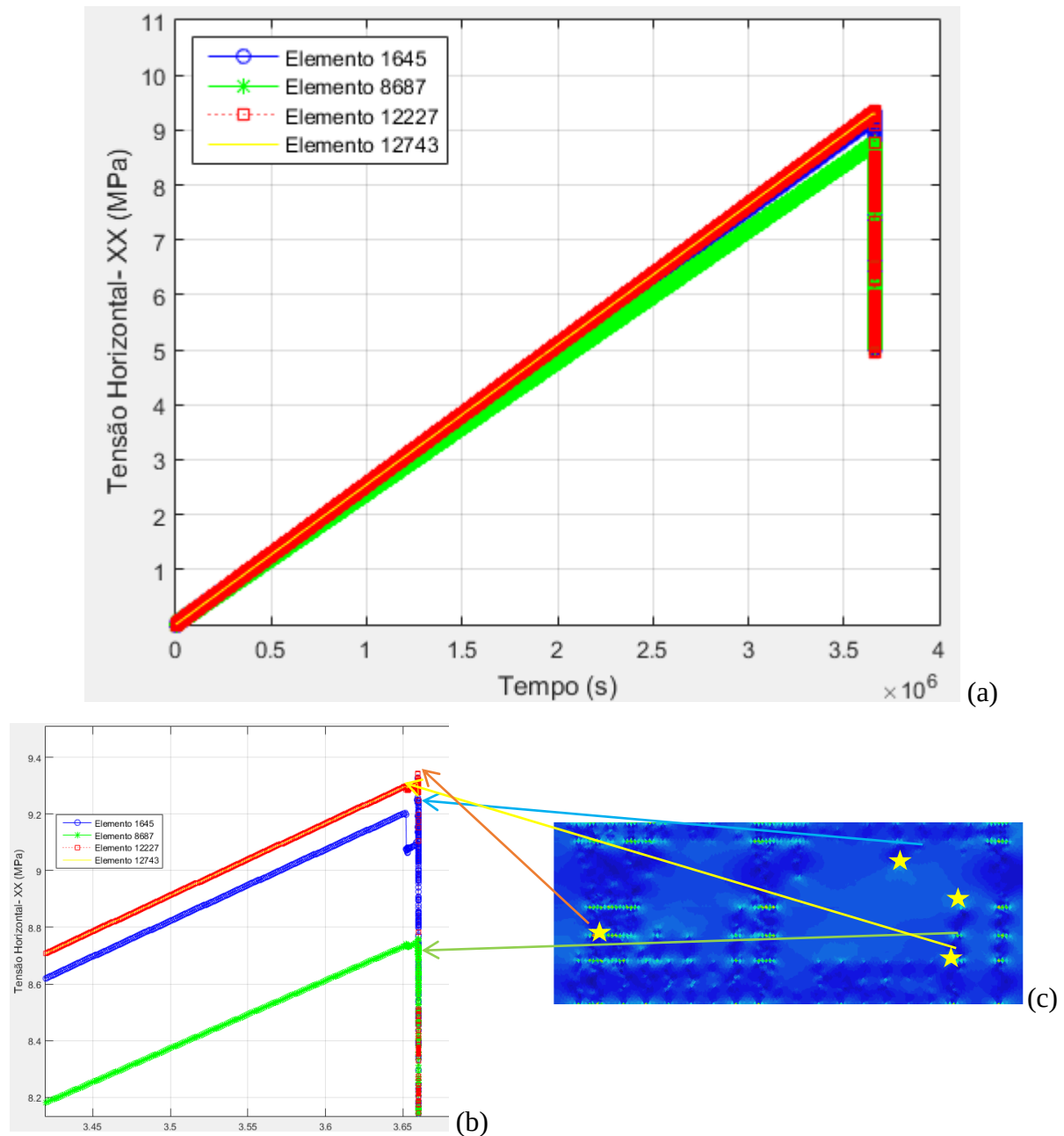
Fonte: A Autora, 2019.

(a) Instante antes da geração de fraturas; (b) Instante depois da geração de fraturas.

Dado o estado de tensões alcançado, o material sofre dano em regiões localizadas e assim a variável de dano atinge a unidade e o elemento de interface tem sua rigidez degenerada e sua abertura aumentada, configurando assim um salto no campo de deslocamentos e a formação de uma fratura.

Isto pode ser observado na Figura 70 onde mostra graficamente a evolução da curva de variação de tensão horizontal com o tempo para pontos adjacentes a fraturas em diferentes regiões das feições. Verifica-se que a tensão para a qual ocorre a total ruptura varia em um intervalo de 8.65 e 9.1MPa, o que está de acordo com a resistência a tração imposta nas condições do problema.

Figura 70 - Evolução da curva de tensões horizontais.



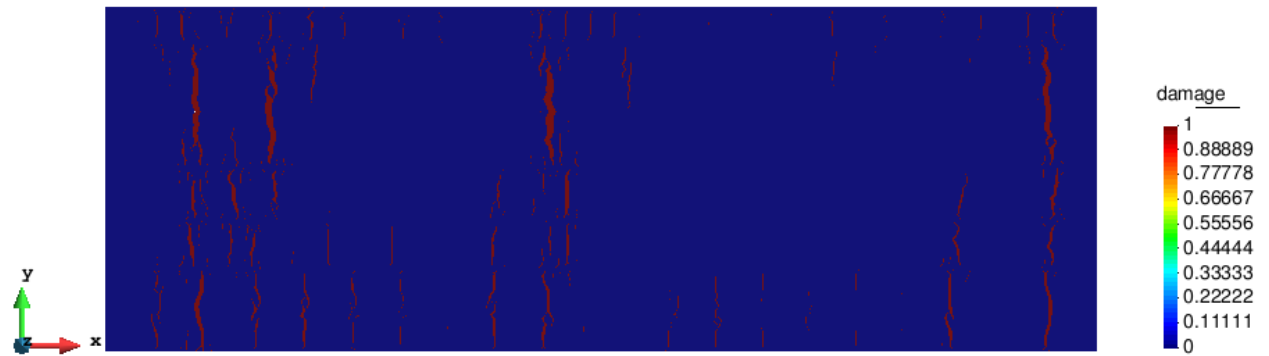
Fonte: A Autora, 2019.

(a) Gráfico da evolução de tensões horizontais com relação ao tempo; (b) Zoom do gráfico de evoluções das tensões horizontais; (c) Localização dos elementos.

Realizado este estudo da evolução das tensões horizontais, para estudar o efeito de ruptura do material, apresenta-se a Figura 71 mostra a variável de dano assumindo valor unitário. Porém, como esta se dá apenas nos elementos de interface, cuja espessura é muito pequena comparada às dimensões do domínio, aplicando um fator de ampliação (escala) na deformada da malha de elementos finitos, tais elementos podem ser visualizados na cor

vermelha. Desta forma fica possível visualizar as fraturas geradas e as propagações das mesmas.

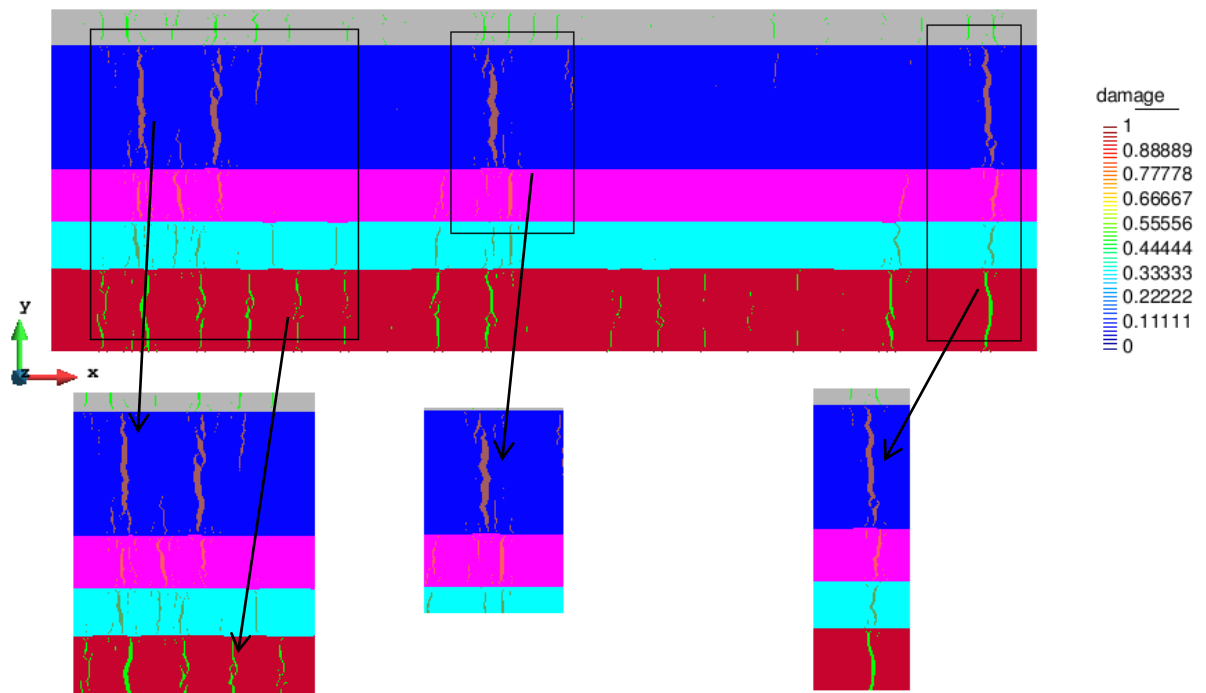
Figura 71 - Variável de dano com fator de ampliação 80 vezes.



Fonte: A Autora, 2019.

A Figura 72 apresenta um detalhe das fraturas mais representativas (de maior abertura e identificáveis visualmente), considerando a identificação de cada camada. Pode-se observar a propagação das fraturas nas camadas acima e abaixo da rocha mais competente, porém com um deslocamento relativo (translação da linha da fratura). Além disso, existem fraturas com aberturas menores das quais também é possível visualizar.

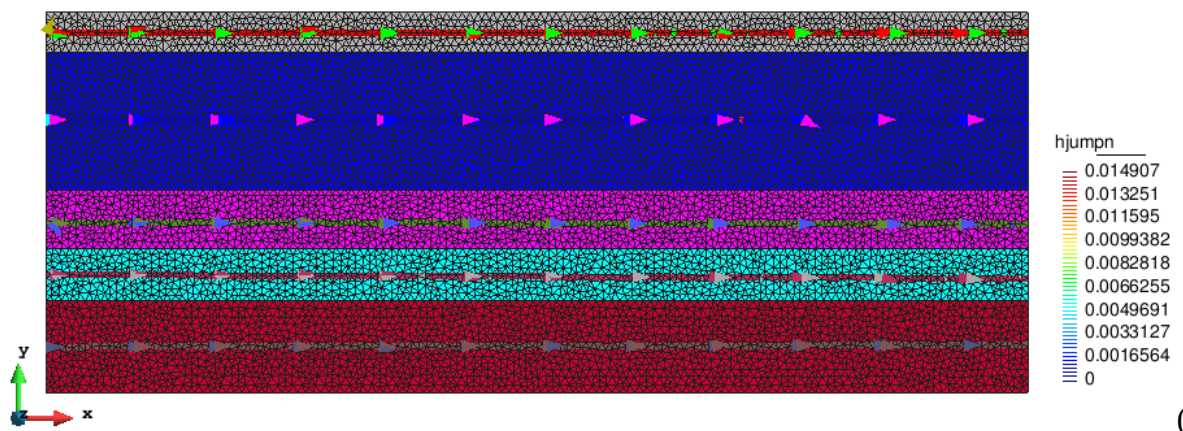
Figura 72 - Detalhe de uma amostra da região fraturada: Interação das fraturas geradas nas 02e 04 com as camadas de base e capeadora (setas pretas indicando fraturas visíveis).



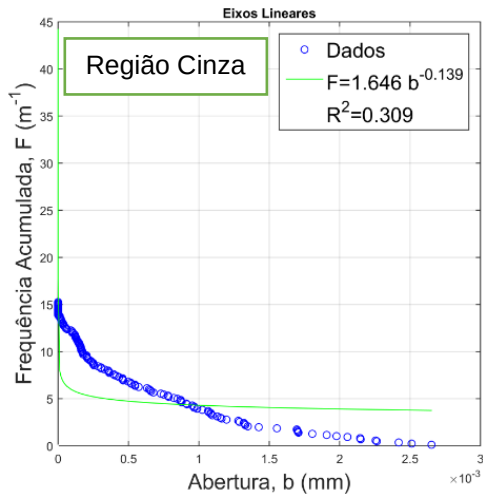
Fonte: A Autora, 2019.

A partir de observadas estas fraturas, a Figura 73 mostra o estudo realizado através de *scanlines* traçadas ao longo da extensão das feições, no total foram cinco *scanlines*, utilizando a metodologia descrita em (ORTEGA *et al.*, 2006; SANTOS *et al.*, 2015; SANTOS, 2017), uma para cada intervalo da malha (Ver Figura 68).

