



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

RENATA ÉLINE DE BRÁS FONTES

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO EM BANDAS DE  
DEFORMAÇÃO**

Recife  
2021

RENATA ÉLINE DE BRÁS FONTES

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO EM BANDAS DE  
DEFORMAÇÃO**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

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

Orientadora: Profa. Dra. Analice França Lima Amorim

Coorientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes

Recife

2021

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

F683s Fontes, Renata Éline de Brás.  
Simulação numérica do comportamento mecânico em bandas de  
deformação / Renata Éline de Brás Fontes.  
84 f.; figs., simbs.  
Orientadora: Profa. Dra. Analice França Lima Amorim.  
Coorientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2021.  
Inclui referências.  
1. Engenharia Civil. 2. Bacia Rio do Peixe. 3. Bandas de  
deformação. 4. Descontinuidades fortes incorporadas. 5. Modelagem  
numérica. I. Amorim, Analice França Lima (Orientadora). II. Gomes,  
Igor Fernandes (Coorientador). III. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE  
BCTG / 2022-95

RENATA ÉLINE DE BRÁS FONTES

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE COMPORTAMENTO MECÂNICO  
EM BANDAS DE DEFORMAÇÃO**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Simulação e Gerenciamento de Reservatórios de Petróleo.

Aprovada em 31/08/2021

BANCA EXAMINADORA

---

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes (coorientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Manoel Porfírio Cordão Neto (examinador externo)  
Universidade de Brasília

---

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Tiago Siqueira de Miranda (examinador externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças e me permitir chegar até aqui mediante tantas batalhas enfrentadas no decorrer dessa árdua jornada de pouco mais de dois anos e meio, sem Ele nada disso seria possível.

Sou grata também a minha família por todo suporte e apoio que me foi e é dado diariamente, principalmente à minha mãe (Eliane), meu exemplo maior de força e dedicação, todo o meu esforço é dedicado a ti e ao meu irmão (Fidelman) que não medem esforços para me ajudar e me dar suporte em todas as minhas escolhas. Amo muito vocês.

Gratidão ao meu noivo, Diogo Pontes, por me amparar e me dar forças em meio a tantos momentos difíceis em que eu tive vontade de desistir. Te amo muito e serei eternamente grata por tudo.

Aos meus colegas e amigos do LMCG, que me recepcionaram muito bem e tornaram o caminho mais fácil. Aos meus orientadores, professora Analice França e Igor Gomes, minha eterna gratidão por não me deixarem desanimar em meio a tantas dificuldades de uma pandemia e problemas pessoais, muito obrigada por todo apoio, injeções de ânimo e paciência, aos trabalhos e experiências compartilhados, sem vocês teria sido muito mais difícil.

Não poderia deixar de agradecer também aos Professores que aceitaram participar da banca, obrigada pela disponibilidade e gentileza.

Ao pessoal do grupo de estudo do terceiro andar, em especial à Jean, com toda paciência e prestatividade para ensinar e compartilhar aprendizados, que me ajudaram bastante no decorrer desse período, dentre outros que foram importantes para o bom desenvolvimento deste trabalho.

Grata também à Universidade Federal do Pernambuco, Instituição que foi casa para a realização desse projeto.

Agradeço também à PETROBRAS e a FADE pelo apoio financeiro durante todo o período de mestrado.

Por fim, meu muito obrigada a todos que me apoiaram direta ou indiretamente na conclusão de mais uma etapa da minha carreira acadêmica. Obrigada por terem tornado a caminhada mais leve. Que Deus abençoe sempre a todos. Serei

eternamente grata.

## RESUMO

Reservatórios areníticos geralmente apresentam a ocorrência de bandas de deformação. Estas estruturas podem alterar de forma significativa as características petrofísicas e geomecânicas deste tipo de reservatório. O presente trabalho objetiva a realização de uma análise numérica, que poderá analisar o efeito do cisalhamento em bandas de deformação com a utilização do modelo elastoplástico de Drucker-Prager. Além disso, permite avaliar a influência da tensão confinante e parâmetros dos materiais, e assim modelar sistemas com segmentos de falhas pré-existentes. Esta pesquisa utilizou dados geomecânicos de ensaios uniaxiais e parâmetros físicos de arenitos arcóseos da Formação Antenor Navarro, Bacia Rio do Peixe. As simulações numéricas utilizaram-se da técnica de descontinuidades fortes incorporadas (bandas de deformação), com rigidez duas vezes superior a rocha ao qual está inserida, utilizando o código *in house* CODE-BRIGHT, as quais foram divididas em duas etapas. A primeira etapa, foram simulados quatro casos a nível de plugue, cada caso com uma banda de deformação inserida (com angulações de 10°, 20°, 30° e 40°) e submetidos às mesmas condições de contorno. A segunda etapa, foram realizadas análises de um afloramento real com a ocorrência de bandas de deformação. A simulação foi realizada considerando dois cenários com diferentes estados de tensões, assim foi possível estudar a influência das bandas de deformação em cenários baseados em afloramentos. Assim, pode-se concluir que essas estruturas influenciam diretamente na resistência mecânica dos maciços rochosos, a depender do ângulo de mergulho, correlação entre as mesmas, grau de proximidade e quantidade de estruturas presentes no material. Além disso, o estado de tensões ao qual essas bandas estão submetido, irá influenciar se o comportamento do material necessitará ou não de uma carga maior para que ele atinja a ruptura, determinando o comportamento elástico ou elastoplástico da rocha.

Palavras-chave: bacia rio do peixe; bandas de deformação; descontinuidades fortes incorporadas; modelagem numérica.

## ABSTRACT

Sandstone reservoirs usually present the occurrence of deformation bands. These structures can significantly alter the petrophysical and geomechanical characteristics of this type of reservoir. The present work aims to carry out a numerical analysis, which will be able to analyze the effect of shear on strain bands using the Drucker-Prager elastoplastic model. Furthermore, it allows evaluating the influence of confining stress and material parameters, thus modeling systems with pre-existing fault segments. This research used geomechanical data from uniaxial tests and physical parameters of Arcosian sandstones from the Antenor Navarro Formation, Rio do Peixe Basin. The numerical simulations used the technique of strong incorporated discontinuities (deformation bands), with rigidity twice as high as the rock to which it is inserted, using the in house code CODE-BRIGHT, which were divided into two stages. In the first stage, four cases were simulated at the plug level, each case with an inserted strain band (with angulations of 10°, 20°, 30° and 40°) and subjected to the same boundary conditions. The second stage, analyzes of a real outcrop with the occurrence of deformation bands were carried out. The simulation was carried out considering two scenarios with different stress states, thus it was possible to study the influence of strain bands in scenarios based on outcrops. Thus, it can be concluded that these structures directly influence the mechanical strength of rock masses, depending on the dip angle, correlation between them, degree of proximity and amount of structures present in the material. Furthermore, the state of stress to which these bands are subjected will influence whether the material's behavior will or will not require a greater load for it to reach rupture, determining the elastic or elastoplastic behavior of the rock.

Keywords: rio do peixe basin; deformation bands; strong discontinuities incorporated; numerical modeling.

## LISTA DE FIGURAS

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 1 -  | Mapa de localização das bacias interiores do Nordeste. Em vermelho, localização da Bacia Rio do Peixe.....   | 7  |
| Figura 2 -  | Áreas mapeadas durante o levantamento geológico. Delimita-se o quadrado em vermelho a área total mapeada (A). Em maior detalhe, identificam-se os pavimentos e a exposição do afloramento, mapeados estruturalmente(B).....          | 8  |
| Figura 3 -  | Mapa estrutural do afloramento caverna.....  | 9  |
| Figura 4 -  | Foto do sistema de carregamento triaxial verdadeiro.....   | 11 |
| Figura 5 -  | Sistema utilizado para ensaio de compressão uniaxial.....  | 12 |
| Figura 6 -  | Tipos de comportamento elástico e elastoplásticos para gráfico tensão versus deformação.....   | 16 |
| Figura 7 -  | Comportamento uniaxial de materiais elastoplásticos por meio do gráfico tensão ( $\sigma$ ) versus deformação .....  | 17 |
| Figura 8 -  | Função de fluência.....  | 18 |
| Figura 9 -  | Modelo de Drucker-Prager superfície de fluência no espaço das tensões principais e da aproximação de Mohr-Coulomb.....   | 19 |
| Figura 10 - | Corpo arbitrário com descontinuidade incorporada: (a) domínio discretizado próximo a descontinuidade incorporada; (b) configuração do corpo deformado, separando o elemento $\Omega$ em duas partes $\Omega_e^-$ e $\Omega_e^+$ .... | 27 |
| Figura 11 - | Campo dos deslocamentos decomposto: a) elementos sem deformação; b) elemento deformado; c) deformação da região contínua; d) movimento relativo entre as partes devido a descontinuidade incorporada.....                            | 28 |
| Figura 12 - | Etapas operacionais da simulação.....  | 30 |
| Figura 13 - | Descrição dos casos de compressão Uniaxial (a) Geometria e malha de elementos finitos, (b) Condições de contorno.....  | 31 |
| Figura 14 - | Mapeamento de bandas da área escolhida para análise...   | 33 |
| Figura 15 - | Descrição dos casos e condições de contorno: (a) Geometria e malha de elementos finitos, (b) condições de contorno para cenário 1 e c) condições de contorno   |    |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
|             | para cenário 2.....   | 34 |
| Figura 16 - | Distribuição das tensões cisalhantes ( $S_{xy}$ ), na direção do eixo y ( $S_{yy}$ ) e na direção do eixo x ( $S_{xx}$ ) em MPa para tensão confinante aplicada de 35 MPa para o tempo final de 25min: a) cenário 1 (inclinação da banda de 10°); b) cenário 2 (inclinação da banda de 20°); c) cenário 3 (inclinação da banda de 30°) e d) cenário 4 (inclinação da banda de 40°)..... | 36 |
| Figura 17 - | Deformações plásticas cisalhantes do ensaio compressão uniaxial no tempo final de 25 min para: a) cenário 1 (inclinação da banda de 10°); b) cenário 2 (inclinação da banda de 20°); c) cenário 3 (inclinação da banda de 30°) e d) cenário 4 (inclinação da banda de 40°).....   | 38 |
| Figura 18 - | Porosidade do ensaio compressão uniaxial no tempo final de 25 min para: a) cenário 1 (inclinação da banda de 10°); b) cenário 2 (inclinação da banda de 20°); c) cenário 3 (inclinação da banda de 30°) e d) cenário 4 (inclinação da banda de 40°).....  | 39 |
| Figura 19 - | Deslocamentos na direção do eixo x (X-Displacements) e y (Y-Displacements) em metros para tensão confinante de 35 MPa no tempo final de 25 min: : a) cenário 1 (inclinação da banda de 10°); b) cenário 2 (inclinação da banda de 20°); c) cenário 3 (inclinação da banda de 30°) e d) cenário 4 (inclinação da banda de 40°).....  | 41 |
| Figura 20 - | Medidas de deslocamento vertical no topo da amostra no tempo final de 25 min: a) cenário 1 (inclinação da banda de 10°); b) cenário 2 (inclinação da banda de 20°); c) cenário 3 (inclinação da banda de 30°) e d) cenário 4 (inclinação da banda de 40°).....  | 42 |
| Figura 21 - | Variação do deslocamento vertical em função da tensão vertical (y) em pontos específicos para o cenário 1 (inclinação da banda de 10°).....   | 44 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 22 - | Varição do deslocamento vertical em função da tensão vertical (y) em pontos cenário 2 (inclinação da banda de 20°).....   | 45 |
| Figura 23 - | Varição do deslocamento vertical em função da tensão confinante (y) em pontos específicos para o cenário 3 (inclinação da banda de 30°).....                      | 45 |
| Figura 24 - | Varição do deslocamento vertical em função da tensão confinante (y) em pontos específicos para o cenário 4 (inclinação da banda de 40°).....                      | 46 |
| Figura 25 - | Distribuição das tensões cisalhantes ( $S_{xy}$ ), na direção do eixo y ( $S_{yy}$ ) e na direção do eixo x ( $S_{xx}$ ) em MPa: a) cenário 1 e b) cenário 2..... | 49 |
| Figura 26 - | Deformações plásticas cisalhantes de ensaio compressão uniaxial no tempo final para: a) cenário 1 e b) cenário 2.....   | 51 |
| Figura 27 - | Deslocamentos na direção do eixo x e y em metros no tempo final: : a) cenário 1 e b) cenário 2.....   | 53 |
| Figura 28 - | Medidas de deslocamento vertical no topo da amostra no tempo final de aproximadamente 1 ano: : a) cenário 1 e b) cenário 2.....                                   | 54 |
| Figura 29 - | Varição do deslocamento vertical em função da tensão confinante (y) em pontos específicos para o cenário 1 no tempo final de 1 ano.....                           | 56 |
| Figura 30 - | Varição do deslocamento vertical em função da tensão confinante (y) em pontos específicos para o cenário 2 no tempo final de 297 dias.....                        | 57 |
| Figura 31 - | Varição do deslocamento vertical em função da tensão confinante (y) nos pontos A, B e D para o cenário 1 e 2 no tempo final de cada.....                          | 58 |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>14</b> |
| 1.1      | CONTEXTO E MOTIVAÇÃO  | 15        |
| 1.2      | OBJETIVO GERAL  | 16        |
| 1.3      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS   | 16        |
| 1.4      | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO  | 16        |
| <b>2</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>  | <b>18</b> |
| 2.1      | BANDAS DE DEFORMAÇÃO  | 18        |
| 2.2      | CONCEITOS BÁSICOS DE ENSAIOS MECÂNICOS                                | 22        |
| 2.2.1    | <i>ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL</i>                                  | 24        |
| 2.3      | RELAÇÕES CONSTITUTIVAS E INVARIANTES DE TENSÃO                        | 26        |
| 2.4      | TEORIA DA PLASTICIDADE  | 28        |
| 2.4.1    | <i>FUNÇÃO DE FLUÊNCIA</i>   | 31        |
| 2.5      | MODELO CONSTITUTIVO DE DRUCKER-PRAGUER                                | 32        |
| <b>3</b> | <b>FORMULAÇÃO MATEMÁTICA</b>  | <b>34</b> |
| 3.1      | FORMULAÇÃO IMPLÍCITA  | 34        |
| 3.1.1    | <i>ALGORITMO DE INTEGRAÇÃO IMPLÍCITA-EXPLÍCITA (IMPL-EX)</i>          | 36        |
| 3.2      | MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS COM DESCONTINUIDADES FORTES INCORPORADAS | 39        |
| <b>4</b> | <b>METODOLOGIA</b>  | <b>42</b> |
| 4.1      | MODELAGEM NÚMERICA UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS                       | 42        |
| 4.2      | CENÁRIOS DE PLUG  | 46        |
| 4.3      | CENÁRIOS REAIS COM BASE EM AFLORAMENTO                                | 48        |
| <b>5</b> | <b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>                          | <b>48</b> |
| 5.1      | CENÁRIOS DE PLUG  | 48        |
| 5.1.1    | <i>COMPORTAMENTO DAS TENSÕES</i>                                      | 48        |
| 5.1.2    | <i>DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS CISALHANTES</i>                              | 51        |
| 5.1.3    | <i>POROSIDADE</i>   | 52        |
| 5.1.4    | <i>DESLOCAMENTOS</i>  | 53        |
| 5.2      | CENÁRIOS REAIS COM BASE EM AFLORAMENTOS                               | 61        |
| 5.2.1    | <i>COMPORTAMENTO DAS TENSÕES</i>                                      | 61        |
| 5.2.2    | <i>DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS CISALHANTES</i>                              | 64        |
| 5.2.3    | <i>DESLOCAMENTOS</i>  | 66        |

|          |                                       |           |
|----------|---------------------------------------|-----------|
| <b>6</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>     | <b>72</b> |
| 6.1      | CONCLUSÕES.....                       | 72        |
| 6.2      | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 73        |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>               | <b>74</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento das teorias e critérios de ruptura para diferentes tipos de materiais é necessário maior entendimento do processo de geração, propagação e coalescência das fraturas no interior de um elemento submetido a diferentes fatores, como por exemplo, o carregamento mecânico, as variações térmicas, as reações químicas, dentre outros. Além disso, a descrição do processo de dano à rocha tem sido importante principalmente na análise da degradação das propriedades mecânicas bem como na formação de estruturas tais como fraturas, bandas de deformação, zonas de danos etc. Diante disso, os estudos experimentais e numéricos buscam reproduzir a mudança do comportamento com os diferentes estados impostos sobre o material (VALDERRAMA E ASSIS, 2018).