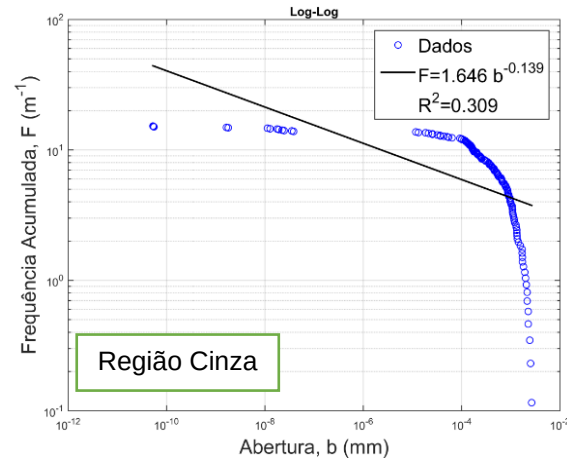
Figura 73 - *Scanlines* distribuídas ao longo das feições.



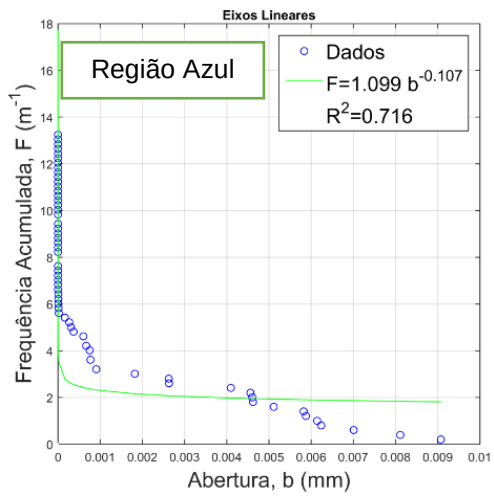
(a)



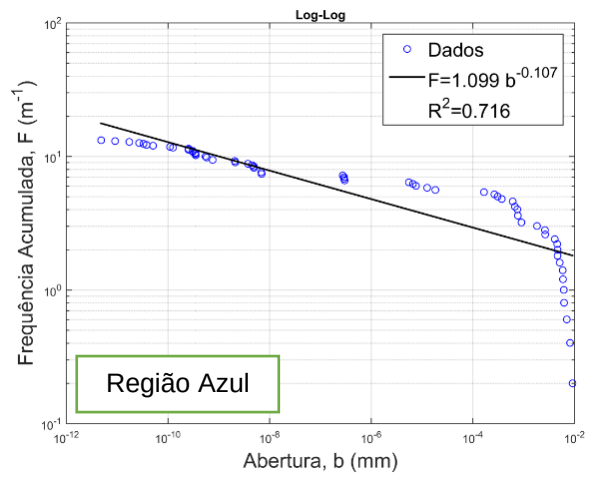
(b)



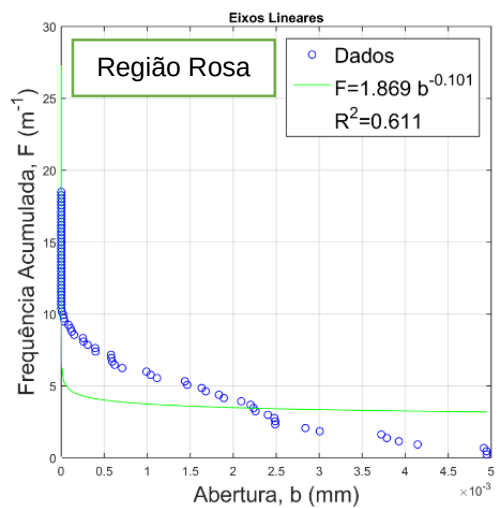
(c)



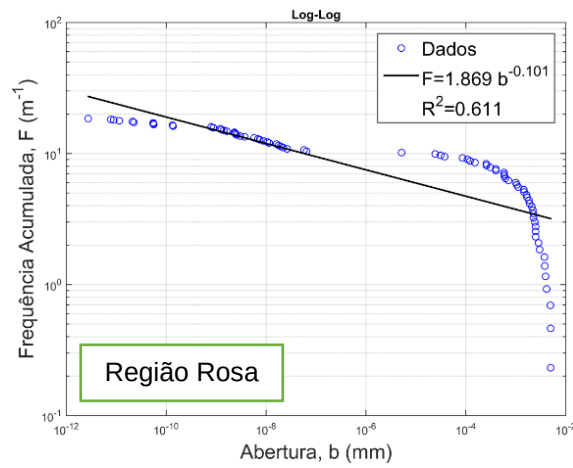
(d)



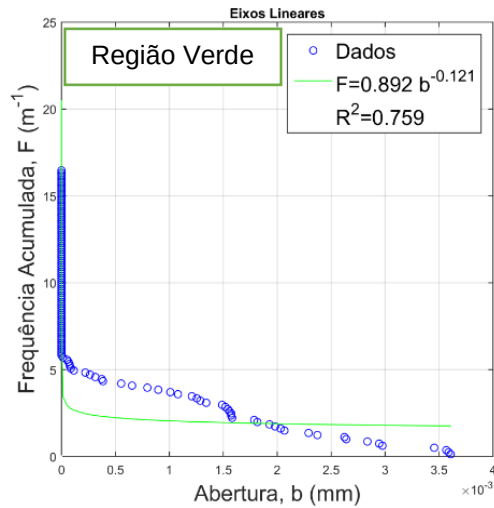
(e)



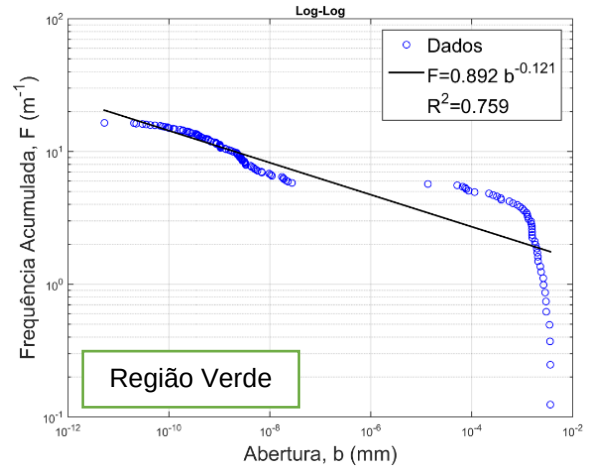
(f)



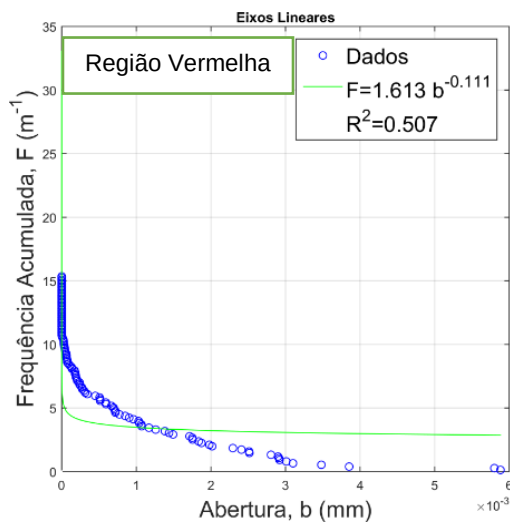
(g)



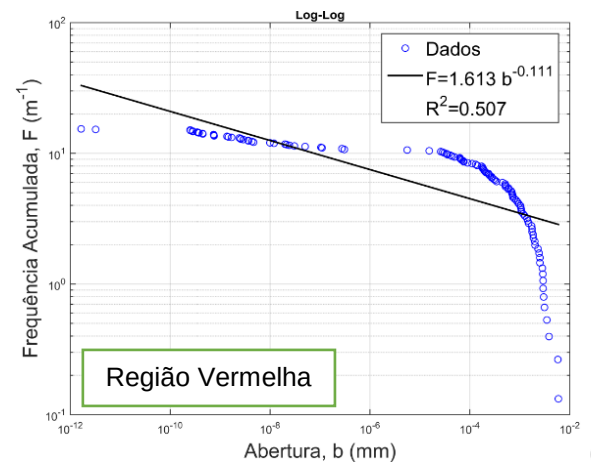
(h)



(i)



(j)



(k)

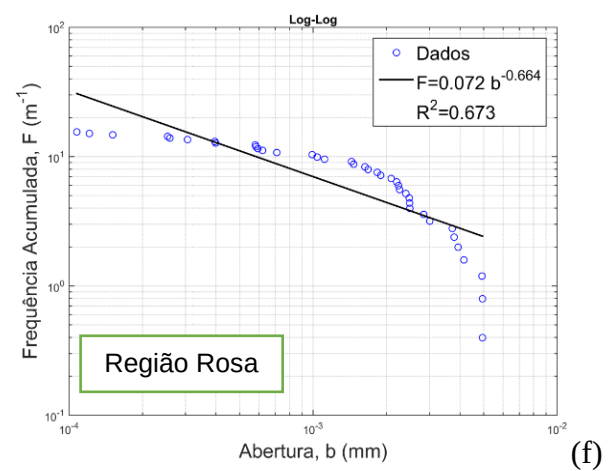
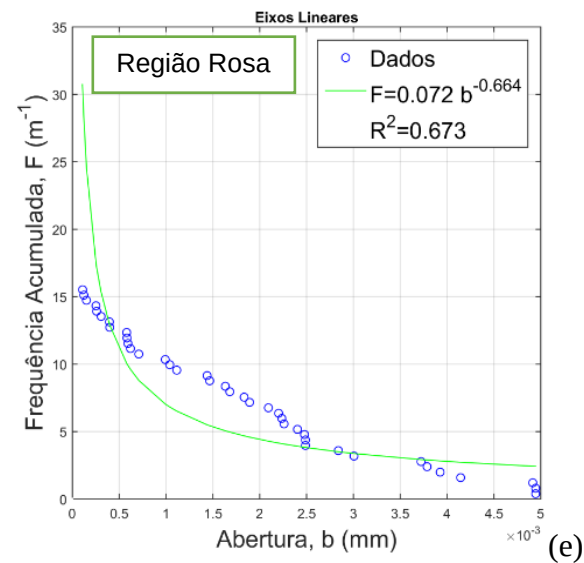
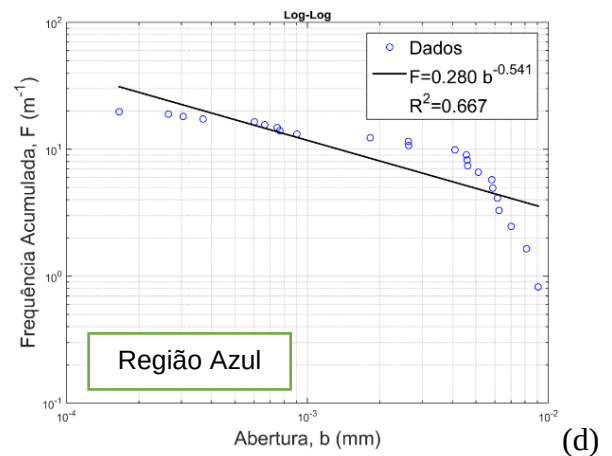
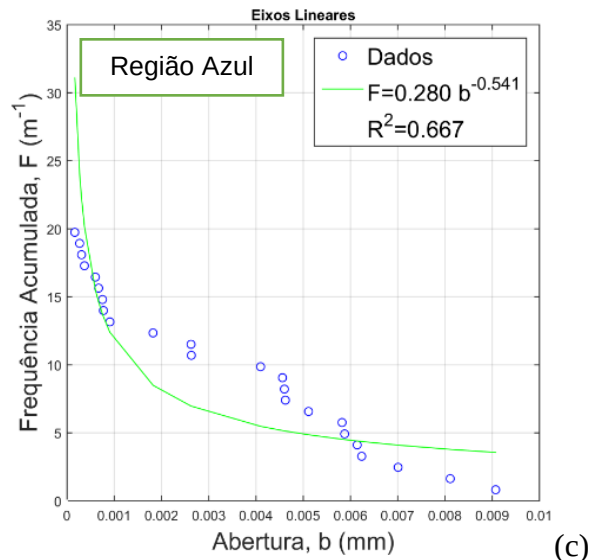
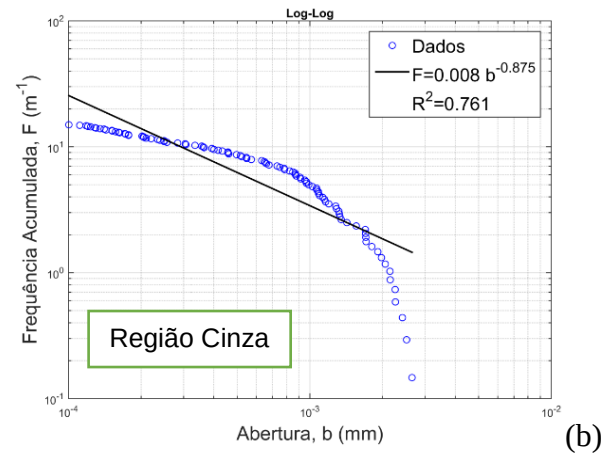
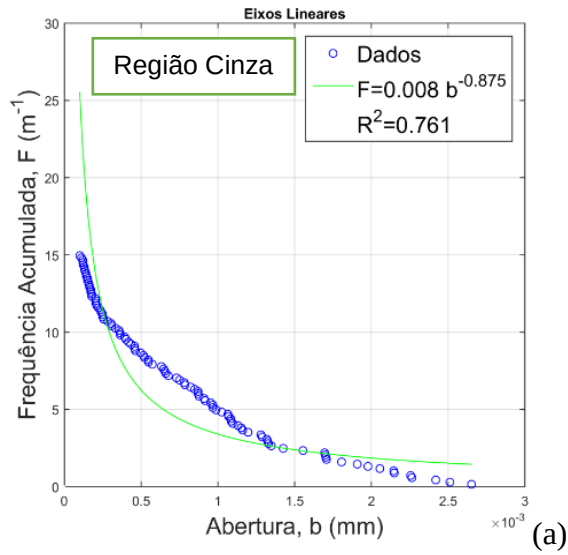
Fonte: A Autora, 2019.

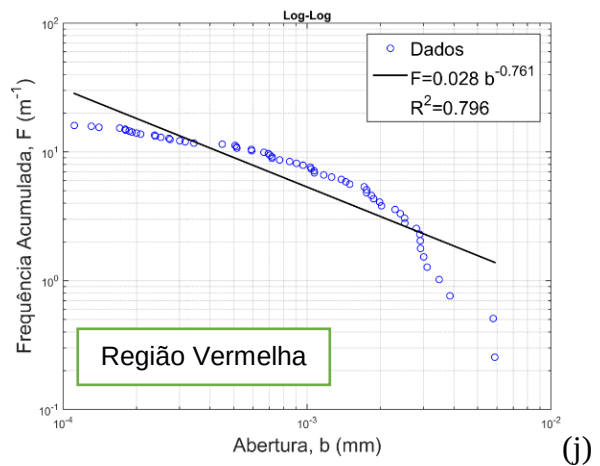
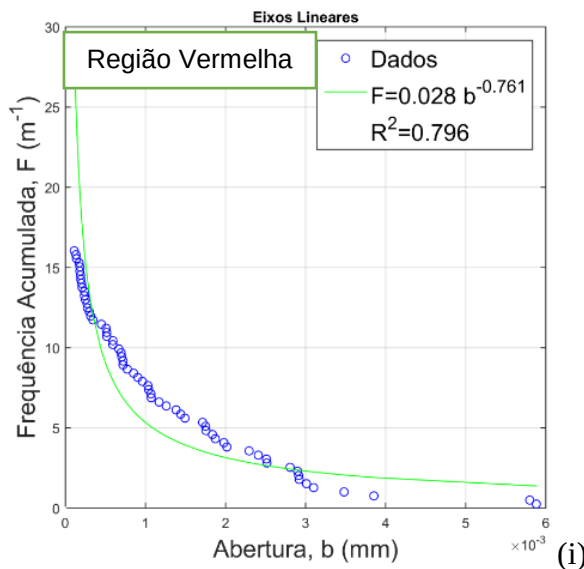
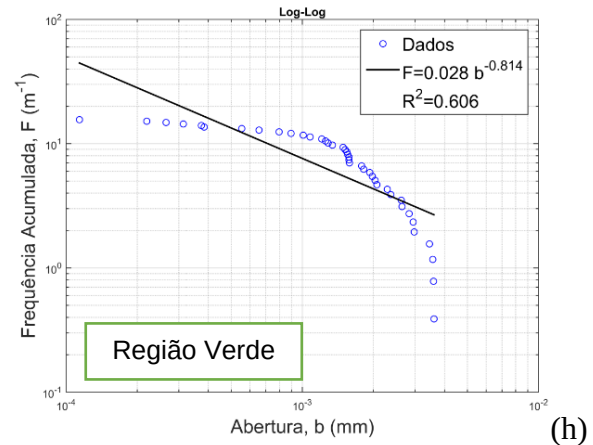
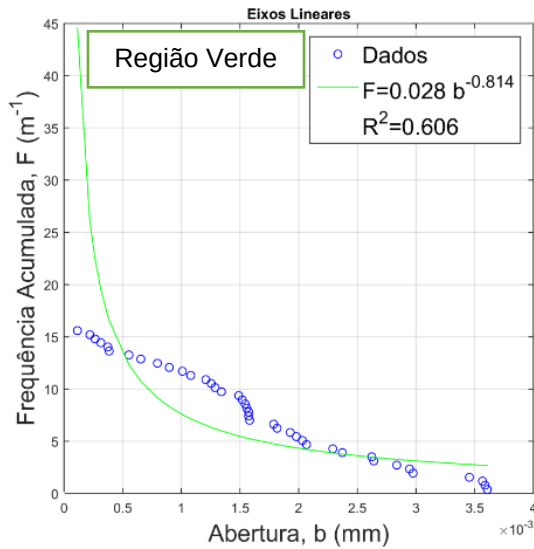
(a) Localização das *scanlines*; (b);(d);(f);(h);(j) Frequência acumulada em escala linear; (c);(e);(g);(i);(k)

Frequência Acumulada em escala Log-Log.

A partir desses resultados, com o objetivo de melhorar a análise, utilizando-se da metodologia imposta por (Priest, 1995 e Ortega *et al.*, 2006) que consiste em retirar artefatos, ou seja, região de *truncation*, então o novo intervalo que será considerado para abertura de fraturas será de 10^{-4} a $10^{-2}mm$ (em escala Log-Log) , então a Figura 74 mostra os resultados obtidos para frequência acumulada em escala linear e em escala Log-Log a partir do cálculo de uma nova regressão com os dados remanescentes.

Figura 74 - Dados de Scanlines sem artefatos.





Fonte: A Autora, 2019.

(a);(c);(e);(g);(i) Frequência acumulada em escala linear; (b);(d);(f);(h);(j) Frequência Acumulada em escala Log-Log.

Ao obter numericamente os padrões das fraturas que ocorrem neste perfil simplificado da Fm. Crato, acrescentando ao estudo de estratigrafia mecânica realizada pela equipe de geologia no Projeto Crato UFPE/Petrobras, foram obtidas informações sobre a influência das heterogeneidades dos laminitos da Fm. Crato (concreções, laminação, variação faciológica) através da caracterização geomecânica *in situ* empregando aquisições de elasticidade efetiva relacionada com a intensidade de fraturamento.

Foi observada a ocorrência de fraturas confinadas em camadas do próprio laminito cuja variação de rigidez foi observada em função da rugosidade observada na parede da subcamada. A Figura 75 é um exemplo deste tipo de observação, numa escala de centímetros,

no laminito da Fm. Crato. Observa-se a geração e confinamento de fraturas em algumas camadas em virtude da variação vertical de propriedades geomecânicas.

Figura 75 - Perfil de aquisição de dados para estudo de estratigrafia mecânica de laminitos da Fm. Crato, localização de fraturas extensionais ao longo do perfil com destaque para fraturas confinadas nas camadas 1 e 2.

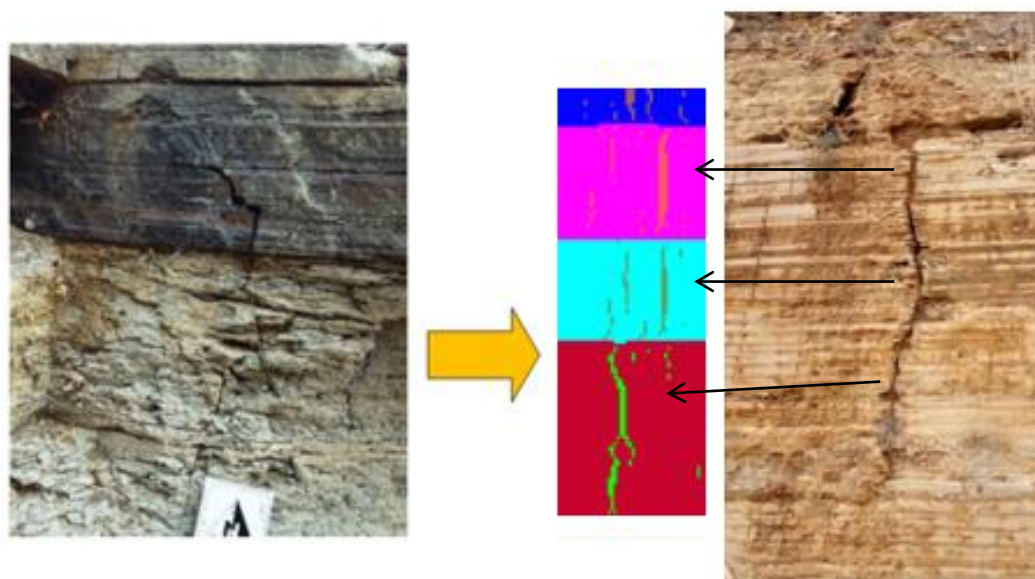


Fonte: Relatório Projeto Crato/UFPE/Petrobras, 2017.

Levando em comparação na escala da estratigrafia mecânica utilizada para construir o modelo, para o topo do nível C6 ao longo do perfil litológico PC-0, observa-se na Figura 76 a delimitação, confinamento, de fraturas existentes entre dois intervalos litológicos.

Percebe-se o truncamento da fratura da camada inferior e uma bifurcação desta e interrupção na camada superior. Este mesmo tipo de padrão foi observado nas análises numéricas apresentadas.

Figura 76 - Propagação de fraturas entre diferentes intervalos mecânicos.



Fonte: Adaptado de Relatório Projeto Crato/UFPE/Petrobras, 2017

O fenômeno de propagação de fraturas entre as camadas de diferentes propriedades mecânicas foi observado, portanto foi inserido na simulação heterogeneidades, através da técnica de descontinuidades fortes incorporadas. Este resultado será tratado e discutido no subitem que segue.

5.3.2 Rocha com Elementos Incorporados

Nesta etapa as propriedades geomecânicas dos materiais foram preservadas (Ver Tabela 3). Porém foi inserida uma heterogeneidade cortando as feições numa posição inclinada com relação ao eixo normal. Utilizou-se a técnica de descontinuidades fortes incorporadas, com a pretensão de simular tal heterogeneidade. Ao todo foram dois novos materiais inseridos, a Tabela 4 mostra as propriedades mecânicas da descontinuidade incorporada.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas da descontinuidade incorporada.

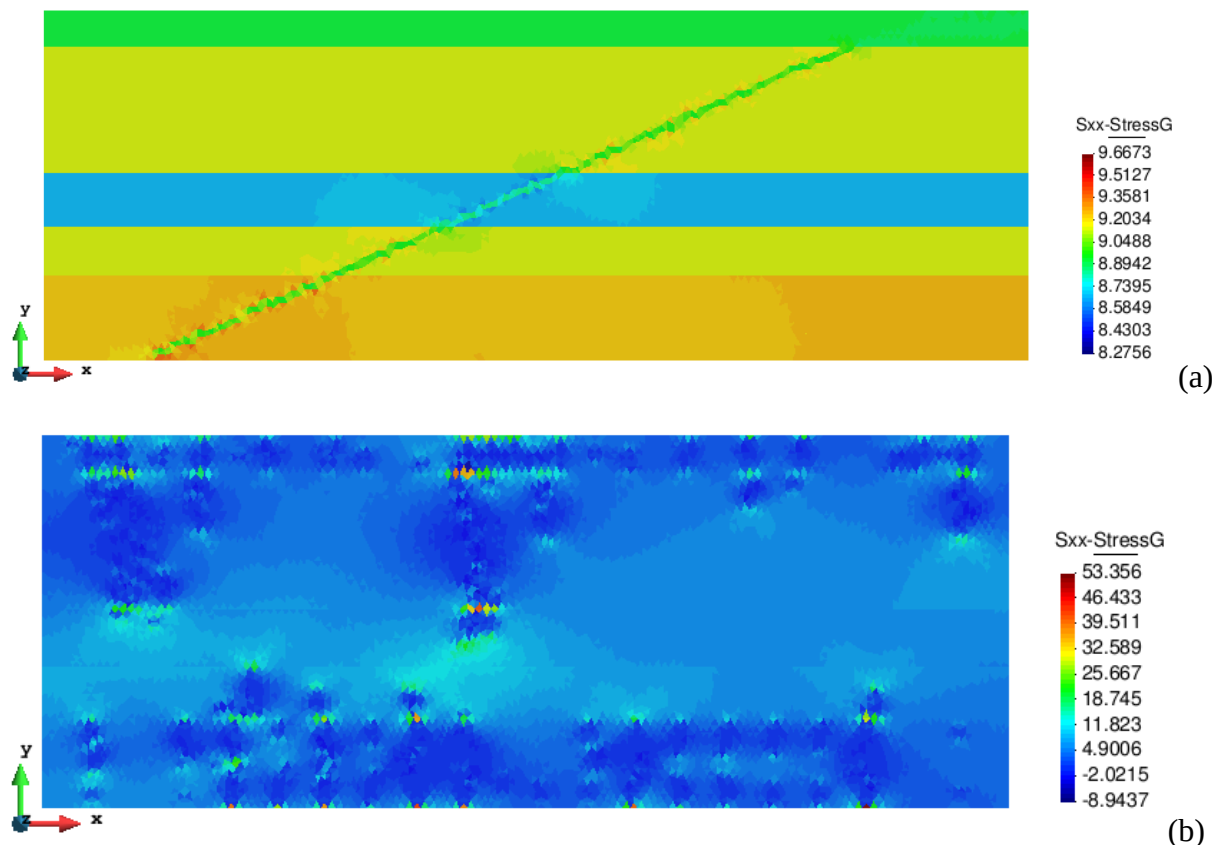
Materiais	Módulo de Elasticidade (E)GPa	Poisson (ν)	Energia de Fratura $G_f N/m$	Resistência a Tração (δ_y)Mpa
21 (Interface)	25500,00	0,247	100,00	9,00
22 (Contínuo)	25500,00	0,247	-----	Elástico

Fonte: A Autora, 2019.