As bandas de deformação são estruturas planares que ocorrem comumente em arenitos porosos e afetam diretamente as propriedades petrofísicas dos arenitos, como porosidade e permeabilidade, bem como as propriedades geomecânicas, como resistência à compressão e módulo de Young (PONTES E NOGUEIRA, *et.al*, 2019; AYDIN, 1978). Essas estruturas geram heterogeneidade geomecânica e permoporosa no arenito hospedeiro (rocha matriz) comportando-se como uma barreira ao fluxo de fluidos no interior de bacias sedimentares (ANTONELLINI e AYDIN, 1994; HOLCOMB *et al.*, 2007; FAULKNER *et al.*, 2010). A banda de deformação é o principal componente estrutural nas zonas de danos em rochas porosas (FACHRI *et al.*, 2011) sendo assim o seu conhecimento fundamental para a exploração de reservatórios de petróleo atingidos por essa deformação.

Para entendermos sobre a influência das bandas de deformação em rochas, precisamos primeiramente estudar sobre a resistência de rochas que contém essas estruturas, em seguida compreender o que já foi feito por outros autores para melhor desenvolvimento desta pesquisa. Pode-se conhecer de maneira mais simples o comportamento das rochas com ensaios experimentais em campo e em laboratório, no qual vários pesquisadores já realizaram e será exposto e dissertado no presente trabalho. O foco será entender o comportamento de alguns tipos rochosos submetidos a várias condições, tais como pressão e temperatura, mas para isso é indispensável o conhecimento da mecânica das rochas.

De acordo com Maragon, 2018 a capacidade das rochas em suportar cargas, depende de sua resistência ao cisalhamento, isto é, da tensão  $\tau_r$  que é a máxima tensão que pode atuar no solo sem que haja ruptura. Terzaghi (conhecido como o

“pai” da Mecânica dos Solos) conseguiu conceituar essa resistência como consequência imediata da pressão normal ao plano de ruptura correspondente a pressão grão a grão ou pressão efetiva. Isto é, anteriormente considerava-se a pressão total o que não correspondia ao real fenômeno de desenvolvimento de resistência interna, mas, na nova conceituação, amplamente constatada, conclui-se que somente as pressões efetivas mobilizam resistência ao cisalhamento.

O presente trabalho objetiva a realização de uma análise numérica, que poderá estudar o efeito do cisalhamento em bandas de deformação da bacia do Rio do Peixe e o comportamento das mesmas, através da simulação do ensaio de compressão uniaxial e da aplicação de tensões confinantes simuladas para casos de afloramento. Para análise numérica realizada utilizou-se o código de elementos finitos (*in house*), CODE\_BRIGHT (OLIVELLA *et al.*, 1995). Além da abordagem da mecânica do contínuo foi também empregada a técnica de aproximação incorporando descontinuidades fortes (BESERRA, 2015), para representar o comportamento mecânico das fraturas (cisalhamento das bandas de deformação). Com isso, foram utilizados como base ensaios uniaxiais feitos por diferentes autores, os quais representam alta confiabilidade na caracterização das propriedades de resistência das rochas.

## 1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Por vários anos tem-se estudado o comportamento de reservatórios de petróleo, desde a sua formação até o abandono do mesmo depois que perde seu valor econômico. Para entender melhor o que acontece quando diferentes tipos de materiais que compõem os reservatórios sofrem quando submetidos a diversos tipos de tensões, tem-se observado a necessidade da análise do processo de geração, crescimento e coalescência das fraturas no interior dessas rochas, além de propriedades geomecânicas, petrofísicas, térmicas, químicas, dentre outros. Podendo a partir desses estudos tentar reproduzir diferentes estados de tensão e deformação aos quais o material é submetido, e assim especular cenários que podem ocorrer a depender de vários fatores. Seguindo desses ensaios, pode-se ainda realizar uma análise numérica para entendermos melhor a resistência e deformabilidade das amostras ensaiadas e assim poderemos simular e prever vários cenários (O AUTOR, 2021).

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é entender a evolução de bandas de deformação e afloramentos a partir de ensaios mecânicos em amostras, realizados por outros autores, com a inserção de bandas, e em seguida realizar uma simulação numérica para um conhecimento mais aprofundado do comportamento dessas bandas.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Esta pesquisa tem por objetivos específicos:

- Realizar revisão bibliográfica dos parâmetros mecânicos para simulação;
- Realização de uma análise numérica, que poderá analisar o efeito do cisalhamento em bandas de deformação com a utilização do modelo elastoplástico de Drucker-Prager para simular maciços rochosos em condição de cisalhamento;
- Avaliar a influência da tensão confinante e parâmetros dos materiais, e assim modelar sistemas com segmentos de falhas pré-existentes, para regime compressional e extensional.
- Simular em escala de plug os ensaios de compressão uniaxial com rochas com bandas de diferentes inclinações em relação a horizontal;
- Simular um cenário real contendo bandas de deformação, submetido a dois níveis de tensões distintos, horizontal e verticalmente.
- Comparar o comportamento dos cenários simulados.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação esta organizada em quatro capítulos, apresentados a seguir:

Capítulo 1: Neste capítulo é apresentada a introdução com principais temas a serem abordados no Capítulo 2, contexto e motivação, objetivos geral e específicos.

Capítulo 2: Abrange uma revisão bibliográfica sobre os temas desta dissertação, descrição bandas de deformação e da bacia em estudo, conceitos básicos de ensaios mecânicos, mecânica do contínuo e plasticidade, modelo constitutivo de drucker-prager, método dos elementos finitos, método dos elementos finitos com descontinuidades fortes incorporadas e a modelagem numérica utilizada para este trabalho.

Capítulo 3: A metodologia utilizada na dissertação, como as malhas utilizadas nas simulações, com suas geometrias e condições de contorno utilizadas.

Capítulo 4: São apresentados e analisados os resultados das simulações realizadas para diferentes cenários amostrais e reais.

Capítulo 5: Neste capítulo são descritas as principais conclusões deste trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

No referencial teórico serão abordados tópicos base que fundamentaram bibliograficamente esta dissertação e permitiram a realização de estudos e coleta de dados para as simulações apresentadas no decorrer deste trabalho.

### 2.1 BANDAS DE DEFORMAÇÃO

A complexidade geológico-estrutural da crosta terrestre remete a necessidade de diferentes processos investigativos para a compreensão de sua deformação. Nesse contexto, há a necessidade de estudos de campo para caracterização estrutural e cinemática da deformação das rochas. A análise estrutural também pode ser realizada por sistemas remotos (e.g. imagens de satélite, aerogeofísica), ensaios laboratoriais para determinação de parâmetros mecânicos e petrofísicos (e.g. uniaxial, triaxial e petrofísica) e as modelagens física e numéricas. Os dois últimos casos permitem a entrada dos dados geológico-estruturais que podem ser manipulados de acordo com as características e condições de contornos para análise da influência dos mecanismos de deformação nos mais distintos cenários (MEDEIROS, 2020).

Alguns processos geológicos formadores de estruturas ocorrem na escala mais rasa da terra. Na crosta rasa as temperaturas e pressões são mais baixas e em regime de deformação rúptil formam-se nas rochas estruturas como fraturas. As fraturas e suas derivações são descontinuidades formadas por fraqueza aos esforços mecânicos impressos no momento ou posteriormente por meio de reativações. Dentro deste contexto, o comportamento de rochas com diferentes reologias à formação dessas estruturas é variado, e em rochas sedimentares porosas há formação de estruturas denominadas de bandas de deformação. Fossen *et al.* (2007) define que essa porosidade condicional é igual ou superior a 15%. A descrição dessas estruturas inicialmente foi feita por Aydin (1978), definindo que bandas de deformação são estruturas planares que ocorrem comumente em arenitos porosos.

Fossen *et al.* (2007) diz que bandas de deformação (no contexto de rocha porosa e deformação de sedimentos) são resumidas nos cinco itens a seguir:

(1) As bandas de deformação são restritas a meios granulares porosos, notadamente areias porosas e arenitos. A formação e evolução de uma banda de deformação envolve uma quantidade significativa de rotação e translação do grão, e este processo, quer inclua o esmagamento do grão ou apenas a rotação e o deslizamento por atrito ao longo dos limites do grão, requer uma certa quantidade de

porosidade. Se a porosidade for muito baixa, então fraturas de tensão, estilólitos e / ou superfícies deslizantes irão se formar preferencialmente.

(2) Uma banda de deformação não representa uma superfície de deslizamento. Superfícies de deslizamento podem, no entanto, formar-se dentro de bandas ou, mais comumente, na borda de zonas de bandas de deformação, mas isso representa um estágio mais maduro no desenvolvimento de falhas a partir de banda de deformação.

(3) As bandas de deformação ocorrem hierarquicamente como bandas individuais, como zonas de bandas ou dentro de zonas associadas a superfícies de deslizamento (também conhecidas como bandas de deformação defeituosas).

(4) Faixas de deformação individuais raramente hospedam deslocamentos maiores do que alguns centímetros, mesmo quando as próprias faixas têm 100 m de comprimento.

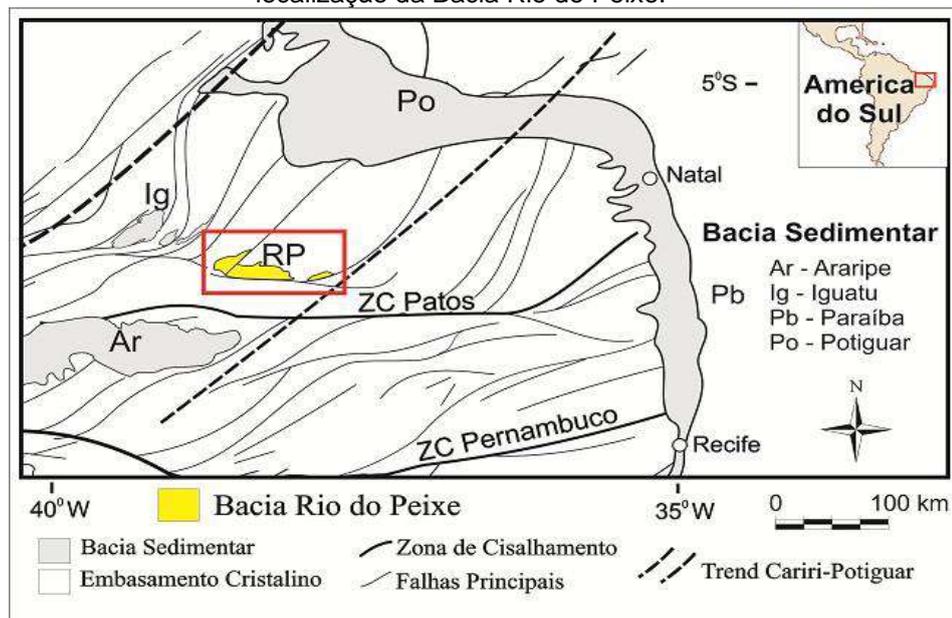
(5) Bandas de deformação são encontradas em muitos regimes tectônicos e não tectônicos da crosta superior.

Existem várias características importantes que distinguem as bandas de deformação das fraturas (como superfícies de deslizamento ou fraturas de extensão). Primeiro, eles são mais grossos e exibem deslocamentos menores do que as superfícies de deslizamento clássicas de comprimento comparável. Além disso, enquanto a coesão é perdida ou reduzida nas fraturas comuns, a maioria das bandas de deformação mantém ou até aumenta a coesão. Além disso, as bandas de deformação frequentemente exibem uma redução na porosidade e permeabilidade, ao passo que ambas as superfícies de deslizamento e fraturas por tensão estão tipicamente associadas a um aumento de permeabilidade. O comportamento de endurecimento por deformação, comumente associado à formação de bandas de deformação, também contrasta com o amolecimento por deformação associado às fraturas clássicas. Essas diferenças na evolução mecânica e expressão estrutural podem influenciar significativamente o fluxo de fluido e, portanto, têm implicações diretas para a gestão dos hidrocarbonetos porosos e reservatórios de água subterrânea em que são muito prováveis de ocorrer (FOSSEN et al. 2007)

Pontes, *et.al* (2019) apresentaram estudos em bandas de deformação em arenitos de alta porosidade da Bacia do Rio do Peixe, descrevendo-as como estruturas tabulares que ocorrem em rochas porosas e são caracterizadas por alterações volumétricas causadas por diferentes mecanismos de deformação, como catáclase ou fluxo granular, e cinemática com deslocamento de cisalhamento (> 10

mm). Nogueira, *et.al* (2015) a partir de estudos pôde detalhar que a Bacia Rio do Peixe (BRP) que localiza-se no extremo oeste do estado da Paraíba, no limite com o estado do Ceará, abrangendo uma área total de 1.315 km<sup>2</sup>, estando situada ao norte da zona de cisalhamento Patos, à sul da Bacia Potiguar e à oeste da Bacia da Paraíba. A mesma faz parte do grupo de bacias interiores do nordeste, conjunto de *grabens* e *semi-grabens* gerados a partir de reativações e descontinuidades estruturais presentes no embasamento pré-cambriano, correspondendo a um conjunto de bacias sedimentares de pequeno à médio porte geneticamente relacionadas ao evento de separação dos continentes Sul Americano e Africano (Assine, 2007). Tais bacias ocorrem ao longo de um eixo de rifteamento de idade neocomiana a barremiana denominado *Trend Cariri-Potiguar* (Figura 1) (De Castro e Castelo Branco, 1999; Assine, 2007).

Figura 1 - Mapa de localização das bacias interiores do Nordeste. Em vermelho, localização da Bacia Rio do Peixe.



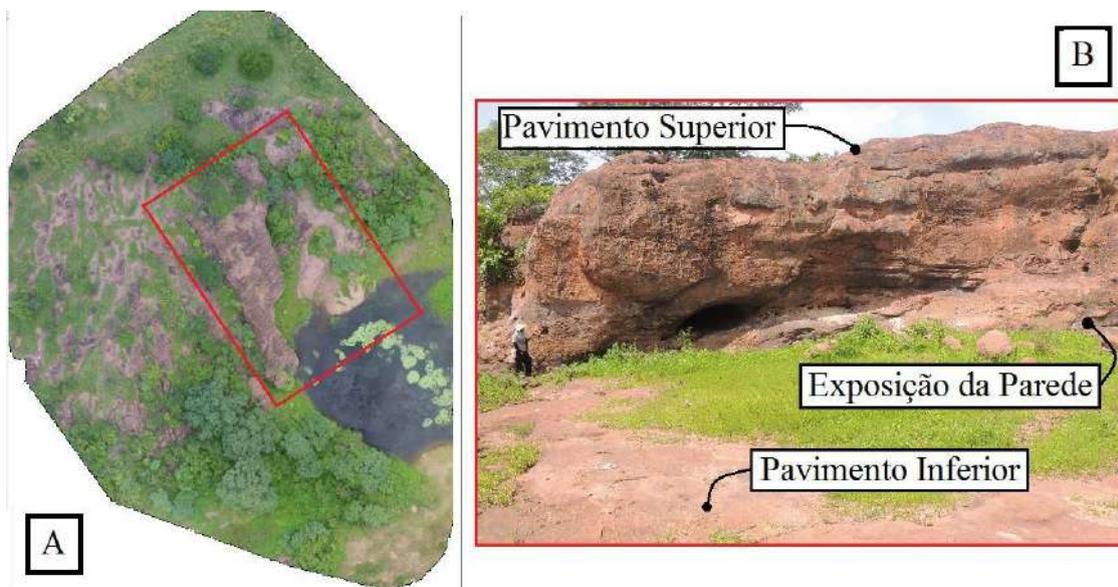
Fonte: NICCHIO (2017)

O preenchimento sedimentar da Bacia do Rio do Peixe consiste em três diferentes formações da era do início do Cretáceo: Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas. A Formação Antenor Navarro sobrepõe diretamente o porão cristalino, como uma inconformidade que ocorre ao longo das margens flexurais dos semi-agarrões. A Formação Antenor Navarro é composta por conglomerados e arenitos imaturos na base, e arenitos finos interfinger com folhelhos no topo. A Formação Sousa é a unidade intermediária, composta por folhelhos e lodos avermelhados depositados em

um sistema lacustre. A Formação Rio Piranhas é composta por conglomerados e arenitos grossos depositados em sistemas de ventiladores aluviais.