Analisando o estudo da distribuição das tensões horizontais (antes e depois) da ruptura, ou seja, uma vez que as tensões atingem o valor de resistência à tração da rocha, geraram-se fraturas e um alívio de tensões na camada.

A concentração de tensão nas pontas (*tips*) das fraturas é observada, mostrando sua interação com a camada capeadora e pode-se visualizar concentração de tensões próxima a descontinuidade incorporada. A Figura 77 mostra o efeito.

Figura 77 - Distribuição das tensões horizontais.



Fonte: A Autora, 2019.

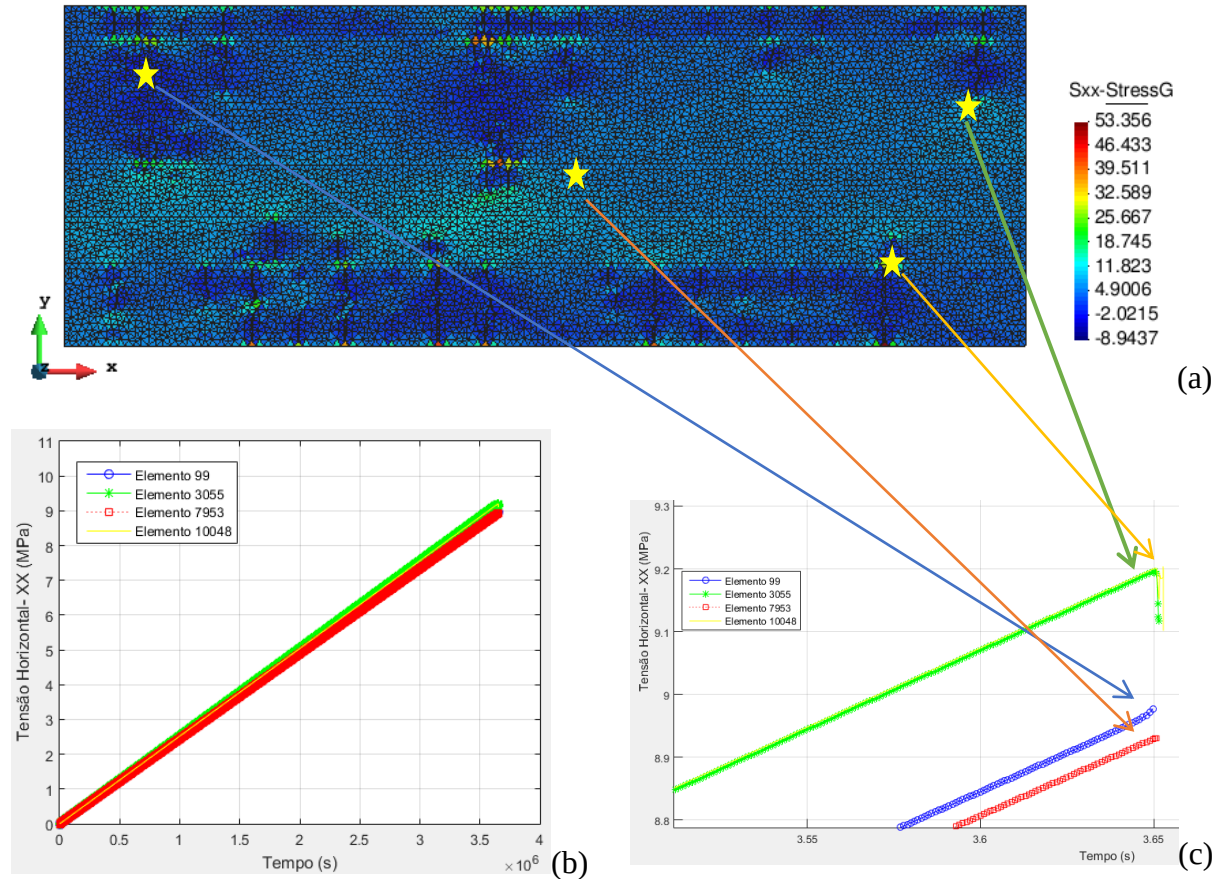
(a) Instante antes da geração de fraturas; (b) Imediatamente depois da geração de fraturas.

Dado o estado de tensões alcançado, o material sofre dano em várias regiões e assim a variável de dano atinge a unidade e o elemento de interface tem sua rigidez degenerada e a variável de abertura de fratura aumentada, o que configura um salto no campo de deslocamento e formação de fraturas.

A Figura 78 expressa graficamente a evolução da curva de variação de tensão horizontal com o tempo para todos os pontos adjacentes a fraturas em diferentes regiões das feições. Verifica-se que a tensão para a qual ocorre a total ruptura varia em um intervalo de

8.96 a 9.21MPa, o que está de acordo com a resistência a tração imposta nas condições do material de interface da simulação.

Figura 78 - Evolução da curva de tensões horizontais.



Fonte: A Autora, 2019.

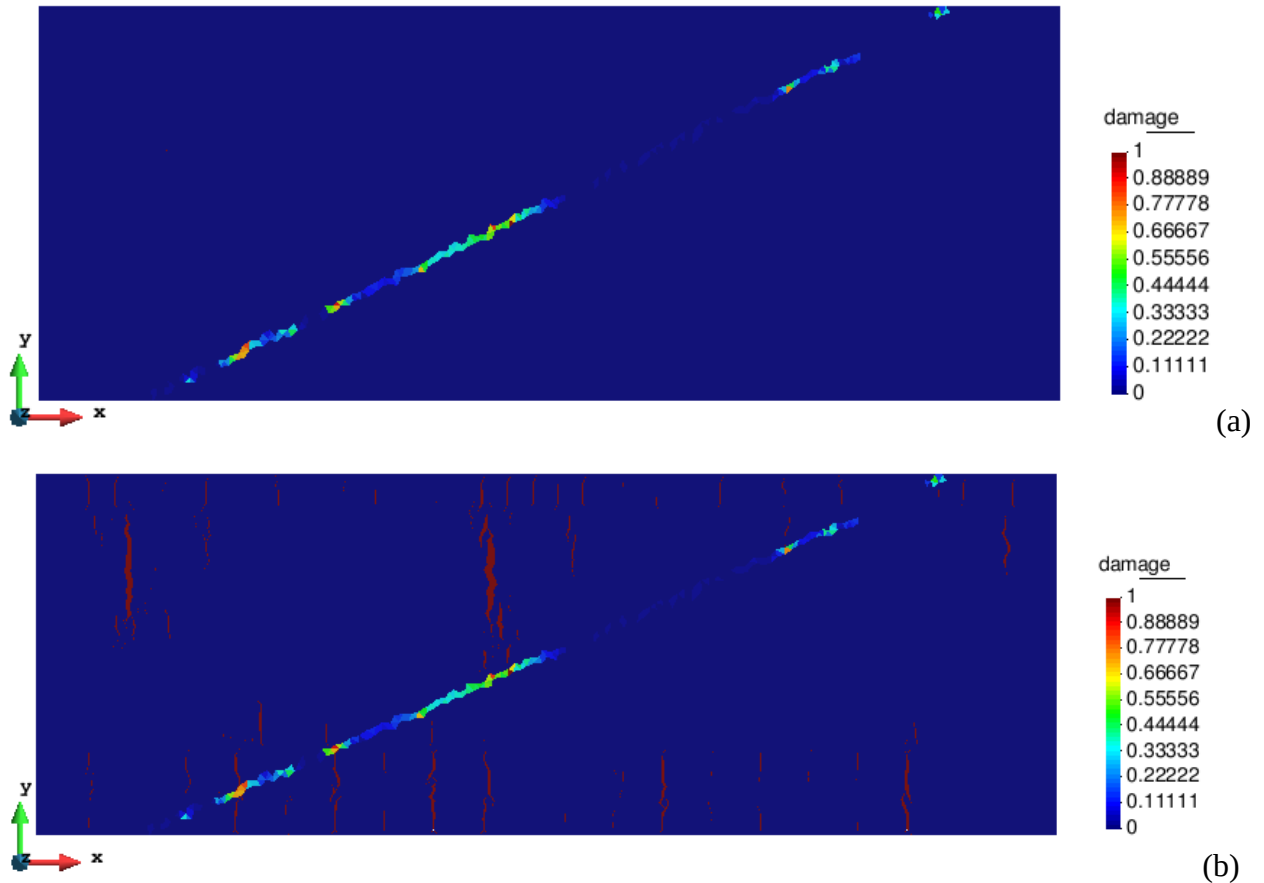
(a) Localização dos elementos; (b) Gráfico da evolução de tensões horizontais com relação ao tempo; (c) Zoom do gráfico de evolução de tensões horizontais

Tendo imposto estes resultados da evolução das tensões, realizar-se-á o estudo da variável de dano e concomitantemente de abertura de fraturas. As Figuras 79(a) mostra a variável de dano assumindo valor unitário e destaca a descontinuidade incorporada, pode-se visualizar a reativação desta fratura em algumas regiões do meio rochoso.

E a Figura 79(b) mostra a variável de dano, mas como esta variável ocorre apenas no material de interface, cuja espessura é de 1% de espessura comparada às dimensões do domínio contínuo, foi aplicado um fator de ampliação igual a 100 (escala) na deformada da malha de elementos finitos, os elementos de interface podem ser visualizados na cor vermelha.

Desta forma fica possível visualizar as fraturas geradas e a propagação das mesmas, salientando que a configuração de fraturas geradas é um pouco diferente da configuração das fraturas geradas na simulação sem a heterogeneidade imposta.

Figura 79 - Variável de dano.

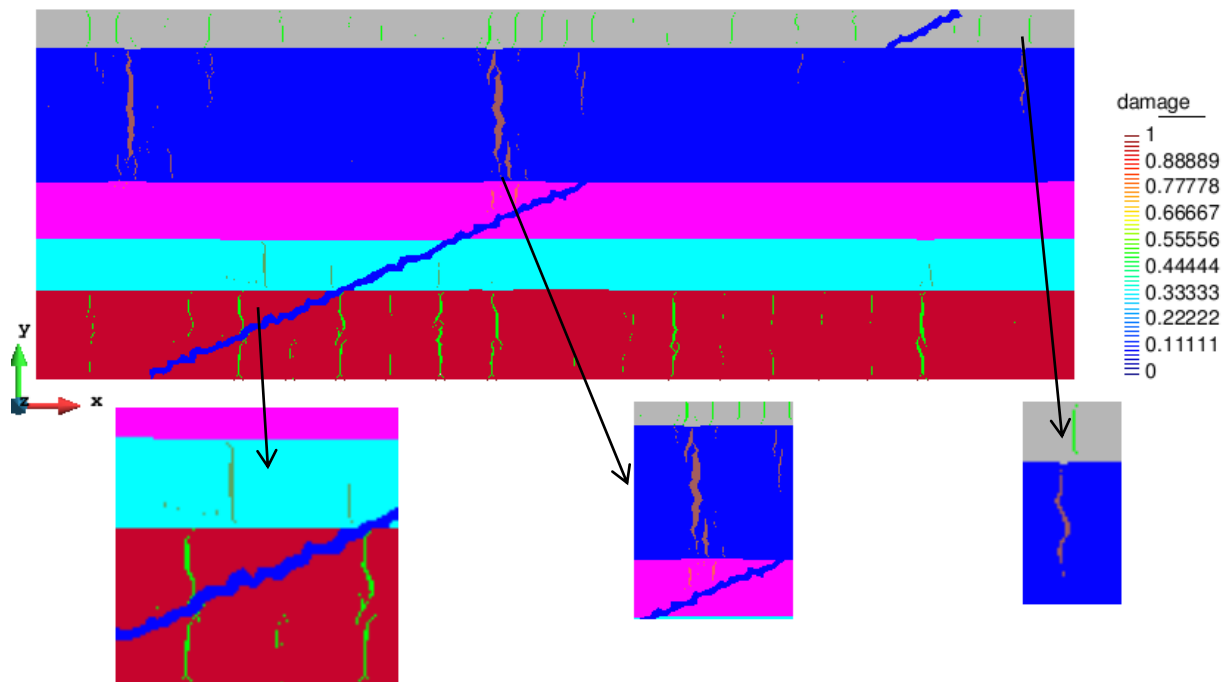


Fonte: A Autora, 2019.

(a) Variável de dano com a descontinuidade incorporada; (b) Variável de dano com fator de ampliação de 100 vezes.

A Figura 80 mostra em detalhes as fraturas geradas e as devidas propagações mais representativas, ou seja, de maior abertura, destacando a identificação das camadas estratigráficas. Observa-se que a propagação das fraturas ocorrem relativamente próximo a descontinuidade incorporada e nas camadas 2 e 5, ocorrendo propagação das fraturas para as camadas adjacentes 3 e 4 que ocorre o deslocamento relativo, ou seja, translação da linha da fratura, efeito de *en échelon*, que significa justamente este componente significativo de deslocamento direcional (Crider, 2001).

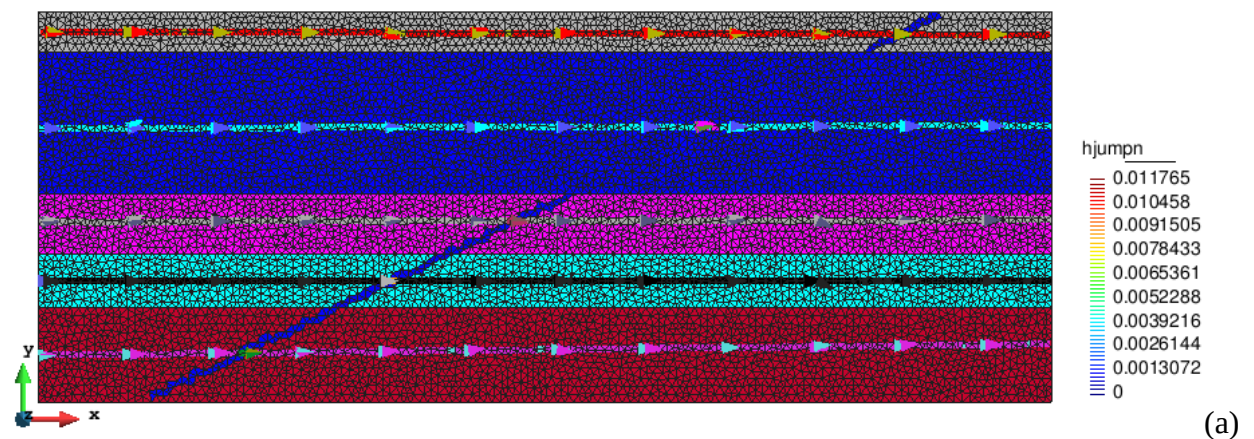
Figura 80 - Detalhe da amostra da região fraturada: Interação das fraturas entre as diferentes camadas e o destaque do efeito *en échelon* ocorrido nas propagações das fraturas.

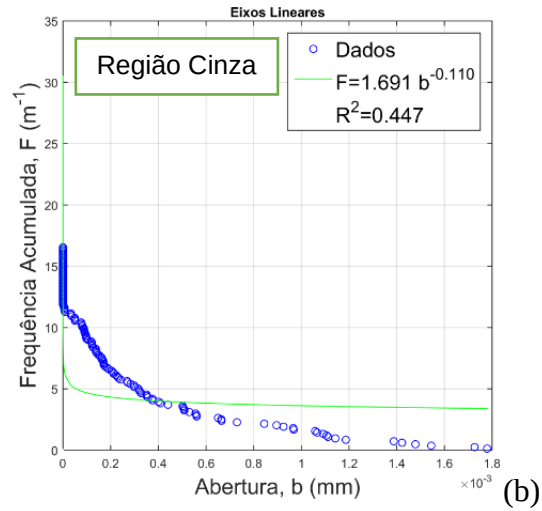


Fonte: A Autora, 2019.

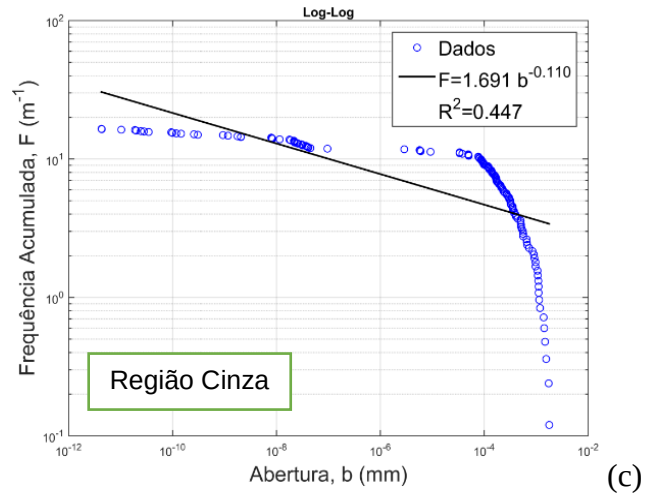
Tendo em vista estes resultados, foi realizado o estudo das *scanlines* como na análise anterior, com o objetivo de verificar o padrão de fraturamento, já que nesta análise o meio possui uma descontinuidade forte incorporada. A Figura 81 foram traçadas ao longo da extensão das feições, no total foram cinco *scanlines*, uma para cada camada estratigráfica.

Figura 81 - *Scanlines* distribuídas ao longo das feições.

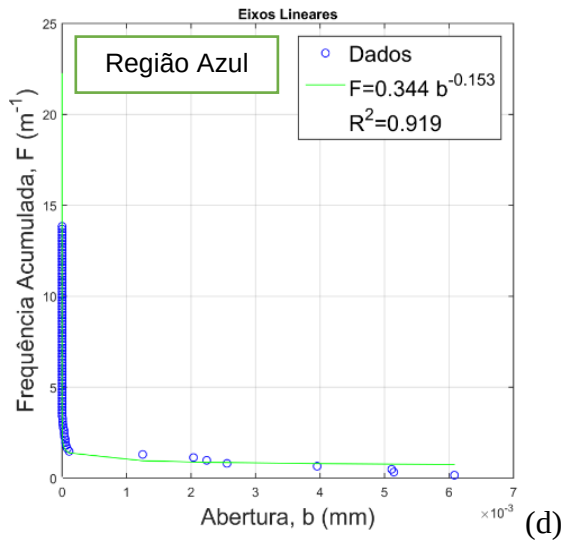




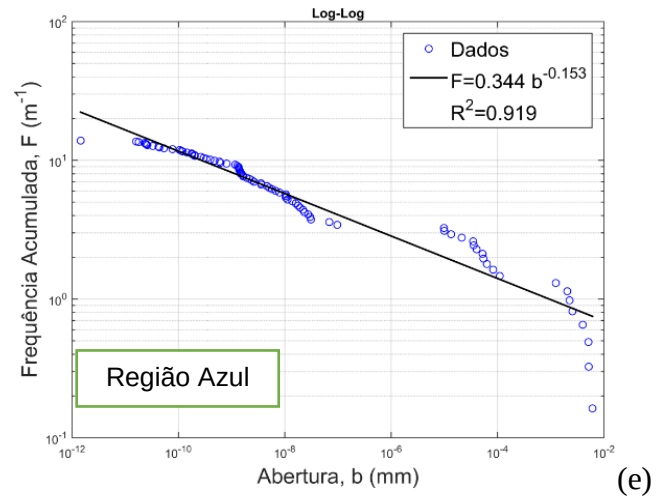
(b)



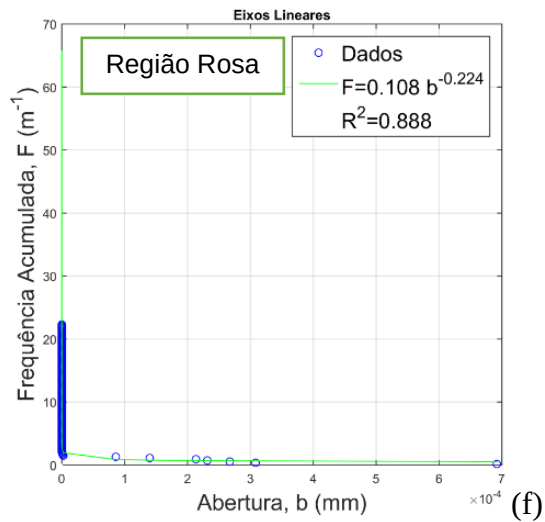
(c)



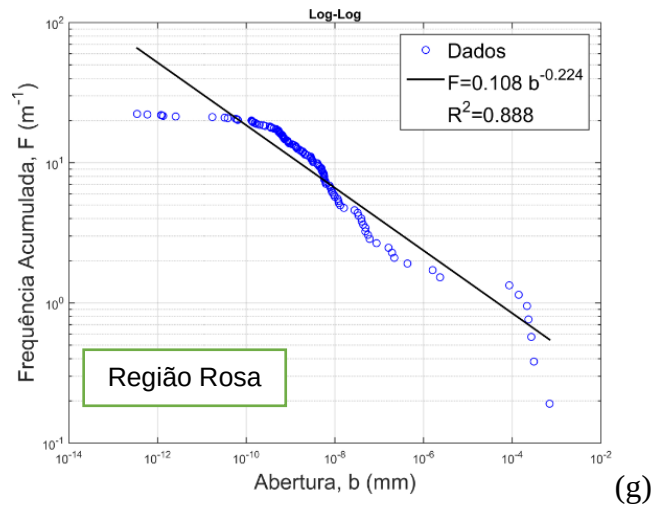
(d)



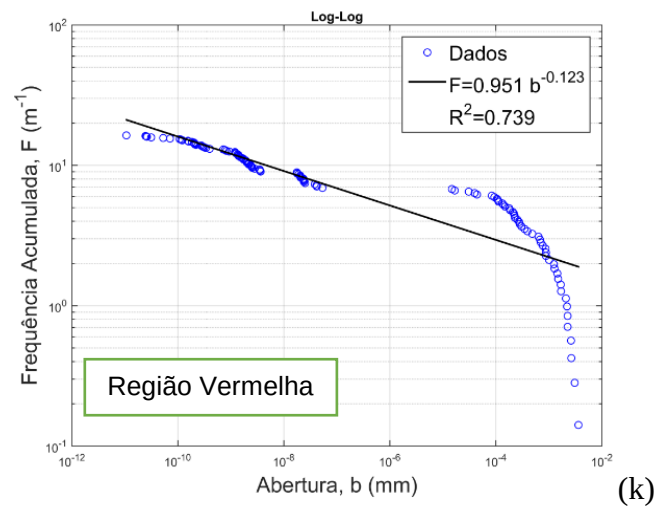
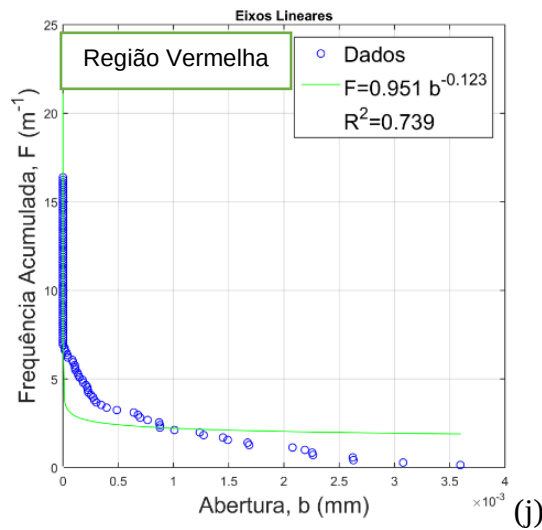
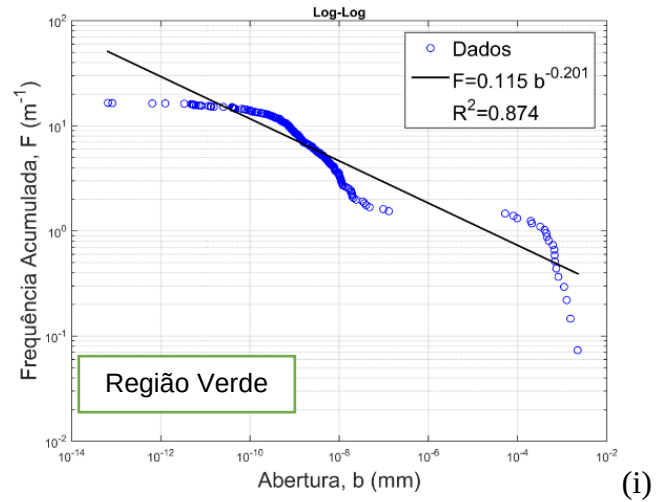
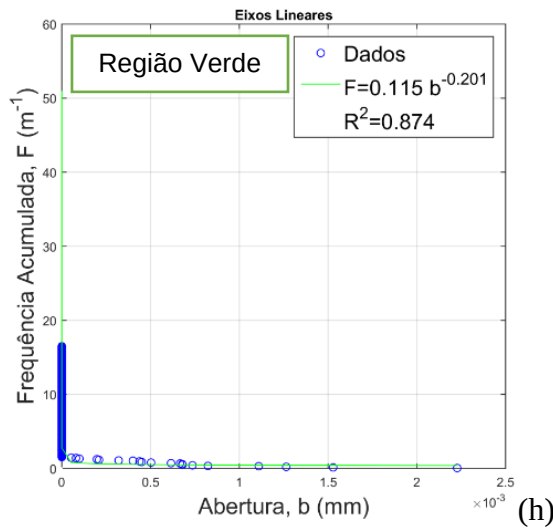
(e)