Na Figura 2, pode-se observar o afloramento caverna, alvo de estudos realizados por Oliveira (2019), e que será utilizado neste trabalho para simulação do cenário real. Durante o mapeamento estrutural para a elaboração deste estudo, foram adquiridas imagens de alta resolução, com o objetivo de mapear as estruturas. O mapeamento utilizando esses produtos digitais possibilitou, também, a observação do comportamento das bandas de deformação em relação as suas geometrias e mudanças de orientação. Esses dados serviram também de base para a construção do modelo geológico digital do afloramento Caverna (OLIVEIRA, 2019).

Figura 2 - Áreas mapeadas durante o levantamento geológico. Delimita-se o quadrado em vermelho a área total mapeada (A). Em maior detalhe, identificam-se os pavimentos e a exposição da afloramento, mapeados estruturalmente (B).

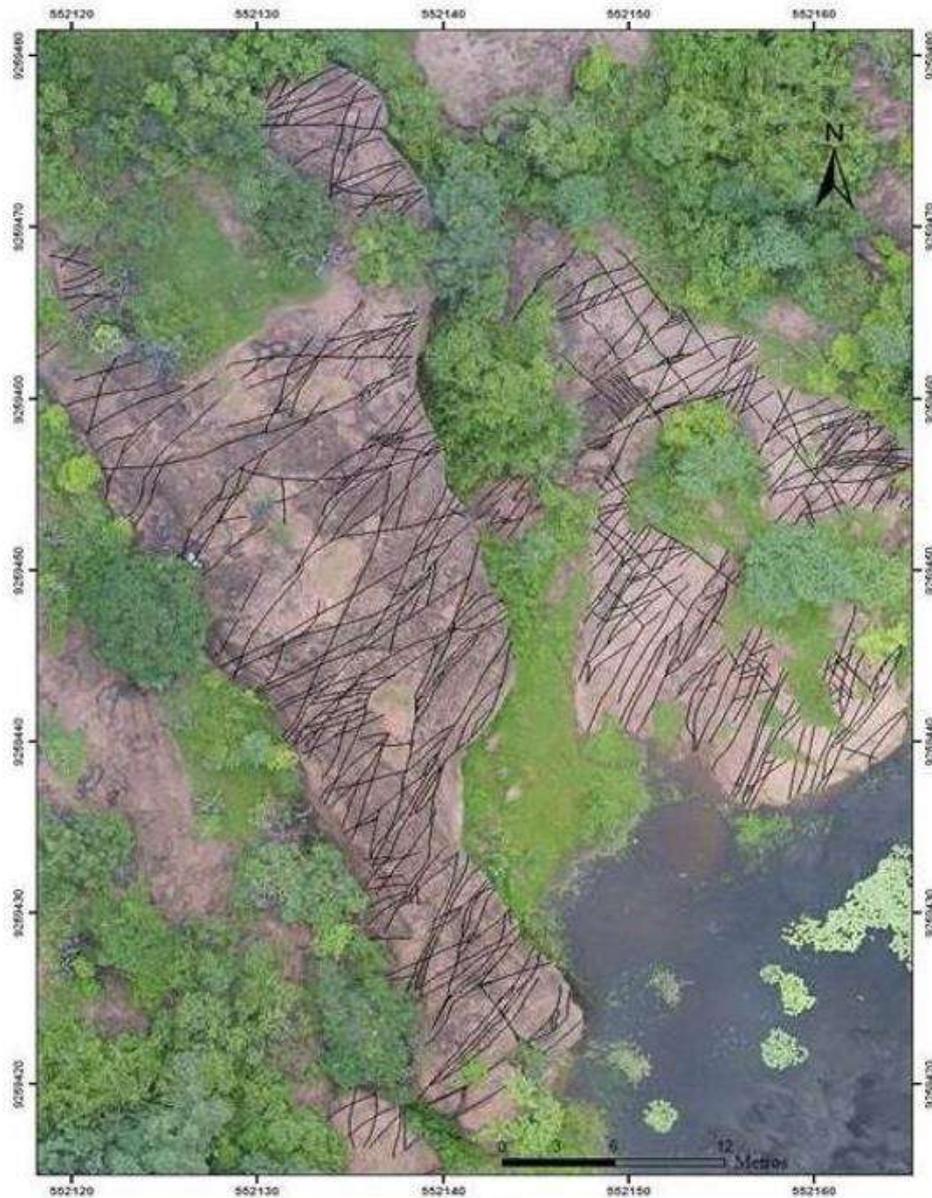


Fonte: OLIVEIRA (2019)

A interpretação das imagens adquiridas consiste na identificação e delimitação das principais estruturas do afloramento. Essa análise é realizada com técnicas de criação de linhas e *shapes* por meio do *software* ArcGis® 10.3. Foram aplicadas aproximações para continuidade dos traços criados seguindo as direções das bandas de deformação (OLIVEIRA, 2019).

A Figura 3 apresenta o mapa estrutural do afloramento Caverna, com a marcação em linhas pretas e delimitação das bandas em toda a sua extensão.

Figura 3 - Mapa estrutural do afloramento caverna.



Fonte: Adaptado (OLIVEIRA, 2019)

## 2.2 CONCEITOS BÁSICOS DE ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos laboratoriais incidem particularmente na condução de trajetórias de compressão uniaxial ou triaxial, podendo também ser estáticos ou dinâmicos, sendo os mais simples os que usam dispositivos de propagação de ondas sísmicas nas amostras. Além disso, existe uma grande diversidade de ensaios pensados para situações específicas, logo com trajetórias diversificadas e que melhor representam obras tão diferentes com fundações e grandes escavações a céu aberto, por exemplo: túneis e outras obras subterrâneas, tanto em maciços terrosos como

rochosos, ensaios em placas e ensaios em fendas abertas em maciços rochosos (COSTA, 2008).

Costa, 2008 relata que são diversos os tipos de ensaios de laboratório que buscam, com maior grau de sofisticação, representar com fidelidade e exatidão as condições possíveis de ocorrências. Dentre os principais ensaios de laboratório temos:

- Ensaio de Compressão Uniaxial;
- Ensaio de Cisalhamento Direto;
- Ensaio de Compressão Triaxial;

Dependendo da importância da obra a realizar, das características dos solos e das condições de ocorrência justifica-se a realização dos ensaios com a finalidade específica de obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento (“c” e “ $\phi$ ”).

Ensaio triaxiais verdadeiros cúbicos em rocha foram executados por Mogi (1970), Gau *et al.* (1983), Amadei e Robison (1986) e Esaki e Kimura (1989). Estes constituem um método alternativo, no qual as três tensões principais são aplicadas independentemente às faces opostas de corpos de prova cúbicos (AZEVEDO, 2005).

Um sistema de carregamento de tensão triaxial verdadeira foi desenvolvido (King *et al.*, 1995) no Imperial College para ensaiar corpos de prova cúbicos secos (sem fluxo) de 51 mm, com a capacidade de variar, independentemente, cada uma das três tensões principais, como mostra a Figura 4. A capacidade máxima de aplicação de tensão do equipamento, nas direções horizontais, é de 115 MPa e na direção vertical é de 750 MPa. O sistema foi, com sucesso, aplicado para introduzir famílias de fraturas e microfissuras orientadas perpendicularmente à tensão principal mínima em corpos de prova cúbicos, determinar permeabilidade e medidas de velocidade de ondas ultrassônicas P e S, assim como parâmetros mecânicos, tais como resistência e deformabilidade (AZEVEDO, 2005).

Figura 4 - Foto do sistema de carregamento triaxial verdadeiro



Fonte: King *et al.*, 1995 (Al-Harthy *et al.*, 1998a)

### 2.2.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

O ensaio de compressão uniaxial, de acordo com Lobato, 2009 consiste em ensaiar corpos de provas, de forma que eles são comprimidos paralelamente ao eixo longitudinal. É o teste mais utilizado devido a sua simplicidade, para determinar parâmetros de rocha.

Os resultados desses ensaios são extremamente limitados na sua interpretação e utilização prática em geotecnia.

A Figura 5 mostra um sistema utilizado em ensaios uniaxiais feitos por Oliveira (2016), em que a mesma fez o uso de três amostras de rocha carbonática sintética e realizou ensaios individuais utilizando este sistema de compressão.

Figura 5 - Sistema utilizado para ensaio de compressão uniaxial.



Fonte: OLIVEIRA (2016)

De acordo com Oliveira (2016) para o procedimento deste ensaio as amostras são submetidas a uma tensão vertical ( $\sigma_1$ ) crescente, a uma velocidade de aplicação da carga na prensa que é controlada e padronizada, sem tensão confinante, distribuída de modo uniforme em toda a seção transversal do corpo de prova; deste ensaio pode-se ser medidos as deformações verticais e horizontais, a tensão até a ruptura do material, além de que a partir das curvas originadas pelos dados de tensão-deformação, é possível calcular o módulo de elasticidade médio, correspondente ao declive da secante entre a origem e o ponto de ruptura, de acordo com a seguinte relação (equação 1):

$$E = \frac{\sigma_{axial}}{\epsilon_{axial}} \quad (1)$$

onde  $E$  é a constante de proporcionalidade conhecida como módulo de elasticidade,  $\sigma_{axial}$  é a tensão axial aplicada e  $\epsilon_{axial}$  é a deformação na mesma direção da força aplicada.

Para o presente trabalho foram feitas simulações baseadas em ensaios realizados por outros autores.

### 2.3 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS E INVARIANTES DE TENSÃO

Utilizando a simplificação de que uma amostra de rocha tridimensional é composta por um meio homogêneo e contínuo, sem alteração nas propriedades físicas em qualquer porção, possibilita a descrição matemática e física dentro da mecânica do contínuo por meio de equações constitutivas ou modelos constitutivos. Sendo assim, é possível relacionar tensão e deformação dependendo das propriedades das rochas e condições físicas às quais foram submetidos para descrever seu comportamento para estas condições (JAEGER; COOK; ZIMMERMAN, 2007).

As relações constitutivas são modelos matemáticos propostos para descrever o comportamento real dos materiais validados com análises experimentais. Para um determinado material os parâmetros básicos, como por exemplo constantes elásticas e condutividade térmica, são determinados experimentalmente e utilizados nestas equações, restringindo-as a formas específicas respeitando condições físicas (MEDEIROS, 2020). Para resumir esses requisitos, Reddy (2013) explica a seguir, que:

1. Todas as equações constitutivas devem respeitar as leis de conservação de massas, conservação de momentos, energia e desequilíbrio entrópico.
2. Não há dependência com qual ponto, ou partícula, é escolhida quanto as equações constitutivas. Deve haver diferentes formas para diferentes sistemas de coordenadas de referência, ademais a resposta deve ser independente do sistema adotado.
3. As equações constitutivas de um material devem permanecer as mesmas independente de mudanças do observador ou estrutura de referência.
4. Representar a simetria material, isometria e ortotropia.
5. Se uma determinada variável independente aparece em uma equação constitutiva, então deve aparecer nas demais, a não ser que alguma lei de equilíbrio seja rompida.
6. O valor de uma determinada variável constitutiva em um ponto material em qualquer tempo é determinado pelas histórias de movimento e temperatura de todo contínuo.
7. Caso seja analisado um determinado ponto  $x$ , as variáveis constitutivas não são afetadas por variáveis dependentes (deslocamentos, tensão, etc.) distantes deste ponto.

8. As variáveis constitutivas de cada lado das equações, se tratadas com a mesma simbologia devem representar o mesmo parâmetro.
9. Valores momentâneos das variáveis constitutivas não são expressivamente afetadas por valores em períodos anteriores.
10. Respeito a casualidade, que nada mais é que variáveis que entram na descrição do movimento de um contínuo e são consideradas como efeitos observáveis auto evidentes em todo comportamento termomecânico deste.

O emprego de relações constitutivas pode ser dividido de acordo com a dependência das análises em relação ao tempo. Modelos visco-elásticos e visco-plásticos apresentam dependência do tempo no comportamento de diferentes materiais. Em contrapartida, modelos elásticos e plásticos são independentes do tempo, ou seja, o tempo é um parâmetro descritivo da ordem das ações (ABBO, 1997). A seguir será apresentado a formulação básica para modelo elastoplástico que será utilizado posteriormente nos casos estudados.

Os invariantes de tensões serão apresentadas a seguir para que possa-se compreender as formulações numéricas utilizadas. O tensor de tensão de Cauchy, tridimensional de segunda ordem, utilizado para representar as tensões em um ponto material e usualmente aplicado quando se deseja analisar as tensões em corpos para os casos em que se considera pequenas deformações. O tensor pode ser representado no sistema de coordenadas cartesianas conforme equação (2).

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & \sigma_{yy} & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Outro tensor importante é o tensor desviador que indica a separação das tensões hidrostáticas do estado tensional, podendo ser representado pela equação:

$$\mathbf{S} = \sigma - p\mathbf{I} \quad (3)$$

$$p = tr(\sigma) = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (4)$$

Onde  $\mathbf{I}$  é o tensor identidade e  $p$  a tensão média, que corresponde a primeira invariante de tensões. Logo a equação da tensão desviadora ficará representada pela equação (5)

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - p & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & \sigma_{yy} - p & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & \sigma_{zz} - p \end{bmatrix} \quad (5)$$

A segunda invariante de tensões que será necessária, corresponde a segunda invariante de tensões desviadoras dado pela equação 6.

$$J = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{xx} - p)^2 + (\sigma_{yy} - p)^2 + (\sigma_{zz} - p)^2 + 2(\tau_{xy}^2 + \tau_{xx}^2 + \tau_{yy}^2)]} \quad (6)$$

A formulação apresentada para os invariantes visa a compreensão dos passos posteriores na descrição e implementação do modelo elastoplástico.

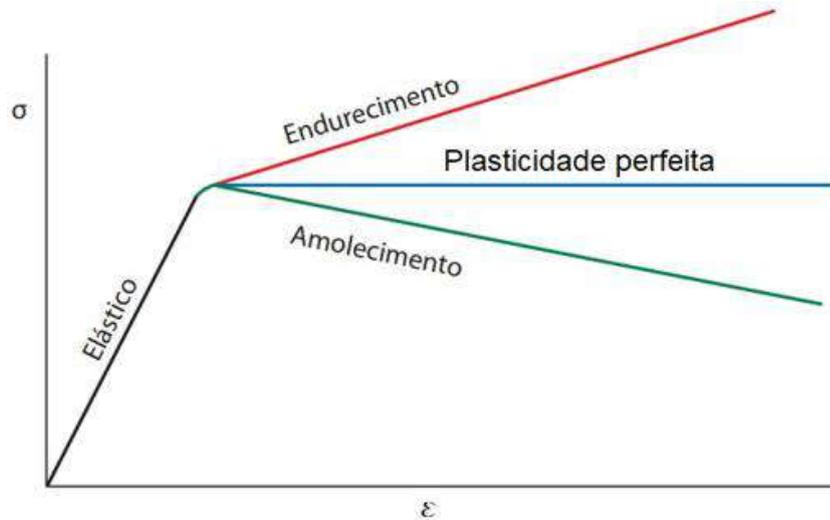
## 2.4 TEORIA DA PLASTICIDADE

As rochas como materiais complexos necessitam de modelos constitutivos que associam diferentes comportamentos. Assim, os modelos constitutivos elastoplásticos relacionam os comportamentos elástico e plástico ao nível tensional o qual é submetido, decompondo a deformação do material em duas parcelas, elástica e plástica, reversível e irreversível respectivamente (OLIVELLA; BOSCH, 2002). Portanto, até uma tensão denominada limite elástico,  $\sigma_y$  (*yield strength* ou *yield point*), o material se comporta elasticamente, e após esse nível tensional, plasticamente deformando em um fluxo contínuo.

No regime plástico a rocha pode se comportar de três maneiras distintas descrito e exemplificado por Hill (1998), a primeira plasticidade perfeita quando após a tensão limite o material continua se deformando plasticamente sem que ocorra mudança nas tensões. Endurecimento (*strain hardening*, *work hardening* ou *hardening*) na ocorrência do ganho de resistência, por rearranjo estrutural, e o material continua a se deformar com o aumento das tensões. Bem como, amolecimento (*strain softening*, *work softening* ou *softening*) que ocorre ao ultrapassar o limite plástico e o material continua a se deformar com a diminuição da tensão aplicada. A Figura 6 apresenta um exemplo genérico para compressão uniaxial dos possíveis comportamentos de um material elastoplástico em relação a tensão e a deformação. Consoante ao que foi anteriormente citado, o fato de modelos constitutivos elastoplásticos não dependerem do tempo, consequentemente isto simplifica as modelagens estruturais da litosfera e permite identificar o comportamento de

falhamento das rochas (deformações dúcteis e rúpteis) (MORAES, 2016).

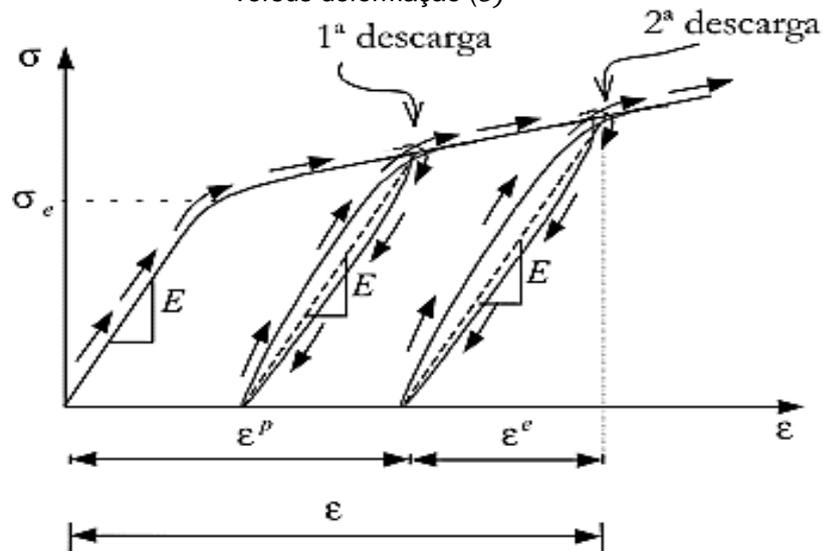
Figura 6 - Tipos de comportamento elástico e elastoplásticos para gráfico tensão ( $\sigma$ ) versus deformação ( $\varepsilon$ ).



Fonte: Adaptado de Yu, Ma e Li (2009).

O comportamento plástico pode ser representado pela Figura 7, para um caso uniaxial de um material genérico. Neste caso, o material se comporta elasticamente até o limite elástico, e posteriormente descarregado as deformações que ocorreram no processo serão recuperáveis e denominado parcela elástica ( $\varepsilon^e$ ). Se as tensões continuarem a serem impostas, ultrapassando o limite elástico, até um determinado nível e posterior descarregamento, uma parcela da deformação não será recuperada denominada parcela plástica ( $\varepsilon^p$ ). Caso o processo descrito fosse repetido em ciclos, com incremento de tensões, a parcela elástica permaneceria a mesma e aumentaria a deformação plástica.

Figura 7 - Comportamento uniaxial de materiais elastoplásticos por meio do gráfico tensão ( $\sigma$ ) versus deformação ( $\varepsilon$ )



Fonte: Adaptado de Olivella e Bosch (2002).

O processo descrito anteriormente apresenta o Princípio da Decomposição Aditiva da Deformação, que consiste em decompor a deformação total ( $\varepsilon$ ) de um sólido sujeito a um estado de tensões, superior ao limite elástico, nas parcelas da deformação plástica e elástica. A Equação (7) apresenta a formulação deste princípio.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (7)$$

A formulação da equação constitutiva elástica e plástica, bem como os conceitos básicos ao entendimento das formulações aqui apresentadas utilizam a literatura base da mecânica do contínuo e plasticidade (e.g. SLOAN, 1987; OLIVELLA *et al.*, 1996; ABBO, 1997; SOUZA NETO; PERIĆ; OWEN, 2008).

Materiais cujo comportamento é elástico linear, possibilita relacionar as tensões totais com as deformações elásticas através de uma matriz de rigidez elástica ( $\mathbf{D}_e$ ), apresentado na Equação (8)

$$\sigma = \mathbf{D}_e \varepsilon \quad (8)$$

A matriz de rigidez elástica pode ser escrita na forma explícita em função do módulo de Young e coeficiente de Poisson utilizando as constantes de Lamé, quando se tratar de material isotrópico, homogêneo e que respeita a Lei de Hooke para elasticidade.

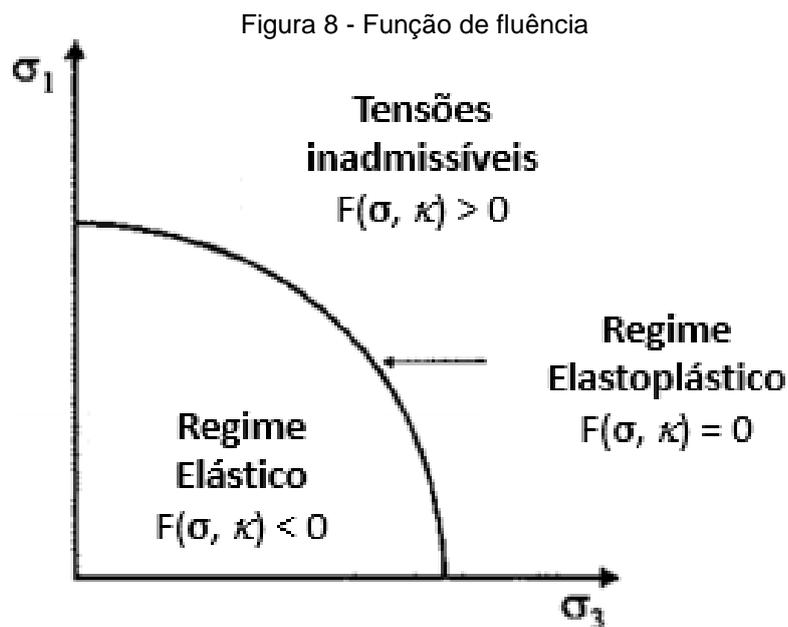
De acordo com Medeiros (2020) o comportamento do material pode ser

determinado pelo parâmetro de endurecimento, que determina o tamanho, posicionamento e forma da superfície de fluência com o aumento ou diminuição dos níveis de tensões, caracterizando respectivamente endurecimento ou amolecimento. Esse tipo de ocorrência pode ser regido com o uso da Lei de Endurecimento, que consiste no parâmetro de endurecimento  $h$  em função das deformações plásticas acumuladas, expresso pela Equação (9).

$$h = h(\varepsilon^p) \quad (9)$$

#### 2.4.1 FUNÇÃO DE FLUÊNCIA

A função de fluência pode ser descrita correlacionando a tensão com a deformação de modo a construir um modelo elastoplástico determinado por uma função de fluência  $F(\sigma, \kappa)$  resultante das tensões e aspectos plásticos do material (Figura 8).



Fonte: adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999

De acordo com Martins (2001), tratando-se de plasticidade podemos descrever a equação de fluência delimitando ela dentro do domínio elástico  $E_\sigma$ . Tensões fora do espaço admissível não são permitidas no critério de plastificação, assim sendo, tensões menores ou iguais a zero encontraram-se na região de tensões plasticamente admissíveis.

## 2.5 MODELO CONSTITUTIVO DE DRUCKER-PRAGUER

O efeito da tensão principal intermediária na resistência da rocha é conhecido há muito tempo e o critério de falha de Drucker-Prager foi um dos primeiros a incorporar tal influência. Embora o critério de Drucker-Prager superestime a resistência da rocha até certo ponto, ele ainda é usado em projetos de mecânica de rocha principalmente por causa de sua estabilidade numérica ao conduzir uma análise elástico-plástica. Alguns estudos foram conduzidos no passado para verificar a validade do critério Drucker-Prager comparando com uma quantidade limitada de dados de força de laboratório (GADDE E RUSNAK, 2008).

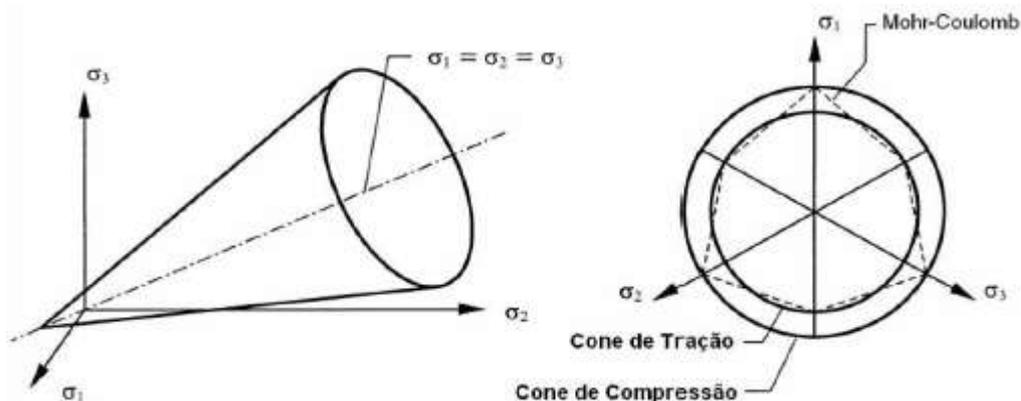
Este modelo teve como objetivo realizar uma suavização do modelo de Mohr-Coulomb, com uso da teoria previa de potencial plástico de von Mises (1928) usando o incremento da variação volumétrica durante a deformação plástica, podendo ser associada ou não associada.

Para a modelagem constitutiva empregou-se o modelo elastoplástico de Drucker Prager tal como descrito por Souza Neto *et al.* (2008) e Beserra (2010), cuja superfície de fluência é definida pela equação 10.

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{h}) = J + \eta p - \xi c' \quad (10)$$

Onde  $\eta(c, \phi)$  e  $\xi(c, \phi)$ , são determinados em função com a aproximação à superfície de Mohr-Coulomb e em função de parâmetros dos materiais utilizados, coesão do material  $c$  e  $\phi$  que é o ângulo de atrito interno. A Figura 9 exhibe a representação gráfica no campo das tensões principais da superfície de Drucker-Prager.

Figura 9 - Modelo de Drucker-Prager, superfície de fluência no espaço das tensões principais e da aproximação de Mohr-Coulomb.



Fonte: Adaptado de Souza Neto, Peric e Owens (2008)

Para a representação das bandas de deformação utilizou-se a técnica de

descontinuidades fortes incorporadas que consiste em representar, através do campo de deslocamentos no interior do elemento finito, descontinuidades no contínuo que estão localizadas em bandas estreitas, conforme descrito por Beserra (2015). O modelo elastoplástico foi empregado tanto para o meio contínuo como para a descontinuidade forte.

### 3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A utilização de métodos numéricos aplicados à problemas geológicos vêm sendo amplamente difundido ao longo das décadas com o intuito de diminuir as incertezas e corroborar com análises cinemáticas e hidro-termo-mecânicas (ANASTASOPOULOS *et al.*, 2007). Dentre os métodos mais utilizados destacam-se a utilização do métodos discretos (*DEM*) com ênfase na origem tectônica de falhas em escala microestrutural (SCHÖPFER *et al.*, 2019), e o método dos elementos finitos (*FEM*) aplicados à simulações de geração e reativação de falhas (LIU *et al.*, 2018; NABAVI *et al.*, 2019).

No presente trabalho foi utilizado o método dos elementos finitos aplicado no código *in house* desenvolvido por Olivella *et al.* (1996), o CODE-BRIGHT (*COupled DEformation, BRIne, Gas and Heat Transport*). Este programa é amplamente utilizado para a simulação hidro-termo mecânica e geoquímica acoplada à problemas relacionados de mecânica dos solos e rochas, geologia estrutural, reservatórios de petróleo, dentre outros (LINS *et al.*, 2016). Nessa seção será apresentado de maneira básica e sucinta a formulação implementada para o modelo constitutivo de Drucker-Prager, aproximação explícita através do código IMPL-EX e utilizando descontinuidades fortes incorporadas (BESERRA, 2010, 2015). A formulação em elementos finitos básico é amplamente difundido e tratado na literatura, deste modo não será tratado aqui e pode ser encontrado no trabalho de Zienkiewicz e Taylor (2000).

#### 3.1 FORMULAÇÃO IMPLÍCITA

De acordo com Medeiros (2020), numericamente é necessário a adoção de um tempo fictício para integrar as equações relacionadas aos problemas de tensão deformação, assim seja a variação de tempo  $\Delta t$ , expressa pela equação (11).

$$\Delta t = t_{n+1} - t_n \quad (11)$$

O estado de tensões *trial* é o estado de tensão por tentativa, indicado pelo índice sobrescrito. Para o entendimento inicial o tensor de tensões é atualizado pela equação (12), onde  $\Delta \gamma$  corresponde ao multiplicador plástico, o operador dois pontos (:) indica o produto interno e  $\Delta \gamma \mathbf{D}_e : \mathbf{n}_n + 1$  é o vetor de retorno à superfície de fluência.

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{\text{trial}} - \Delta \gamma \mathbf{D}_e : \mathbf{n}_n + 1 \quad (12)$$

O incremento da deformação plástica será calculado utilizando o vetor de fluxo para a porção suave do cone de acordo com a equação (13):

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^p = \Delta \gamma \mathbf{n}_{n+1} = \Delta \gamma \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\mathbf{s}_{n+1}^{\text{trial}}}{\|\mathbf{s}_{n+1}^{\text{trial}}\|} - \frac{\bar{\eta}}{3} \mathbf{I} \right) \quad (13)$$

Conseqüentemente a atualização de tensões ficará:

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{\text{trial}} - \Delta \gamma \left( \sqrt{2G} \frac{\mathbf{s}_{n+1}^{\text{trial}}}{\|\mathbf{s}_{n+1}^{\text{trial}}\|} - K\bar{\eta} \mathbf{I} \right) \quad (14)$$

Os parâmetros  $K$  e  $G$  representam os módulos elásticos volumétrico e cisalhante, respectivamente, equações (15) e (16). Neste trabalho  $E$  representa o módulo de Yong e  $u$  o coeficiente de Poisson.

$$K = \frac{E}{3(1-2u)} \quad (15)$$

$$G = \frac{E}{2(1+u)} \quad (16)$$

Reestruturando a equação (14) em função das tensões hidrostáticas e desviadoras é possível obter as equações (17) e (18).

$$\mathbf{s}_{n+1} = \left( 1 - \frac{\sqrt{2G}}{\|\mathbf{s}_{n+1}^{\text{trial}}\|} \right) \mathbf{s}_{n+1}^{\text{trial}} \quad (17)$$

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_{n+1}^{\text{trial}} - K\bar{\eta} \Delta \gamma \quad (18)$$

A condição de consistência da formulação, ou seja, condição associada a superfície de fluência e a regra de fluxo, ficará representado pela equação (19):

$$f_{n+1} = \frac{\sqrt{2}}{2} \|\mathbf{s}_{n+1}^{\text{trial}}\| + np_{n+1} - \xi c = 0 \quad (19)$$

Fazendo usos das equações apresentadas é possível chegar na equação (20) para o multiplicador plástico. Após esse passo há a atualização das tensões através da equação (14).

$$\Delta\gamma = \frac{f_{n+1}^{\text{trial}}}{G + K\eta\bar{\eta}} \quad (20)$$

Para o vértice, singularidade, as tensões serão atualizadas conforme equação (21) e a equação de consistência será reduzida para a seguinte forma mostrada na equação (22):

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1} = (p_{n+1}^{\text{trial}} - K\Delta\varepsilon_V^P)\mathbf{I} \quad (21)$$

$$c \frac{\xi}{\bar{\eta}} - p_{n+1}^{\text{trial}} + K\Delta\varepsilon_V^P = 0 \quad (22)$$

O retorno ao cone é garantido utilizando a uma condição de retorno expresso pela equação (23), para o parâmetro  $\gamma$ , se verdadeiro o algoritmo é validado. Caso contrário utiliza-se a condição de retorno para o vértice.