(f)



(g)



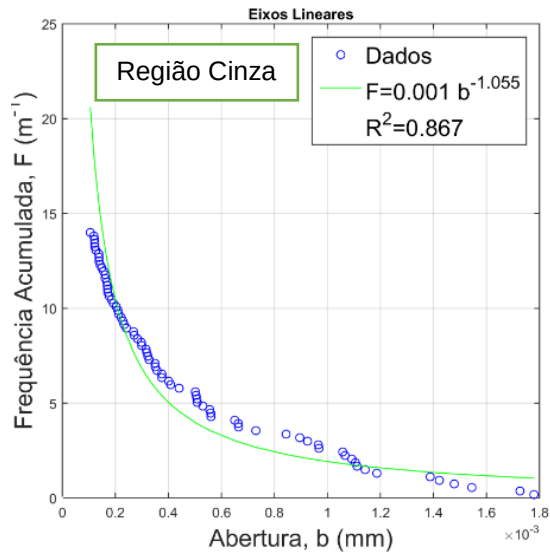
Fonte: A Autora, 2019.

(a) Localização das *scanlines*; (b);(d);(f);(h);(j) Frequência acumulada em escala linear; (c);(e);(g);(i);(k) Frequência Acumulada em escala Log-Log.

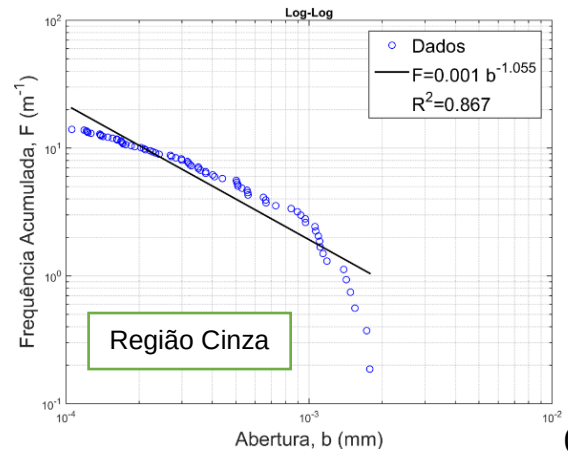
Nesta análise o intervalo de abertura de fraturas está entre 10^{-12} a $10^{-2} mm$, novamente utilizou-se da metodologia imposta por (Priest, 1995 e Ortega *et al.*, 2006) obtendo assim, um novo intervalo a considerar está entre 10^{-4} a $10^{-2} mm$, ambos intervalos estão em escala Log-Log.

A Figura 82 apresenta os resultados obtidos para frequência acumulada em escala linear e em escala Log-Log com relação a nova regressão dos dados remanescentes.

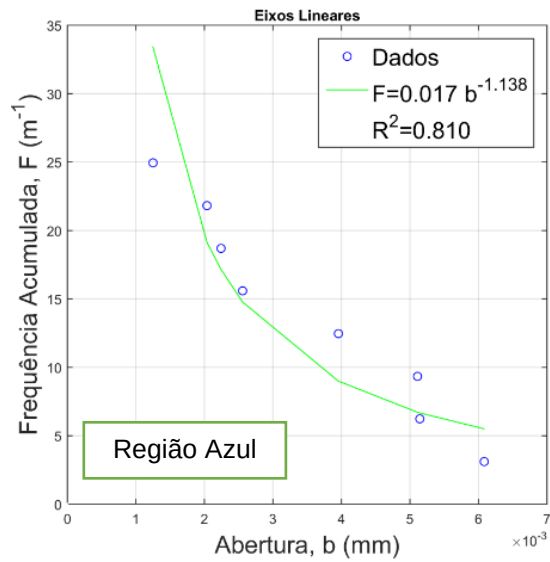
Figura 82 - Dados de Scanlines sem artefatos.



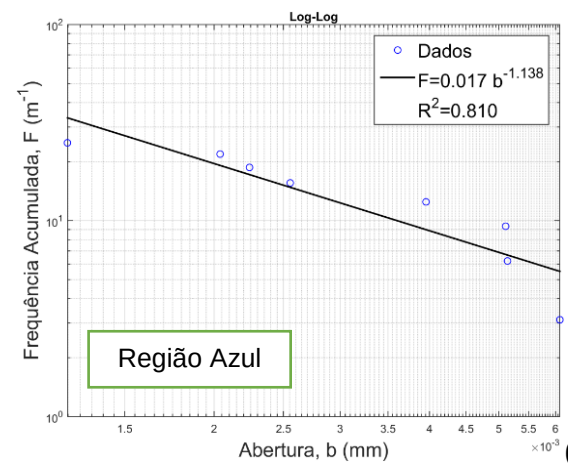
(a)



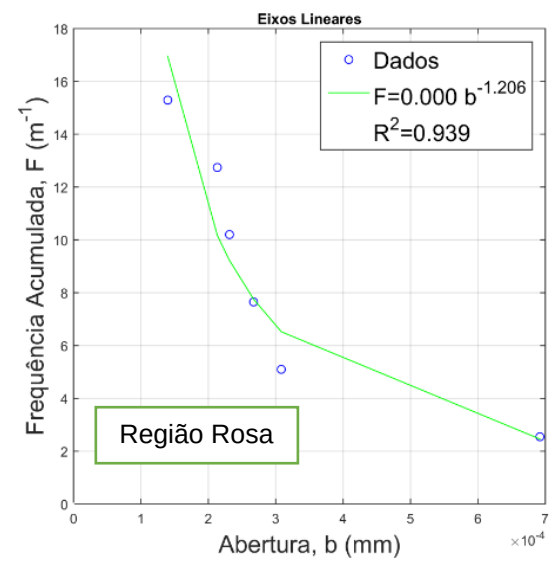
(b)



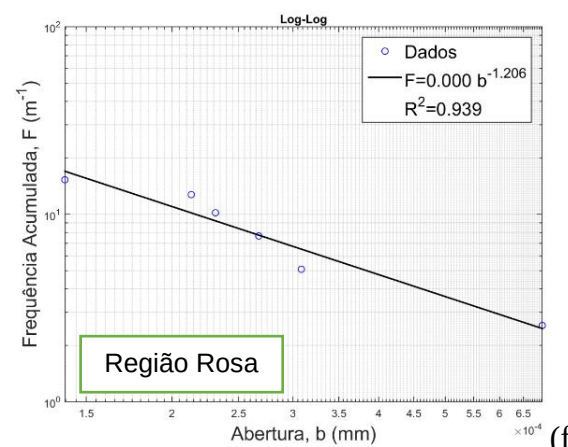
(c)



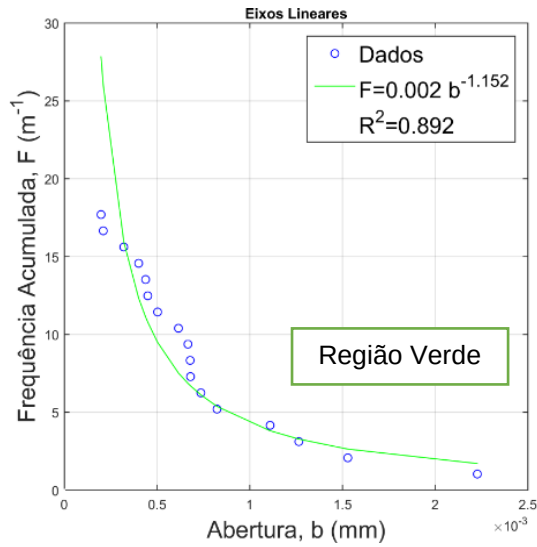
(d)



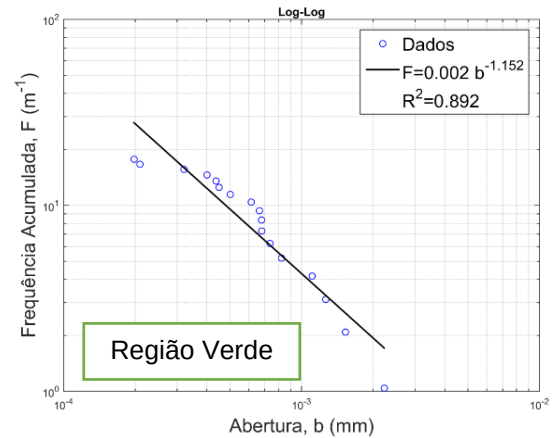
(e)



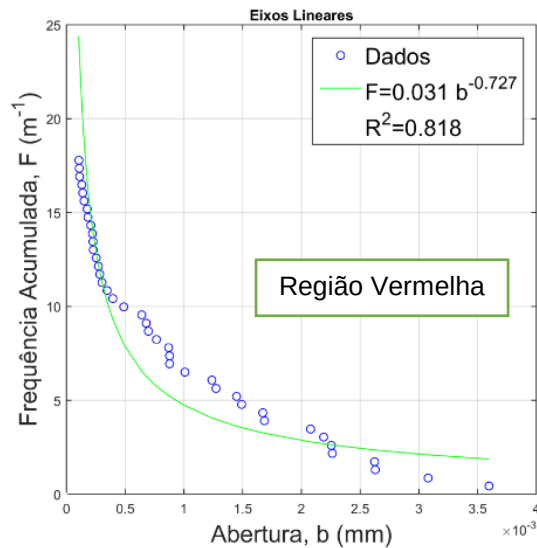
(f)



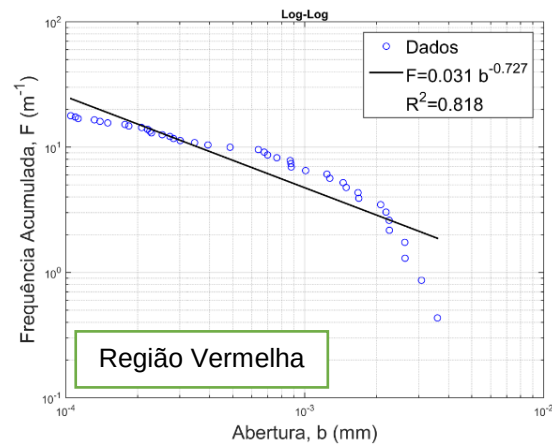
(g)



(h)



(i)



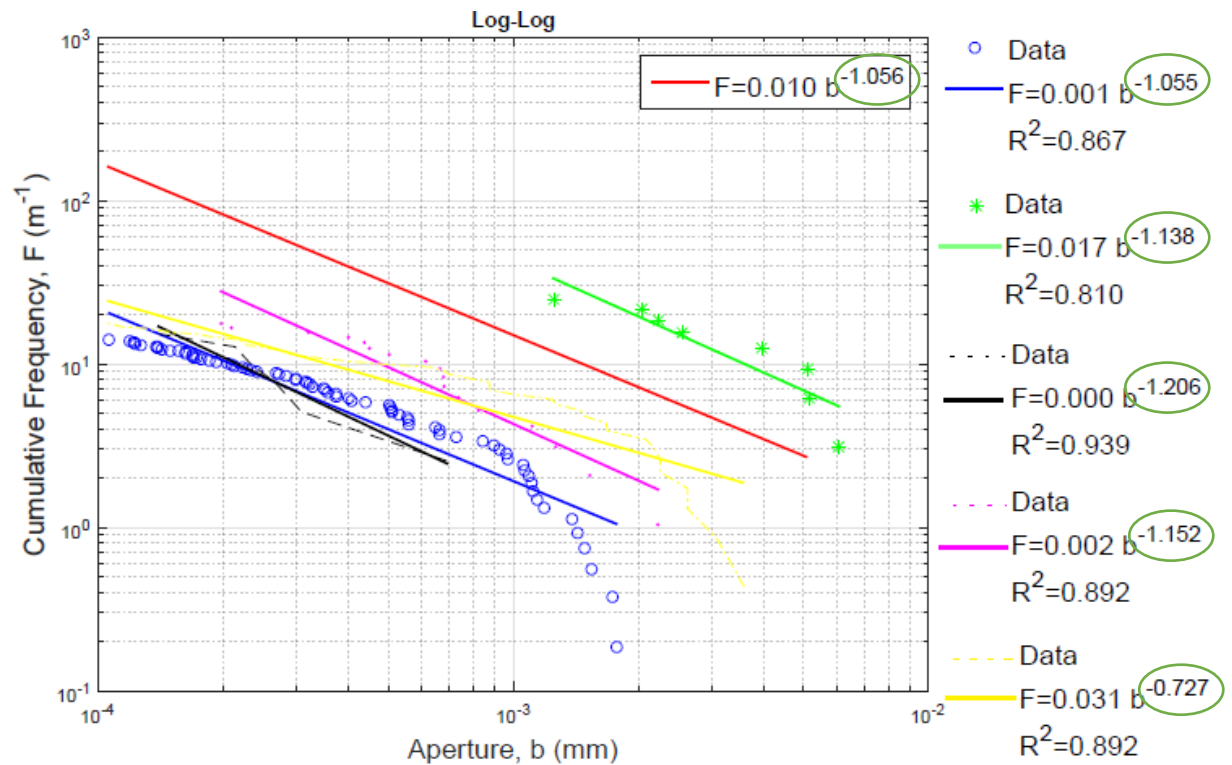
(j)

Fonte: A Autora, 2019.