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \|\mathbf{s}_{n+1}^{\text{trial}}\| - G\Delta\gamma = 0 \quad (23)$$

Após a formulação apresentada é possível aplica-las a matriz elastoplástica e obter a equação implícita da matriz tangente consistente. Da mesma forma que, para o domínio elástico,  $\gamma=0$ , a matriz elástica será devidamente encontrada.

### 3.1.1 ALGORITMO DE INTEGRAÇÃO IMPLÍCITA-EXPLÍCITA (IMPL-EX)

O algoritmo IMPL-EX surgiu da simplificação do algoritmo proposto por Oliver; Huespe e Cante (2008), com o argumento de estimar o multiplicador plásticos a partir das deformações, tensões e variáveis de história a cada passo de tempo. Esta simplificação tem o intuito de diminuir a não linearidade do algoritmo, sendo desnecessário calcular as derivadas do multiplicador plástico. A diminuição do custo computacional é diretamente associada a redução nos cálculos, porém para cumprir a condição de consistência é necessário diminuir os passos de tempo ou utilizar incremento de carga menor. Os autores relatam os benefícios ao utilizar o IMPL-EX:

- Incremento considerável na robustez dos problemas que resultam em

- singularidades, por tornar simétrico o tensor constitutivo da tangente algorítmica;
- A ausência de fontes de não linearidades do modelo constitutivo, contribui para que o problema não linear completo se reduz a uma sequência de problemas lineares a cada passo do tempo, reduzindo drasticamente os gastos computacionais pois o método de Newton- Raphson exige uma iteração única para convergir e o problema se torna linear;
  - O algoritmo de integração IMPL-EX apresenta ótima estabilidade, proveniente do algoritmo de integração implícita;
  - Relação entre o tamanho do passo de tempo e a precisão do algoritmo no mínimo será linear, a custo maior o erro absoluto para o mesmo passo de tempo;
  - O método pode ser amplamente utilizado para renderizar problemas não-lineares complexos e robustos.

De acordo com Araújo (2019), 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 (2010), BESERRA (2015); SEIXAS, (2015) e MACIEL, (2017).

O objetivo desse algoritmo é diminuir a não linearidade do algoritmo de integração. Segundo Bezerra (2010), o primeiro ponto que houve mudança foram nos passos de tempo. Assim, o multiplicador plástico apresentado na equação (24), em que é realizada uma extrapolação do multiplicador plástico atual ( $\gamma^{n+1}$ ) escalonado entre o passo atual de tempo ( $\Delta t^{n+1}$ ) e o anterior ( $\Delta t^n$ ).

$$\Delta \gamma^{n+1} = \frac{\Delta t^{n+1}}{\Delta t^n} \gamma^n \quad (24)$$

A equação (24) tem reflexo direto na determinação das deformações plásticas.

Beserra (2010) propôs o cálculo das deformações totais através da equação (26), estimando as deformações totais a partir da projeção das deformações totais do tempo anterior.

$$\Delta \varepsilon_{n+1}^* = \frac{\Delta t^{n+1}}{\Delta t^n} \Delta \varepsilon_n \quad (25)$$

O estado de tensões trial é determinado partindo-se da projeção das deformações utilizando a equação (26). O estado de plastificação será verificado utilizando o novo estado de tensões para a equação (27).

$$\sigma_{n+1}^{trial*} = \sigma_n - \mathbf{D}_e : \Delta \varepsilon_{n+1}^* \quad (26)$$

$$f^{trial*} = \frac{\sqrt{2}}{2} \|\mathbf{S}_{n+1}^{trial*}\| + \eta p_{n+1}^{trial*} - \xi c \quad (27)$$

Na ocorrência de que a superfície de fluência seja violada, haverá uma mudança na determinação do multiplicador plástico em função do passo de tempo atual, que pode ser visto na equação (28).

$$\gamma^{n+1} = \frac{f^{trial*}}{G + K\eta\bar{\eta}} \quad (28)$$

O restante do algoritmo é análogo ao apresentado na seção 3.1, com diferença apenas na matriz tangente consistente que passa a ser calculada com o passo de tempo anterior, tornando ainda mais robusto computacionalmente.

Com intuito de diminuir as oscilações numéricas optou-se em utilizar o controle do passo e incremento de tempo nas simulações. Este controle foi realizado na aproximação explícita para que não ultrapasse a superfície de fluência demasiadamente, utilizando um artifício de tolerância  $F_{tol}$  (ACIOLI, 2017). O algoritmo proposto para controle do passo e incremento de tempo utiliza o passo de tempo anterior ( $dtime$ ) para o cálculo do multiplicador plástico, caso ultrapasse a superfície de fluência o artifício ( $Fator$ ) é utilizado para reconduzir a zona de tensões admissíveis e controlar a extrapolação. O algoritmo está descrito no Quadro 1 adaptado por Medeiros (2020).

Quadro 1 - Algoritmo para controle do passo de tempo.

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| 1) Base de dados            |   |
| Entrada:                    |   |
|                             | $dtime_{mín}$<br>$F_{tol}$                  |
| 2) Condição de consistência |   |
| Se                          | $f > 0, g > 0$ e $dtime > dtime_{mín}$ (29) |
| Então                       | $Fator = \frac{1 + F_{tol}}{1 + f}$ (30)    |
|                             | $dtime = dtime \times Fator$ (31)           |
| Fim.                        |   |

Fonte: Adaptado de Acioli (2017).

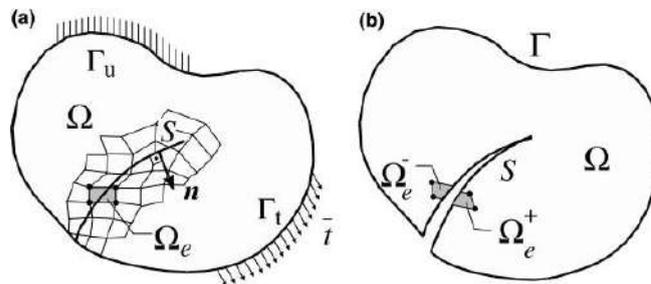
### 3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS COM DESCONTINUIDADES FORTES INCORPORADAS

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 (ARAÚJO, 2019).

Esquemáticamente Manzoli e Shing (2006) apresentam um corpo  $\Omega$  contendo uma descontinuidade cuja interface é determinada por  $S$ , conforme apresentado na Figura 10. A Figura 10(a) apresenta o domínio discretizado próximo a descontinuidade dividido no domínio dos deslocamentos  $\Gamma_u$  e domínio de contorno  $\Gamma_t$ , cujo o domínio  $\Omega_e$  formado por um elemento quadricular é dividido em duas porções  $\Omega_e^-$  e  $\Omega_e^+$  quando a superfície de contorno submetido a tração  $t$  Figura 10(b).

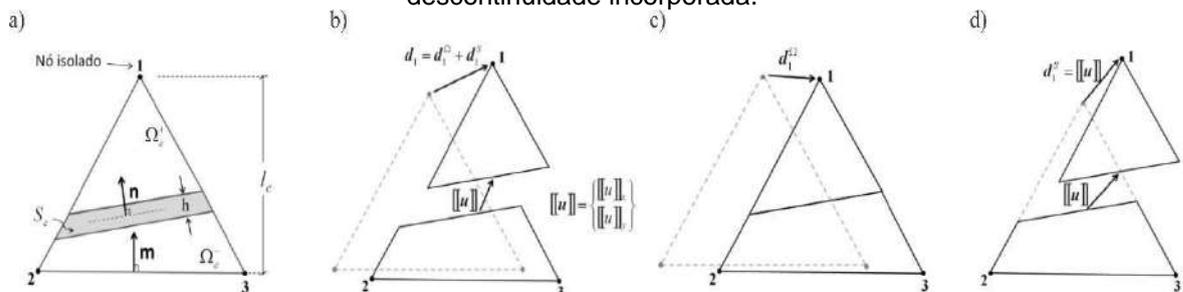
Figura 10 - Corpo arbitrário com descontinuidade incorporada: (a) domínio discretizado próximo a descontinuidade incorporada; (b) configuração do corpo deformado, separando o elemento  $\Omega_e$  em duas partes  $\Omega_e^-$  e  $\Omega_e^+$ .



Fonte: Manzoli e Shing (2006).

A formulação básica, assim como o código implementado da técnica de descontinuidades fortes incorporadas foi apresentado no trabalho de Beserra (2015) no código em elementos finitos CODE-BRIGHT, amplamente aplicado e testado na literatura (SIMO; OLIVER; ARMERO, 1993; OLIVER *et al.*, 2001). Utilizando a notação para elementos triangulares, Beserra (2015) aplicou o critério básico da consistência da técnica, considerações quanto aos deslocamentos e deformações da banda formada no elemento. Assim, com o intuito de ilustrar na figura anterior o domínio  $\Omega_e$  é um elemento triangular de três nós (1, 2 e 3), comprimento  $l_e$  e uma banda de deformação localizada  $S_e$ , com largura  $l$  e altura  $h$ , dividindo o elemento em duas regiões  $\Omega_e^-$  e  $\Omega_e^+$ , separando os nós, conforme apresentado em Figura 11, evidenciando cada estágio de elemento antes da deformação com a banda sinalizada, elemento triangular após deformação e matriz de deslocamento, deformação na região contínua e movimento relativo possível por conta da descontinuidade, respectivamente da esquerda para direita.

Figura 11 – Campo dos deslocamentos decomposto: a) elementos sem deformação; b) elemento deformado; c) deformação da região contínua; d) movimento relativo entre as partes devido a descontinuidade incorporada.



Fonte: Beserra (2015).

Assim, vide a imagem anterior, o deslocamento  $u$  é decomposto em duas

parcelas, a primeira relacionada ao movimento da porção, corpo rígido, entre as duas parcelas  $u_s$  e outra relacionada ao contínuo  $u_\Omega$ , conforme a equação (28).

$$u = u_s + u_\Omega \quad (28)$$

Assim, considerando que dentro do elemento o movimento relativo da interface é uniforme, a parcela do corpo rígido é definida conforme equação (29)

$$u_s = Hs_e[[u]] \quad (29)$$

Portanto, define-se o vetor das componentes do salto de deslocamento na interface e a função descontínua no domínio  $\Omega_e$ , função *Heaviside* (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2000), pelas equações (30) e (31) respectivamente.

$$[[u]] = \begin{Bmatrix} [[u]]_x \\ [[u]]_y \end{Bmatrix} \quad (30)$$

$$Hs_e = \begin{cases} 1 & \text{em } \Omega_e^+ \\ 0 & \text{em } \Omega_e^- \end{cases} \quad (31)$$

## 4 METODOLOGIA

Na metodologia serão abordados os métodos utilizados até a obtenção dos resultados que serão analisados nos tópicos seguintes. Em que o domínio foi discretizado no gerador de malha livre GMSH, em seguida rodado e o arquivo gerado pelo GMSH no pacote P3MatPac no Matlab desenvolvido no LMCG do Dep. de Eng. Civil da UFPE, leva aos arquivos de entrada do *CODE\_BRIGHT* onde ocorre a simulação numérica via elementos finitos gerando os arquivos de saída que serão visualizados no GiD® e assim possa-se observar e estudar os resultados.

### 4.1 MODELAGEM NUMÉRICA UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS

O fluxo das simulações consiste nas etapas de pré-processo, processo e pós-processo. Esta etapa se baseia na integração das técnicas de elementos finitos, ou seja, implica em submeter um material rochoso a uma determinada condição de tensão, o que pode implicar na fragmentação do meio rochoso com o objetivo de gerar fraturas ou simplesmente reativá-las. E a técnica de descontinuidades fortes incorporadas, compreende na inserção de descontinuidades no meio rochoso, descontinuidades essas conhecidas como bandas de deformação.

Dessa forma, serão descritos o passo-a-passo da simulação dos casos estudados no presente trabalho. Para pré-processo foi utilizado o *software* livre Gmsh, em que foi gerada a geometria inicial do problema e condições de contorno mecânicas e propriedades dos materiais dos problemas de interesse, gerando arquivo no formato *.msh*, que engloba todas essas informações. Ainda no pré-processo, o arquivo *.msh* deverá ser condicionado ao formato de entrada do CODE-BRIGHT por meio do conjunto de rotinas, funções e extensões do P3MATPac (*Pre-and Post-Processing MATLAB package*) proposto por Teixeira e Maciel (2017) e executado com o auxílio do *software* comercial MATLAB. Depois da utilização desta rotina origina-se o arquivo denominado de *\_gri.dat* e *\_gen.dat* que contém todas as informações da malha de elementos finitos. 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. O processamento é realizado no *software* CODE-BRIGHT, executado e a partir deste gerado arquivos de saída como o *.msh* e *.res* que possibilitam a visualização de todas as condições da malha final através do *software* comercial GiD®. O arquivo *.msh* permite a visualização das

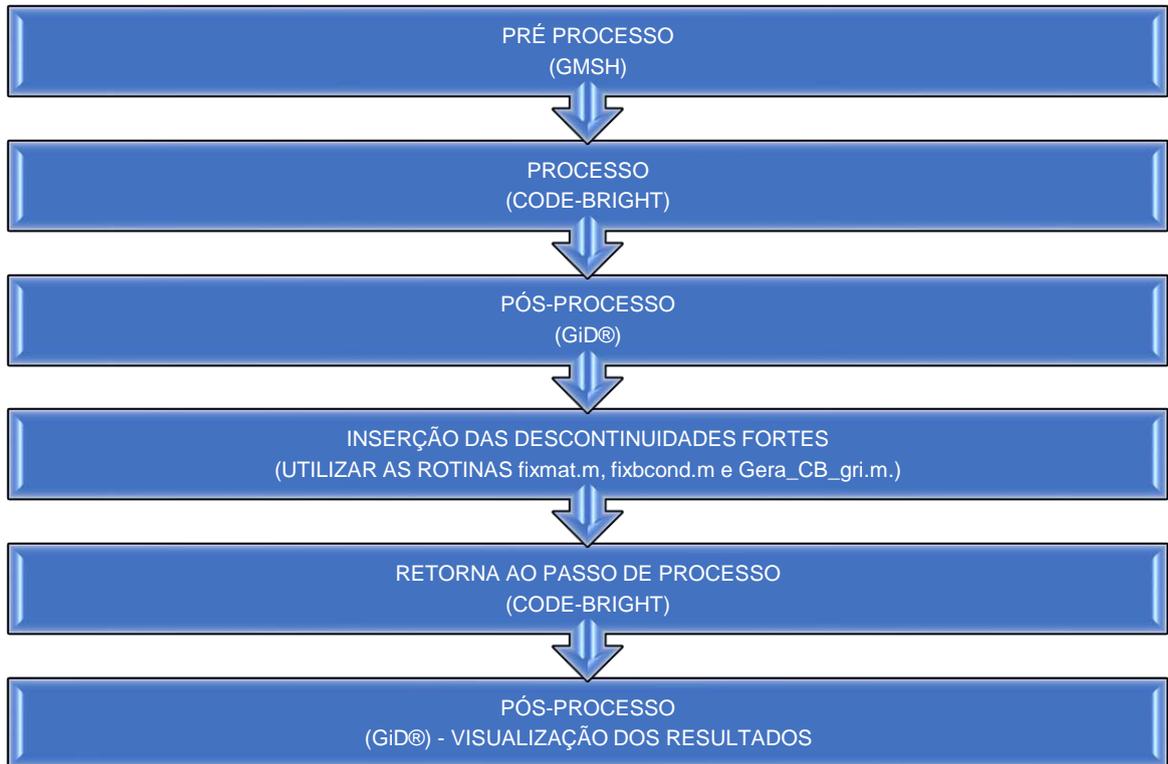
informações dos elementos e materiais da malha e o arquivo *.res* permite a visualização das condições de contorno, o que viabiliza executar possíveis correções antes da análise (etapa de pós-processamento) em elementos finitos. Na etapa de pós-processo os arquivos obtidos na etapa anterior *.msh* e *.res* são utilizados com os resultados das simulações, sendo visualizados e analisados pelo mesmo *software* GiD®.