(a) Localização das *scanlines*; (b);(d);(f);(h);(j) Frequência acumulada em escala linear; (c);(e);(g);(i);(k) Frequência Acumulada em escala Log-Log.

A partir da obtenção numérica da distribuição das fraturas em cada camada estratigráfica, foi realizado um estudo de comparação das *scanlines* obtendo a frequência acumulada em escala Log-Log com relação à média das *scanlines*, a Figura 83 mostra os resultados obtidos.

Figura 83 - Comparação das *Scanlines* sem artefatos e a frequência acumulada mediana.



Fonte: A Autora, 2019.

Comparando este resultado com os dados obtidos em campo (Ver Figura 51) na seção 5.2.2 verifica-se que a variável de CV_K sendo esta variável um coeficiente de variação da lei de potência, quando a camada estratigráfica possui quantidades de fraturas suficientemente considerável (camada 5) este parâmetro fica próximo ao obtido em campo, o que pode-se considerar um bom resultado, mostrando que a simulação valida o que foi observado em campo.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste tópico serão apresentadas as conclusões das análises obtidas nas simulações. E posteriormente serão sugeridos trabalhos futuros que posam a ser desenvolvidos a partir desta tese.

6.1 CONCLUSÕES

As técnicas de elementos especiais de interface de alta razão de aspecto, técnica de fragmentação, e descontinuidades fortes incorporadas, ambas baseadas na formulação de descontinuidade fortes apresentou uma ferramenta interessante na modelagem de geração e propagação de fraturas, ou seja, é uma das várias alternativas no âmbito de elementos discretos, métodos de ponto material e etc.

Outra análise importante é a combinação das técnicas de elementos finitos, esta metodologia foi adequada para a avaliação da influência em descontinuidades sobre a formação de geração e propagação de novas fraturas quando comparadas as análises que apresentam heterogeneidades mecânicas no meio, esta influência se destaca na distribuição de tensões no processo extensional, consideradas neste trabalho.

A integração de uma caracterização geomecânica de afloramentos análogos bem como os ensaios de laboratórios para estas rochas (Fm. Crato) se mostram essenciais para a análise numérica mais realista, onde nas análises dos ensaios de compressão diametral foi possível verificar similaridade tanto qualitativa como quantitativa com relação à simulação numérica. E serve como base para o entendimento de geólogos na caracterização das fraturas.

As amostras da Fm. Crato apresentam laminações, e na simulação este efeito laminado foi capturado através da técnica de descontinuidades fortes incorporadas. Um ponto importante na simulação foi verificar a ruptura do material inicialmente na zona nucleada (o que é característico do ensaio de compressão diametral) e logo em seguida surgem fraturas no sentido perpendicular ao plano de carregamento, e tanto a simulação como as análises realizadas em laboratório conseguiu capturar este efeito, o que é uma similaridade característica da Fm. Crato.

Uma vez observada a aplicabilidade das rochas características da Fm. Crato e obtidas às informações de propriedades do material, simulou-se um problema que consiste na aplicação de uma tensão de tração, simulando os esforços extensionais laterais, percebeu-se que as fraturas geradas a partir desta simulação são compatíveis com as encontradas na Fm.

Crato, então para quantificar as fraturas estudou-se a abertura e espaçamento das fraturas inseriu-se *scanlines*. Tais dados foram estudados e comparados com *scanlines* de campo e os resultados do coeficiente de variação das *scanlines* de campo e das *scanlines* da simulação ficaram próximos. Isso significa dizer que a distribuição das fraturas geradas na simulação corresponde com a distribuição das fraturas existentes na Fm. Crato.

Foram observados diferentes valores de aberturas, porém a predominância de fraturamento é milimétrica, destaca-se também a importância no tratamento dos dados (*truncation* e *censoring*) para análise de refinamento, tal como na caracterização do meio fraturado em campo. Este tipo de análise permitiu estimar as tensões de ruptura da rocha (variações das tensões) o que é uma importante informação nos estudos geológicos da Bacia, dada à competência mecânica da rocha ou elevada rigidez conclui-se que a deformação do meio se dá principalmente pela abertura das fraturas o que se pode levar (*stress*) deformação, o que é também uma importante informação para a Geologia Estrutural.

Outra percepção na característica de geração e propagação das fraturas foi quando inseriu descontinuidades em direções diferentes ao plano de fraturamento, tanto as aberturas de fraturas e densidade de fraturas foram menores comparados com as fraturas geradas apenas com a técnica de fragmentação de malha. Então ao considerar essas heterogeneidades (fraturas pré-existent) a configuração de fraturas diverge das observadas em campo, pode-se perceber isso através da técnica de *scanlines*.

Em uma última análise foi estudado uma simulação que considera uma variação de feições e de profundidade onde a resposta numérica se mostrou compatível com a de afloramento, onde feições mecânicas apresentam uma densidade maior de fraturas no regime frágil/dúctil deformação antes da ruptura, isso leva a um processo de geração de fraturas e com propagação em que algumas fraturas são trucadas pelas feições e com deslocamento entre uma feição e outra (efeito *en échelon*).

6.2 RECOMENDAÇÕES

- Continuar esta temática, realizando simulações de cenários com concreções, vugs e feições carsticas;
- Incorporar outros modelos constitutivos, exemplo: Mohr-Coulomb e Drucker-Prager (plasticidade), para capturar a geração de fraturas por cisalhamento;
- Realizar modelagem multi-físico: Acoplamento aos problemas hidráulico e químico;
- Realizar simulações e análises em 3D.

REFERENCIAS

- ABNT. **NBR 7222**. Concreto e Argamassa- Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 05/2011.
- ADACHI, J, SIEBRITS, E, PEIRCE, A, & DESROCHES, J. 2007 – Computer simulation of hydraulic fractures. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 44(5), p.739-757.
- Agar, S.M., S.Geiger, S.Matthäi, R.Alway, S.Tomas, A. Immenhauser, R. Shekar, et al., 2010, The impact of hierarchical fracture networks on flow partitioning in carbonate reservoirs: Examples based on a Jurassic carbonate ramp analog from the High Atlas, Morocco: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, September 19–22, 2010, **SPE Paper** 135135, 19 p.
- Alencar, Márcio L. **Caracterização dos estilólitos verticais do nível superior dos calcários laminados da formação Crato, borda norte da Bacia do Araripe**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- ARMSTRONG, P., IRESOON, D., CHMELA, B. ET AL. 1994. The promise of elastic anisotropy. *Oilfield Review*, Oct. 36–47.
- ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics fundamentals and applications**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.
- ASSINE, M. L., 2007, Bacia do Araripe: Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15, p. 371–389.
- BARTON, C.A., Zoback, M.D., 1992. Self-similar distribution and properties of macroscopic fractures at depth in crystalline rock in the Cajon Pass Scientific Drill Hole. *Journal of Geophysical Research* 97, 5181e5200.
- BEN-ZION, Y., Sammis, C.G., 2003. **Characterization of fault zones**. *Pure Appl. Geophys.* 160, 677–715.
- BESERRA, L. de S., **Análise Hidromecânica do Fraturamento Hidráulico via Elementos Finitos com Descontinuidades Fortes Incorporadas**. Tese de Doutorado, UFPE, Recife, 2015.
- BIOT, M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 28, n. 2, p. 168-191, 1956.
- BONNET, E., Bour, O., Odling, N., Davy, P., Main, I., Cowie, P. A., Berkowitz, B., “Scaling of Fracture Systems in Geological Media,” *Reviews of Geophysics* 39, 3, 347–383, 2001.
- CACAS, M. C., DANIEL, J. C. & LETOUZEY, J. 2001. Nested geological modelling of naturally fractured reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 7, S43–S52.

CAINE, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology* 24 (11), 1025–1028.

CATTO, B., Jahnert, R. J., Warren, L. V., Varejão, F. G., Assine, M. L.. 2016. **The Microbial Nature of Laminated Limestones: Lessons from the Upper Aptian, Araripe Basin, Brazil.** *Sedimentary Geology* 341: 304-315. Doi: 10.1016/j.sedgeo.2016.05.007.

CHILDS, C., J. J. Walsh, and J. Watterson, A method for estimation of the density of fault displacements below the limits of seismic resolution in reservoir formations, in *North Sea Oil and Gas Reservoirs, II*, edited by A. T. Buller et al., pp. 309-318, Norw. Inst. of Technol., Graham and Trotman, London, 1990.

CLETO, P. R. **Simulação de fraturamento hidráulico usando elementos finitos de elevada razão de aspecto com acoplamento hidromecânico.** Bauru: UNESP, 2016.

CORREIA, G., Claudio, A., Nascentes, I. BOLETIM DE ENSAIO MECÂNICO: Brasileiro - Petróleo Brasileiro S.A. CENPES / PDP / TEP - Laboratório de Mecânica de Rochas. 2015.

COWIE, P.A., Sornette, D., Vanneste, C., 1995. **Multifractal scaling properties of a growing fault population.** *Geophys. J. Int.* 122, 457–469. doi:10.1111/j.1365-246X.1995.tb07007.x (2%R).

CRAMPIN, S. 1981. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. *Wave Motion*, 3, 343–391.

CRIDER J.G. 2001. **Oblique slip and the geometry of normal-fault linkage: mechanics and a case study from the Basin and Range in Oregon.** *Journal of Structural Geology*, 23:1997-2009.

CRIDER, J.G., Peacock, D.C.P., 2004. **Initiation of brittle faults in the upper crust: a review of field observations.** *J. Struct. Geol.* 26 (4), 691–707.

DERSHOWITZ, W. S., Herda, H. H.. Interpretation of Fracture Spacing and Intensity. *Proc. 32nd US Rock Mech. Symp.*, Santa Fe, NM, 757-766, 1992.

E. HOEK, and Martin, C. D., **Fracture initiation and propagation in intact rock - A review**, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6 (2014) 287e 300.

ETMINAN, A.H., Seifi, A. **An Improved Model for Geostatistical Simulation of Fracture Parameters.** *The Open Petroleum Engineering Journal*, 2008, 1, 47-57 47.

FOSSEN, H. 2012. *Geologia Estrutural. Oficina de Textos*, São Paulo, 575 p.

GEIGER S., and Matthäi, S. **What can we learn from high-resolution numerical simulations of single- and multi-phase fluid flow in fractured outcrop analogues.** Geological Society, London, Special Publications published online September 5, 2012.

GELHAR L. W. *Stochastic subsurface hydrology.* Englewood Cliffs. Prentice-Hall, 1993.

G. H. MÄKEL. The modelling of fractured reservoirs: Constraints and potential for fracture network geometry and hydraulics analysis. *Geological Society, London, Special Publications* 2007, v.292; p375-403.

GENT H. VAN; Abe Steffen; Urai Janos; Holland Marc. The formation of open fractures in cohesive materials results of scaled analogue and numerical modelling on fault zone porosity development. *E P J W e b o f C o n f e r e n c e s* 6, 22016 (2010). DOI:10.1051/epjconf/20100622016.

GILLESPIE, P.A., Howard, C.B. Walsh J.J., Watterson J. Measurement and characterization of spatial distributions of fractures. *Tectonophysics*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1993.

GROSSENBACHER, K., Karasaki, K., Bahat, D., 1997. Curved scanline theory. *Mathematical Geology* 29, 629-651.