Para os casos do uso da técnica de descontinuidades incorporadas a malha discretizada deverá ser submetida à outras rotinas no MATLAB, como por exemplo o *fix.mat*, para a incorporação geométrica das descontinuidades nos elementos selecionados. Nesse caso, realizando a inserção da descontinuidade forte incorporada, a simulação volta para a etapa denominada processamento. De acordo com Araújo (2019), 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.

A Figura 12 apresenta o esquema básico do processo de modelagem.

Figura 12 - Etapas operacionais da simulação



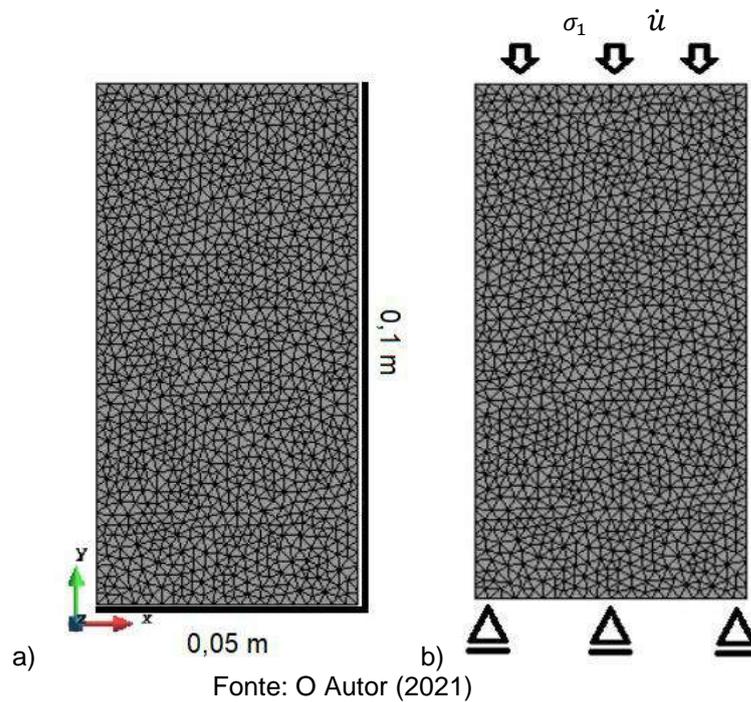
Fonte: O Autor (2021)

Neste trabalho foram realizadas as simulações de cinco cenários, os quatro primeiros a nível de plugue com dados de ensaios realizados por Oliveira (2019) e Pontes *et al.* (2019) e o quinto com base em dimensões reais. As simulações foram realizadas com base em ensaios mecânicos de compressão simples.

#### 4.2 CENÁRIOS DE PLUGS

Os quatro primeiros cenários foram considerados a nível de plugue comumente utilizados em ensaios mecânicos, adotando condições de ensaios de compressão uniaxial, baseados em amostras com descontinuidades fortes incorporadas para todos os cenários. As dimensões das amostras, bem como as condições de contorno do problema estão descritos na Figura 13 (a) e (b). A malha do modelo foi discretizada com 1128 nós e 2328 elementos triangulares, com dimensões de 0,05 m de largura e 0,1 m de altura. Uma tensão vertical  $\sigma_1$  de 35 MPa para todos os cenários amostrais simulados e taxa de deslocamento vertical no topo  $\dot{u} = 0,44 \times 10^{-3}$  mm/min e um espaço de tempo de 25 minutos.

Figura 13 - Descrição dos casos de compressão Uniaxial (a) Geometria e malha de elementos finitos, (b) Condições de contorno.



As bandas foram simuladas através da técnica de descontinuidades fortes incorporadas, sendo estas, meios de maior rigidez e resistência ao cisalhamento que a rocha.

Cada cenário foi constituído por uma amostra com a inserção de uma banda de deformação inclinada com ângulos de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $40^\circ$  para avaliar a resposta mecânica das amostras devido o efeito da inclinação das bandas, já que estas representam maior rigidez e cisalhamento.

As análises foram realizadas para os quatro cenários simulados em relação a deformações plásticas, porosidade, tensões e deslocamentos nas direções  $x$  e  $y$ .

Nas simulações foram empregadas as propriedades mecânicas indicadas na Tabela 1, as quais são características de afloramentos da Bacia do Rio do Peixe conforme apresentado por Oliveira (2019) e Pontes *et al.* (2019). Verifica-se na Tabela 1, que não há um valor associado de porosidade para a banda de deformação, mas de acordo com os autores, a porosidade das bandas de deformação é muito menor do que a do arenito.

As simulações foram realizadas considerando plasticidade perfeita e associada.

Tabela 1 - Descrição das propriedades mecânicas dos materiais.

| Materiais           | Módulo de Elasticidade ( $E$ ) GPa | Coefficiente de Poisson ( $\nu$ ) | Coesão ( $c$ ) MPa | Ângulo de Atrito ( $\theta$ ) ° | Porosidade |
|---------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------|------------|
| Arenito             | 24,657                             | 0.192                             | 10.                | 28                              | 0.20166    |
| Banda de deformação | 49,314                             | 0.199                             | 50.                | 35                              | -          |

Fonte: O Autor (2021)

#### 4.3 CENÁRIOS COM BASE EM AFLORAMENTO

Os cenários reais foram baseados no afloramento caverna descrito por Oliveira (2019), mencionado anteriormente neste trabalho no item 2.1. A princípio foram analisadas as imagens feitas de drones e estudadas por Oliveira (2019), assim foi realizada uma análise das bandas e escolhida a melhor região com cruzamento de bandas contínuas para que pudesse ser estudada e simulada. A escala da região estudada foi de 10m x 10m, como mostrado a Figura 14.

Figura 14 - Mapeamento de bandas da área escolhida para estudo.



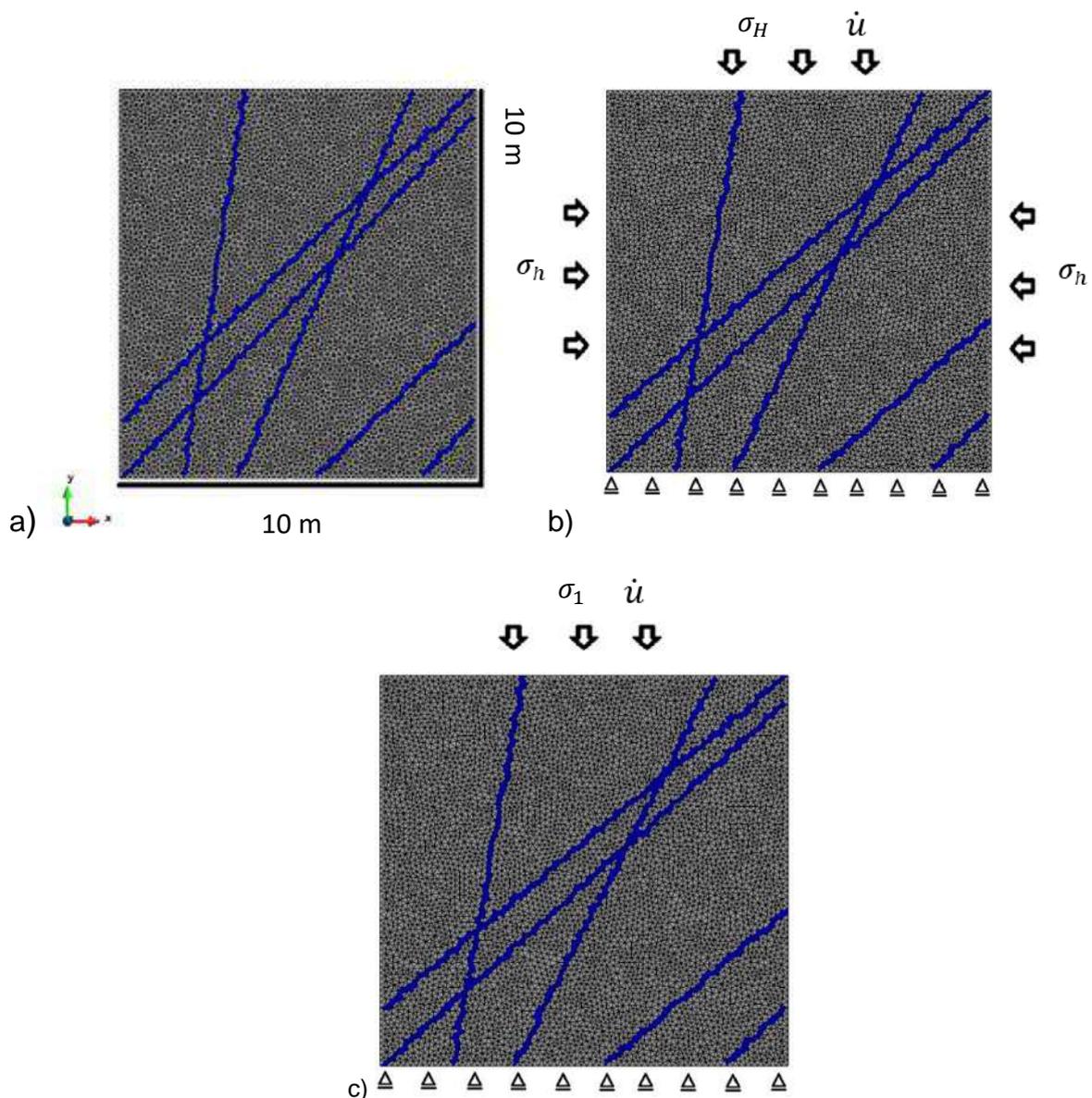
Fonte: Adaptado (OLIVEIRA, 2019)

Para este cenário real, foram considerados duas condições de contorno, baseados em dados litológicos reais estudados por Oliveira (2019). A primeira condição, para o cenário 1, foi com a aplicação de uma tensão máxima  $\sigma_H$  de 50 MPa e tensão mínima  $\sigma_h$  de 17 Mpa, simulada a um espaço de tempo de aproximadamente 1 ano. Já a segunda condição, para o cenário 2, é o maciço rochoso

é submetido a uma tensão vertical de  $\sigma_1$  50 MPa (diferente da primeira em que foi aplicado  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ ) simulada a um espaço de tempo de aproximadamente 297 dias, pouco tempo após o material entrar na fase de cisalhamento, no qual será analisado para este cenário, com base na influência da tensão vertical. As propriedades mecânicas dos materiais foram as mesmas apresentadas na Tabela 1. As Figuras 15 (a), (b) e (c) indicam as condições de contorno de restrição de deslocamentos, taxa de deslocamento vertical  $\dot{u} = 1,0 \text{ mm/min}$  e tensões aplicadas.

A malha do modelo foi discretizada com 6073 nós e 11876 elementos triangulares, com dimensões de 10 m de largura e 10 m de altura.

Figura 15 - Descrição dos casos e condições de contorno: (a) Geometria e malha de elementos finitos, (b) condições de contorno para cenário 1 e c) condições de contorno para cenário 2.



## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Primeiramente serão analisados os cenários a nível de plug e em seguida os cenários baseados em condições reais com base em afloramentos.

### 5.1 CENÁRIOS DE PLUG

Lembrando que os quatro primeiros cenários foram considerados a nível de plugue, que são comumente utilizados em ensaios mecânicos, adotando condições de ensaios de compressão uniaxial, baseados em amostras com descontinuidades fortes incorporadas para todos os cenários.

#### 5.1.1 COMPORTAMENTO DAS TENSÕES

Na simulação de um ensaio de compressão uniaxial, verifica-se que há uma concentração de tensões cisalhantes no entorno das bandas de deformação e no topo próximo a banda. Isto pode ser observado na Figura 16 na qual apresenta a distribuição das tensões cisalhantes ( $xy$ ) e as tensões na direção do eixo  $y$  e na direção do eixo  $x$  em MPa para tensão vertical de 35 MPa no tempo final, para os cenários 1, 2, 3 e 4, com ângulos de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $40^\circ$  respectivamente. Nesta mesma figura, verifica-se que quanto mais inclinada a banda, maior a distribuição da tensão cisalhante em torno da mesma, essa diferença pode ser observada com mais clareza se comparado o cenário 1 (Figura 16 a) com o cenário 4 (Figura 16 d). No caso 1 a tensão cisalhante se concentra majoritariamente no topo da banda, por outro lado, no caso 4, esta mesma tensão tende a se dissipar no decorrer da banda, se concentrando menos no topo. Além disso, observa-se que as tensões cisalhantes ocorrem do lado esquerdo da banda ao longo dos tres cenários (1, 2 e 3) e no último cenário (4), devido a inclinação da banda de  $40^\circ$ , já verifica-se uma distribuição das tensões do lado direito.

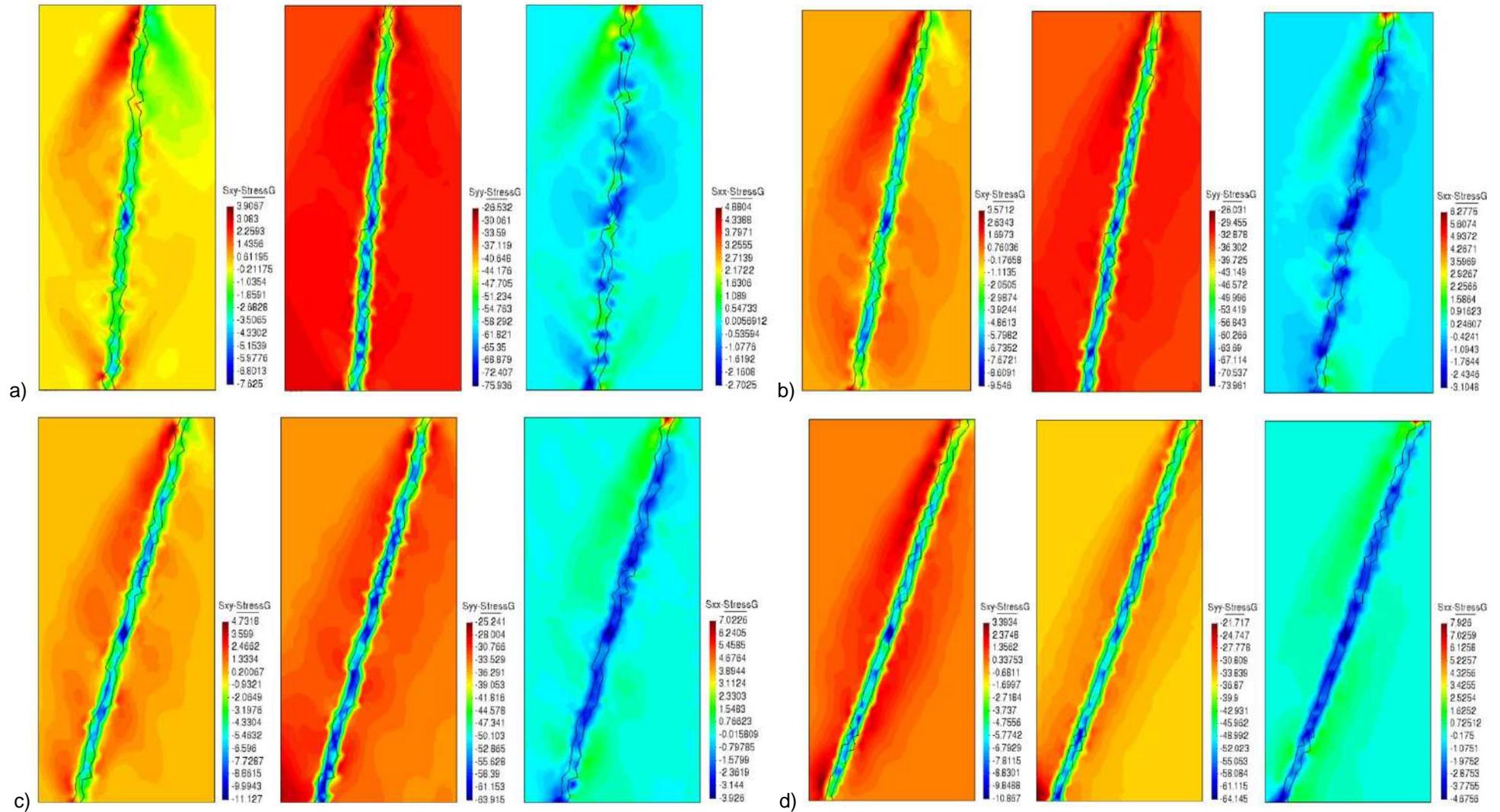
Para as tensões cisalhantes na direção vertical ( $Syy$ ), observa-se com maior nitidez a distribuição da tensão  $\sigma_1$  aplicada, mostrando a capacidade da banda de absorver as tensões impostas sobre ela. Verifica-se na Figura 16 que a maior concentração da tensão é observada dentro das bandas de deformação. Este mesmo comportamento é semelhante para todos os cenários apresentados.

Já para a distribuição das tensões cisalhantes na direção horizontal ( $Sxx$ ), observa-se uma menor influência sobre as bandas porque a tensão horizontal foi considerada nula em todos os cenários simulados (ensaio compressão uniaxial). No entanto, consegue-se observar uma maior distribuição dentro das bandas à medida

que a banda se torna mais inclinada. Esta resposta permite inferir que há a possibilidade de formação de microestruturas rúpteis localizadas no entorno das zonas de cisalhamento secundárias, trazendo um contexto de uma formação de zonas de dano induzidas contemplando cisalhamento e microfraturas diagonalizadas a partir da banda, no caso de estruturas verticalizadas, ou amplificando formando a zona de dano paralela à banda quando o mergulho da estrutura é mais proeminente.

Tal observação é importante para que se busque evidências do ponto de vista geológico através do mapeamento de estruturas secundárias.

Figura 16 - Distribuição das tensões cisalhantes ( $S_{xy}$ ), na direção do eixo y ( $S_{yy}$ ) e na direção do eixo x ( $S_{xx}$ ) em MPa para tensão confinante aplicada de 35 MPa para o tempo final de 25min: a) cenário 1 (inclinação da banda de 10°); b) cenário 2 (inclinação da banda de 20°); c) cenário 3 (inclinação da banda de 30°) e d) cenário 4 (inclinação da banda de 40°).



Fonte: O Autor (2021)

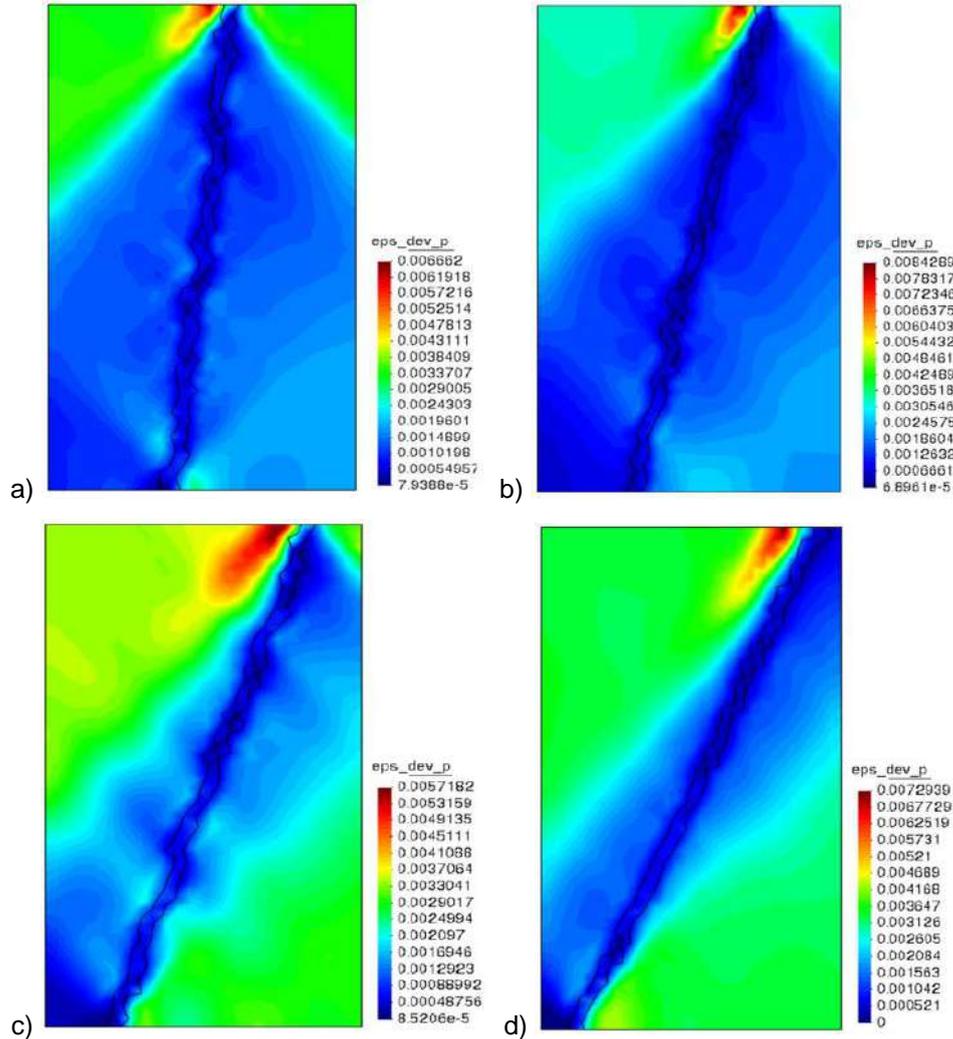
### 5.1.2 *DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS CISALHANTES*

A Figura 17 apresenta as deformações plásticas cisalhantes para os quatro cenários simulados. Em virtude do cisalhamento, o estado de tensões apresenta uma variação na direção da superfície de fluência de Drucker Prager, levando ao desenvolvimento de uma zona de dano cisalhante caracterizada pelas deformações plásticas cisalhantes.

Um aspecto importante que se pode observar, nesta mesma figura, é a formação de zonas de plastificação no topo das bandas, sendo mais intensificado na direção esquerda do topo da banda (região de cores alaranjada/avermelhada), onde há uma forte evidência de ruptura da rocha nessa região. Por outro lado, verifica-se um desenvolvimento de zona de dano, em menor intensidade, ao longo e no entorno das bandas de deformação (região azul escuro). Logo, há uma clara formação de uma zona de ruptura mais proeminente, porém, a formação de uma zona de dano no entorno das bandas que é mais difuso quando esta é verticalizada e mais bem definido quanto maior seja o mergulho da estrutura, o que está em acordo com o observado nas análises de tensão no item anterior.

Em todos os cenários, verifica-se que a inclinação da banda exerce uma forte influência sobre a deformação plástica cisalhante na rocha, pois quanto maior a inclinação da banda, observa-se um crescimento da região alaranjada/avermelhada e verde da rocha, indicando uma menor influência da banda sobre a estrutura da rocha ao qual ela está inserida.

Figura 17 - Deformações plásticas cisalhantes do ensaio compressão uniaxial no tempo final de 25 min para: a) cenário 1 (inclinação da banda de 10°); b) cenário 2 (inclinação da banda de 20°); c) cenário 3 (inclinação da banda de 30°) e d) cenário 4 (inclinação da banda de 40°).

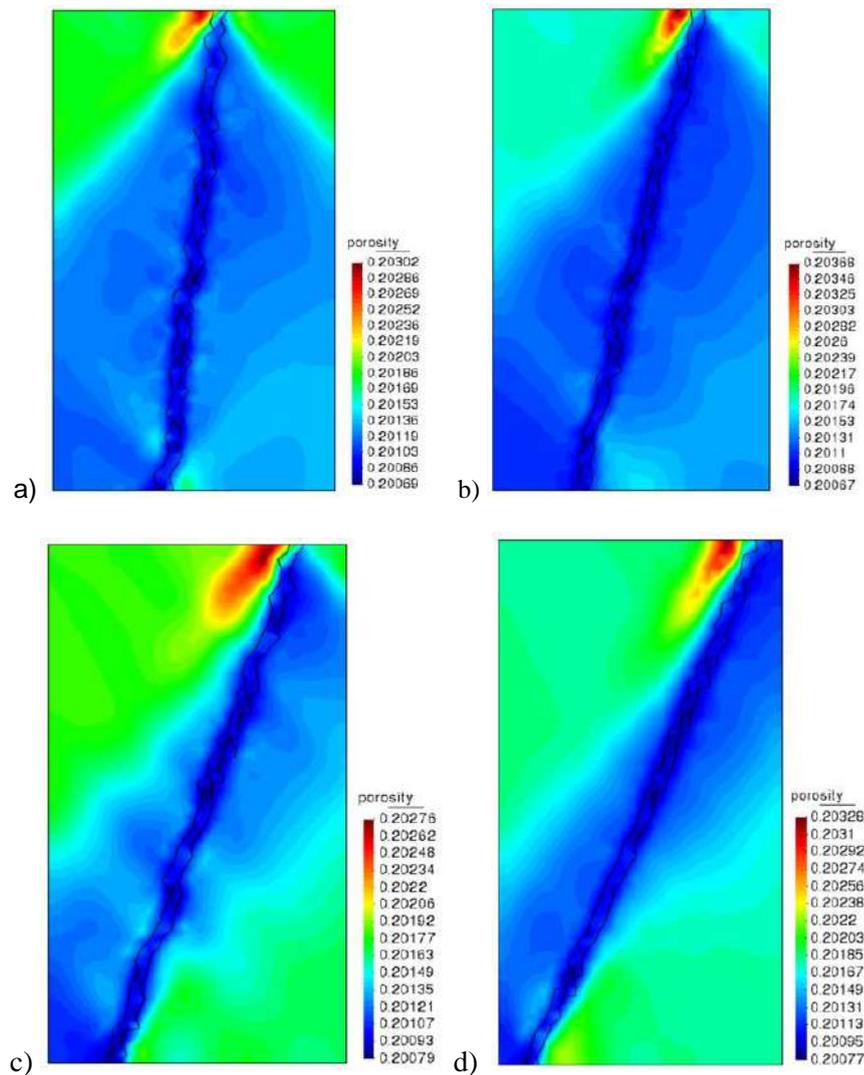


Fonte: O autor (2021)

### 5.1.3 POROSIDADE

Esse processo de cisalhamento e plastificação leva a uma resposta de dilatação do material que implica no aumento da porosidade nas zonas danificadas, conforme observado na Figura 18. Observa-se que as áreas que se encontram na zona de maior plastificação do material (alaranjada/avermelhada) apresentam o maior incremento de porosidade, caracterizando como uma tendência a um processo de dilatância, visto que a porosidade inicial da rocha é de 20,166 %.

Figura 18 - Porosidade do ensaio compressão uniaxial no tempo final de 25 min para: a) cenário 1 (inclinação da banda de 10°); b) cenário 2 (inclinação da banda de 20°); c) cenário 3 (inclinação da banda de 30°) e d) cenário 4 (inclinação da banda de 40°).



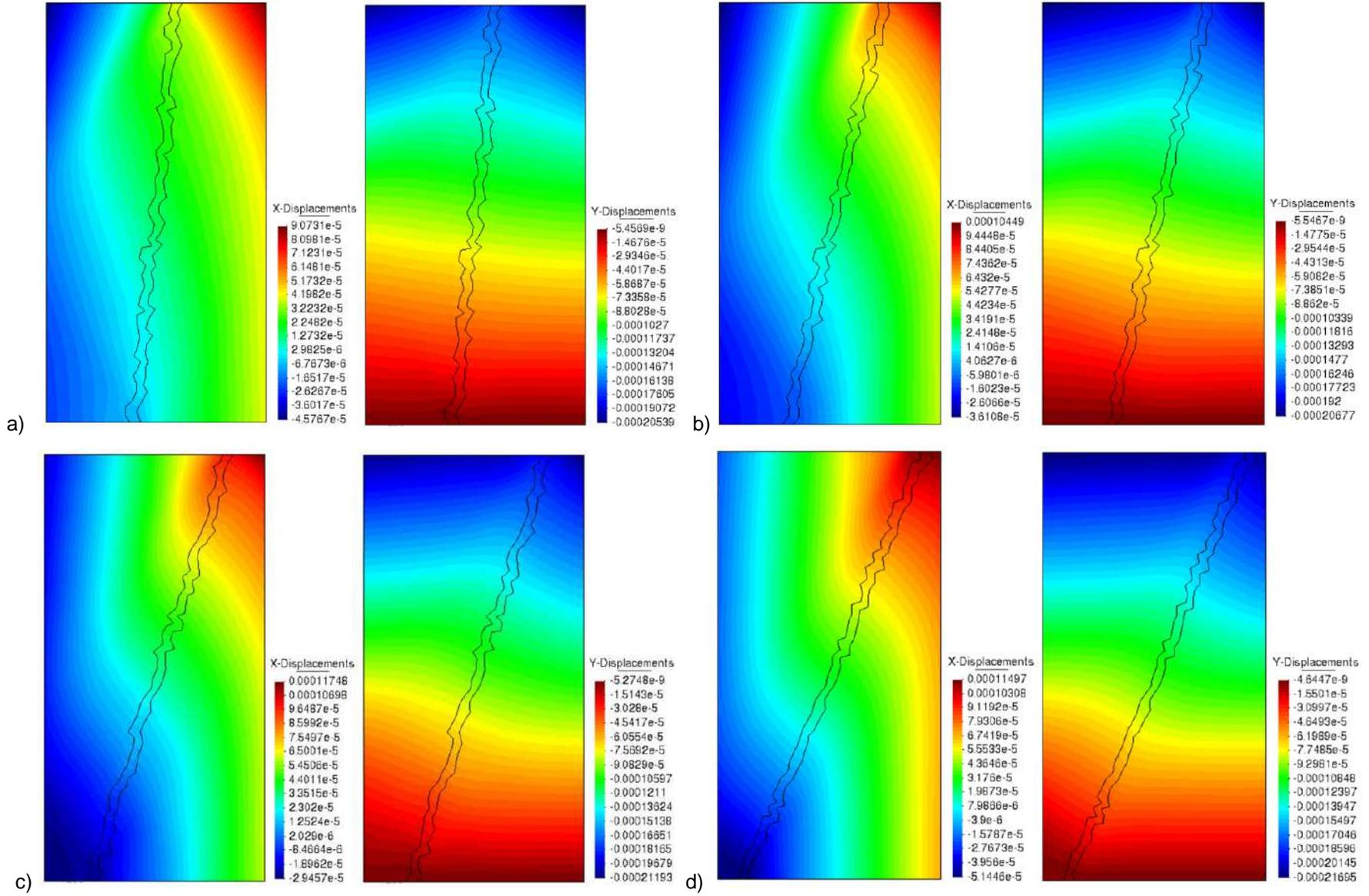
Fonte: O autor (2021)