GUERRIERO, V., S. Mazzoli, A. Iannace, S. Vitale, A. Carravetta, and C. Strauss, 2013, A permeability model for naturally fractured carbonate reservoirs: *Marine and Petroleum Geology*, v. 40, p. 115–134.

HALLGASS, R., Loreto, V., Mazzella, O., Paladin, G., Pietronero, L., 1997. **Earthquake statistics and fractal faults**. *Phys. Rev. E* 56 (2), 1346–1356.

HANCOCK, P. L. 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 7, 437–457.

HANDY, M.R., Hirth, G., Hovius, N., 2007. **Tectonic Faults — Agents of Change on a Dynamic Earth**. The MIT press, Cambridge, Mass. 504.

HOLLAND, M., Gent, H. V., Balzalgette, L., Yassir, N., Strating, E. H. H., Urai, J. L., **Evolution of dilatant fracture networks in a normal fault — Evidence from 4D model experiments**. *Earth and Planetary Science Letters* 304 (2011) 399–406.

HOLLAND, M., Urai, J.L., Martel, S., 2006. **The internal structure of fault zones in basaltic sequences**. *Earth Planet. Sci. Lett.* 248 (1–2), 301–315.

HUDSON, J. A. 1981. Wave speeds and attenuation of elastic waves in materials containing cracks. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 64, 133–150.

KAZERANI, T., **A discontinuum-based model to simulate compressive and tensile failure insedimentary rock**. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 5 (2013) 378–388.

KULANDER, B. R., DEAN, S. L. & WARD, B. J. 1990. Fractured Core Analysis: Interpretation, Logging and Use of Natural and Induced Fracture in Core. *American Association of Petroleum Geologists Methods in Exploration Series*, 8.

LEE H. P., Jon E. Olson, Richard A. Schultz. **Interaction analysis of propagating opening mode fractures with veins using the Discrete Element Method**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 103 (2018) 275–288.

LEE H. P., Jon E. Olson, Richard A. Schultz., **The interaction analysis of propagating opening mode fractures with veins using discrete element method.** ARMA American Rock Mechanics Association. Geomechanics Symposium held in Houston, Texas, USA, June 2016, 26-29.

LEMAITRE, J., Chaboche, J. L., **Mechanics of solid materials.** Cambridge University Press, 1985.

LISJAK A., Grasselli G. **A review of discrete modelling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses.** Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 6 (2014) 301-314.

LOPES, Tuane Vanessa; GARCIA, E. L. M.; MURAD, M. A.; PEREIRA, P. A.; ROCHA, A. C.; FALCÃO, F. O. L.; BEZERRA, F. H. R., **Modelagem Hierárquica de Análogos de Reservatórios Carbonáticos Fraturados Carstificados.** *Cilamce*. Florianópolis- SC, Brasil. 2017.

LOOSVELD, R. J. H. & FRANSSEN, R. C. M. W. 1992. Extensional vs. shear fractures: Implications for reservoir characterisation. Society of Petroleum Engineers Paper, 25017.

LYNN, H. 2004. The winds of change; anisotropic rocks – their preferred direction of fluid flow and their associated signatures – Part 1 & 2. The Leading Edge, Nov. & Dec, 2004, 1156–1162 & 1258–1268.

MACIEL, B. M. C. M. **Aplicação da técnica de fragmentação de malha com elementos finitos de alta razão de aspecto para a simulação de fraturamento hidráulico.** Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife, 2017.

MAEDO, M. A. **Simulação computacional por elementos finitos de múltiplas fissuras em sólidos usando técnica de fragmentação da malha.** Dissertação de mestrado: Mestrado em Engenharia Mecânica, UNESP, Bauru-SP, 2015.

MAHABADI O. K., B. E. Cottrell, Grasselli G., **An example of realistic modelling of rock dynamics problems: FEM/DEM simulation of dynamic Brazilian test on barre granite.** Rock Mech Rock 43 (2010) 707-716.

MANZOLI, O. L. *et al.* **On the use of finite elements with a high aspect ratio for modeling cracks in quasi-brittle materials.** Engineering Fracture Mechanics, v. 153, (2016) p. 151-170. ISSN 0013-7944. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379441500702x>>.

MANZOLI, O.L. ; Gamino, A.L. ; Rodrigues, E.A. ; Claro, G.K.S., **Modeling of interfaces in two-dimensional problems using solid finite elements with high aspect ratio.** Computers & Structures, v. 94-95, p. 70-82, 2012.

MANZOLI, O. L. **Contribuições à simulação numérica de descontinuidades fortes.** Tese de Livre Docência – Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, Bauru, 2008.

MARRETT, R., Ortega, O., Kelsey, C. 1999. Extent of power law scaling for natural fractures in rock. Geology, 27(9), 799-802.

MARRETT, R., Laubach, S.E., Olson, J.E. 2007. Anisotropy and beyond: **Geologic perspectives on geophysical prospecting for natural fractures**. The leading Edge, 26(9), 1106-1111.

MAULDON, M. Dunne, W.M., Rohrdaugh Jr., M.B., Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. Journal of structural Geology, 2001.

MAULDON, M., Mauldon, J.G., 1997. Fracture sampling on a cylinder: from scanlines to boreholes and tunnels. Rock Mechanics and Rock Engineering 30, 129-144.

MIRANDA, T. S., R. F. Santos, J. A. Barbosa, I. F. Gomes, M. L. Alencar, O. J. Correia, T. C. Falcão, J. F. W. Gale, and V. H. Neumann, 2018. **Quantifying Aperture, spacing and fracture intensity in a carbonate reservoir analogue: Crato Formation, NE Brazil**. Marine and Petroleum Geology, v. 97, November 2018. P. 556-567.

MERCADIER, C. G. & MAKEL, G. H. 1991. **Fracture patterns of Natih Formation outcrops and their implications for the reservoir modelling of the Natih field, North Oman**. Society of Petroleum Engineers Paper, 21377.

MIRANDA, T., S.. 2015. **Caracterização Geológica e Geomecânica dos Depósitos Carbonáticos e Evaporíticos da Bacia do Araripe, NE Brasil**. Tese de Doutorado. 259p.

MIRANDA, T. S.; Barbosa, J.A.; Gomes, I. F.; Neumann, V. H.; Santos, R. F. V. C.; Matos, G.; Guimaraes, L. J. N.; Florencio, R. Q.; Alencar, M. L. Aplicação da Técnica de Scanline a Modelagem Geológica/Geomecânica de Sistemas de Fraturamento nos Depósitos Carbonáticos e Evaporíticos da Bacia do Araripe, NE do Brasil.. Boletim de Geociências da PETROBRAS (Impresso), v. 20, p. 305-326, 2012.

NELSON, R. A. 2001. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. Gulf Professional Publishing, Boston.

NEUMANN, V. H. M. L. 1999. Estratigrafía, Sedimentología, Geoquímica y Diagénesis de los Sistemas Lacustres Aptienses-Albienses de la Cuenca de Araripe (Noreste de Brasil). Tese de Doutorado. Universidade de Barcelona. Barcelona. 244p.

NORDREN, R. P. **Propagation of a vertical hydraulic fracture**. SPE 7834, 12(8):306–14. 1972.

ODLING, N. E., GILLESPIE, P., BOURGINE, B. ET AL. 1999. Variations in fracture systems geometry and their implications for fluid flow in fractured reservoirs. Petroleum Geoscience, 5, 373–384.

OLIVELLA, S. et al. **Numerical formulation for a Simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media**. Engineering Computations, 13 (1996) 87-112.

OLIVER, J.; CERVERA, M.; MANZOLI, O. Strong discontinuities and continuum plasticity models: the strong discontinuity approach. **International journal of plasticity**, Elsevier, n. 3, p. 319–351, 1999.

OLIVER, J. Huespe, E. A. **Continuum approach to material failure in strong discontinuity settings**. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg 193 (2004) 3195-3220.

OLIVER, J. et al. **Two-dimensional modeling of material failure in reinforced concrete by means of a continuum strong discontinuity approach**. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, 197 (2008) 332-348.

OLSEN, J. & POLLARD, D. D. 1989. Inferring paleostress from natural fracture patterns: a new method. *Geology*, 17, 345–348.

OLSON, J. E., 2004, Predicting fracture swarms—The influence of subcritical crack growth and the crack-tip process zone on joint spacing in rock, in J. W. Cosgrove and T. Engelder, eds., *The initiation, propagation, and arrest of joints and other fractures*: Geological Society (London) Special Publication 231, p. 73–87.

ORTEGA, O., Marrett, R., Laubach, E., 2006. **Scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement**. AAPG Bulletin 90, 193-208.

PERKINS, T. K., KERN, L. R. **Widths of hydraulic fractures**. *Journal of Petroleum Technology*, 13(9), 937–49. 1961.

PETIT, J.-P., Wibberley, C.A.J., Ruiz, G., 1999. **‘Crack-seal’, slip: a new fault valve mechanism’**. *J. Struct. Geol.* 21 (8–9), 1199–1207.

PRIEST, S. D., 1993. **Discontinuity Analysis for Rock Engineering**. Chapman & Hall, New York.

PRIEST, S. D., and J. A. Hudson, 1976, Discontinuity spacing in rock: *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science, and Geomechanics Abstracts*, v. 13, p. 135–148.

ROBERTS, A., Yielding, G., Freeman, B., 1991. The geometry of normal faults 56. *The Geological Society of London*. 264 pp.

RODRIGUES, E. A. **Um modelo constitutivo de dano composto para simular o comportamento de materiais quase-frágeis**. 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado)—Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2011.

ROULEAU, A., and J. E. GALE, Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 22, 353–367, 1985.

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

SANDERSON, D. J. & Nixon, C. W. 2015. The use of topology in fracture network characterization. *Journal of Structural Geology*, 72, 55-66.

SANTOS, Rafael Fernandes Vieira Correia. **Análise estatística de parâmetros de sistemas fraturados aplicados à modelagem de fluxo**. Tese de doutorado, UFPE, Recife, 2017.

SANTOS, R. F., Miranda, T. S., Barbosa, J. A., Gomes, I. F., Matos, G., Gale, J., Neumann, V., Guimarães, L. J. 2015. **Characterization of natural fractures systems: analysis of uncertainty effects in linear scanline results**. AAPG Bulletin.

SEIXAS, M. G. **Modelagem hidromecânica do fraturamento hidráulico de rochas via elementos finitos com elementos especiais de interface**. Recife: UFPE, 2015.

SIBSON, R.H., 2000. Fluid involvement in normal faulting. *J. Geodyn.* 29 (3–5), 469–499.

Silva, A. L. & Newmann, V.H. 2002. Estratigrafia Física e Deformação do Sistema Lacustre Carbonático Aptiano-Albiano da Bacia do Araripe. Boletim do 2º Workshop PRH-ANP/MCT dos Programas de Formação de Recursos Humanos para o Setor de Petróleo e Gás da UFPE. Recife, 15-18.

SILVA, A. L.; Neumann, V. H.; Cabrera, L. 2002. Fácies Carbonáticas Laminadas da Formação Crato (Aptiano), Bacia do Araripe: Litofácies, Microfácies e Microestruturas. In: Bol. 6º Simpósio Sobre o Cretáceo do Brasil e 3º Simpósio Sobre el Cretácico de América Del Sur. São Pedro-SP. UNESP, Rio Claro, 37-41.

SIMO; JU. **Stress and strain based continuum damage models: I Formulation**. *Int. J. Solids Struct.* 15 (1987) 821–840.

SORNETTE, A., Davy, P., Sornette, D., 1990. Growth of fractal fault patterns. *Phys. Rev. Lett.* 65 (18), 2266–2269.

TEIXEIRA, J. C.; MACIEL, B. M. C. M. **p3MatPac: Pre- and Post-Processing MATLAB package**. Recife: [s.n.], v. 2, 2017. Disponível em: <<https://bitbucket.org/jontateixeira/p3matpac>>.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 1943.

TOWNEND, J., Zoback, M.D., 2000. How faulting keeps the crust strong. *Geology* 28 (5), 399–402.

TWISS, R.J. & Moores, E. M. 2007. *Structural Geology*, 2nd ed. New York. W. H. Freeman, 736 p.

VAN DIJK, J.-P. 1998. **Analysis and modelling of fractured reservoirs**. Society of Petroleum Engineers Paper, 50570.

YAORU L., C.Hang Qiang, Yang Qiang, Wang ChuanQi and Guan Fuhai. **Fracture analysis of rock mass based on 3-D non-linear finite element method**. *Technological Sciences*. Vol 54 nª 3 (2011) 556-564.

ZIHMS, S. G., Miranda, T., Lewis, H., Barbosa, J. A., Neumann, V. H., Souza, J. A. B., Cruz Falcão, da T.. 2017. **Crato Formation laminites – a Representative Geomechanical Pre-salt Analogue**. 5th Atlantic Conjugate Margins Conference, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brazil, 22th – 25th August 2017.