#### 5.1.4 DESLOCAMENTOS

Fica evidente que as bandas de deformação controlam o comportamento mecânico da amostra e se apresentam como importantes elementos de heterogeneidade mecânica do meio. Isso fica visível também na Figura 19, através da distribuição dos deslocamentos horizontais e verticais para os cenários 1, 2, 3 e 4. Observa-se que há um padrão deformacional disperso, em ambas as direções, com controle realizado pelas bandas. A Figura 20 mostra isso de forma quantitativa, através das medidas de deslocamentos verticais no topo das amostras, colocados de forma inversa para melhor entendimento do gráfico. Nela é possível ver uma forte descontinuidade dos deslocamentos nas zonas onde as bandas estão localizadas. Neste caso, observa-se

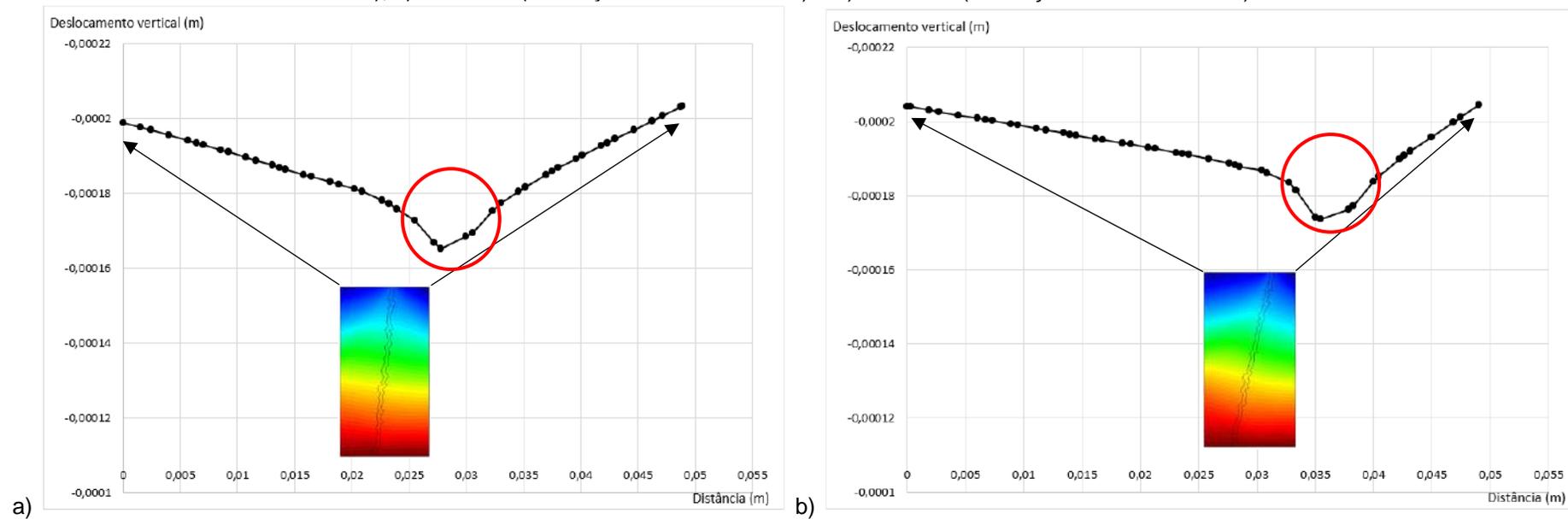
um salto no campo de deslocamentos entre a parte contínua e a descontínua (onde as bandas estão indicadas por círculos vermelhos), indicando menores deslocamentos nas regiões descontínuas. Percebe-se também que à medida que a banda vai aumentando o seu grau de inclinação, menor a resistência ao deslocamento no topo da amostra.

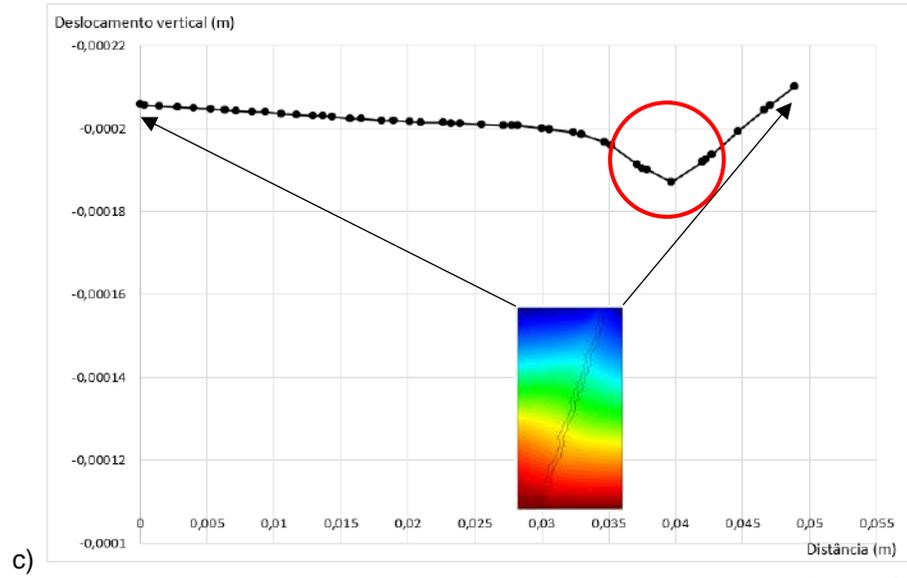
Figura 19 - Deslocamentos na direção do eixo x (X-Displacements) e y (Y-Displacements) em metros para tensão confinante de 35 MPa no tempo final de 25 min: : a) cenário 1 (inclinação da banda de 10°); b) cenário 2 (inclinação da banda de 20°); c) cenário 3 (inclinação da banda de 30°) e d) cenário 4 (inclinação da banda de 40°).



Fonte: O Autor (2021)

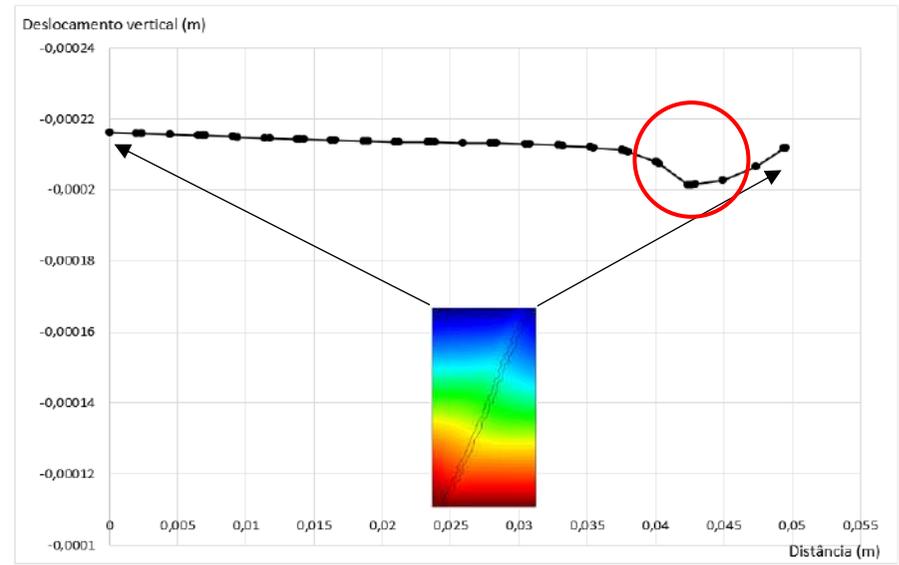
Figura 20 - Medidas de deslocamento vertical no topo da amostra no tempo final de 25 min: a) cenário 1 (inclinação da banda de 10°); b) cenário 2 (inclinação da banda de 20°); c) cenário 3 (inclinação da banda de 30°) e d) cenário 4 (inclinação da banda de 40°).





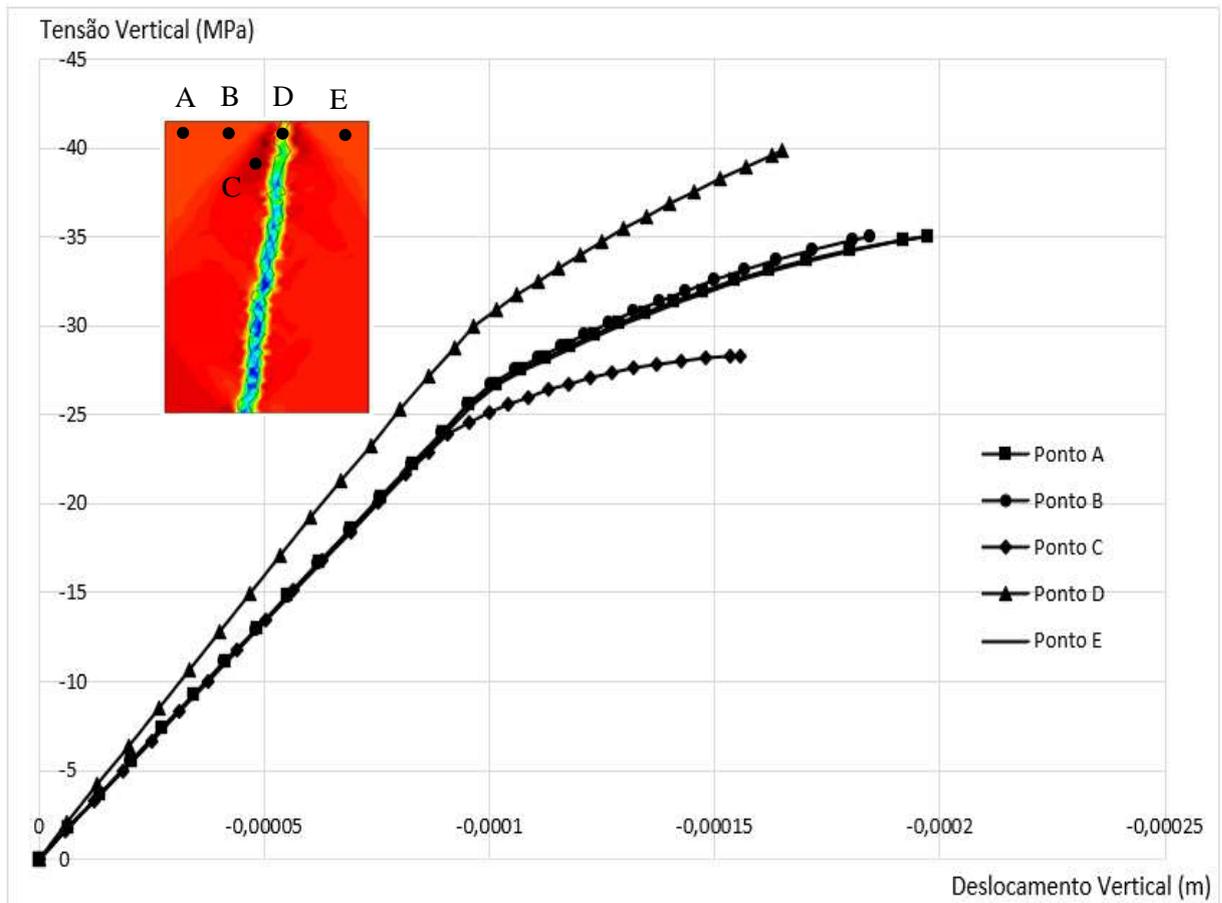
d)

Fonte: O autor (2021)



As Figuras 21, 22, 23 e 24 apresentam a variação do deslocamento vertical em função da tensão vertical ( $y$ ) em pontos específicos para os cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Observa-se primeiramente na Figura 21 (cenário 1 de banda com inclinação de  $10^\circ$ ) que os pontos A, B e E apresentam comportamentos similares, pois encontram-se afastados da banda (zona com maior resistência), atingindo uma tensão vertical de aproximadamente 35 MPa. Já o ponto C, apresenta menor tensão vertical de 28 MPa, situado na zona de maior plastificação do material, onde efeito cisalhante é mais expressivo. O ponto D, em virtude de apresentar-se no interior da banda, mostra um comportamento mecânico de maior resistência, atingindo uma tensão vertical de 40MPa, nesta região há uma menor plastificação, porém se torna o ponto de concentração de tensões e de geração e propagação dos pares conjugados de cisalhamento. Destaca-se que, inicialmente, todos os pontos mostram uma resposta de deformação elástica, ou seja, há inicialmente uma contração da rocha e, após o início das deformações plásticas cisalhantes, as deformações começam um processo de plastificação evidenciando que as tensões excederam o limite elástico. Porém, as análises não apresentam a completa ruptura do material conforme pode ser observado nas curvas tensão deformação.

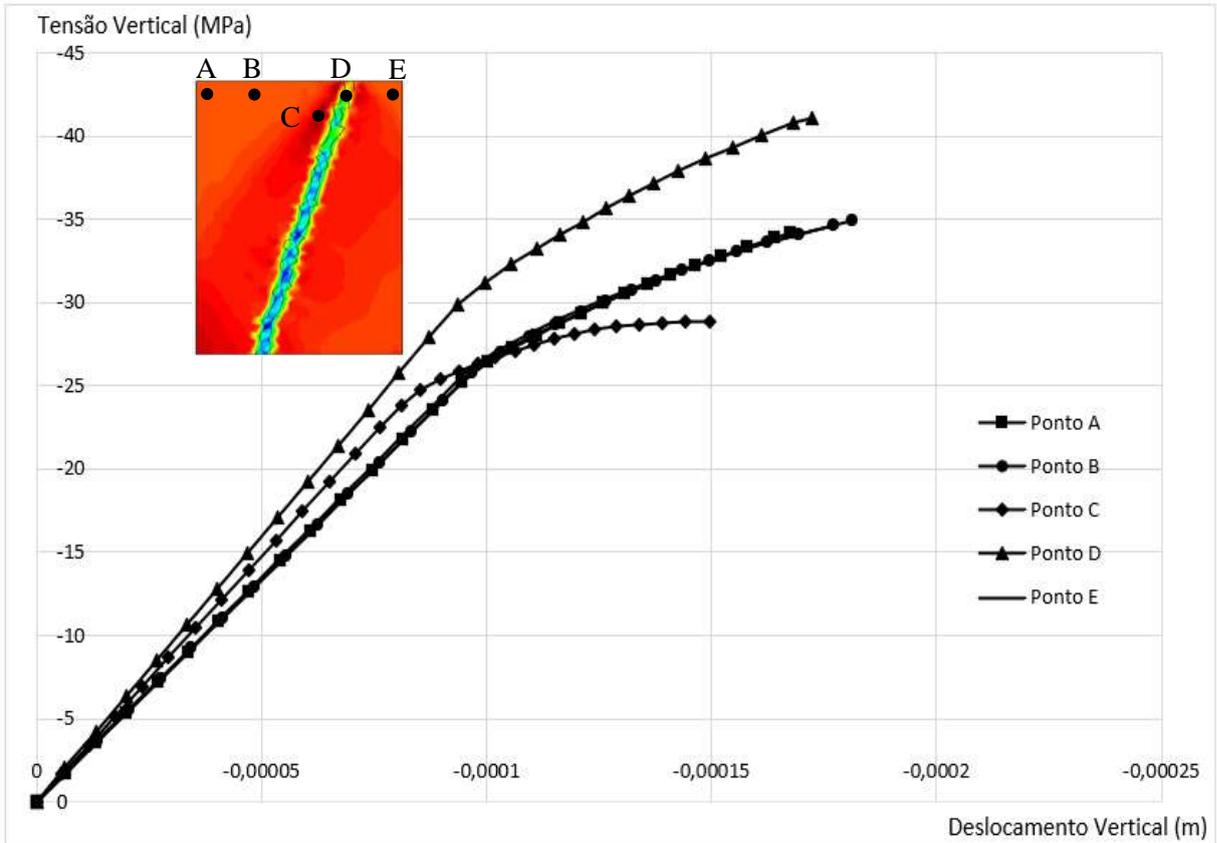
Figura 21 - Variação do deslocamento vertical em função da tensão vertical ( $\gamma$ ) em pontos específicos para o cenário 1 (inclinação da banda de  $10^\circ$ ).



Fonte: O autor (2021)

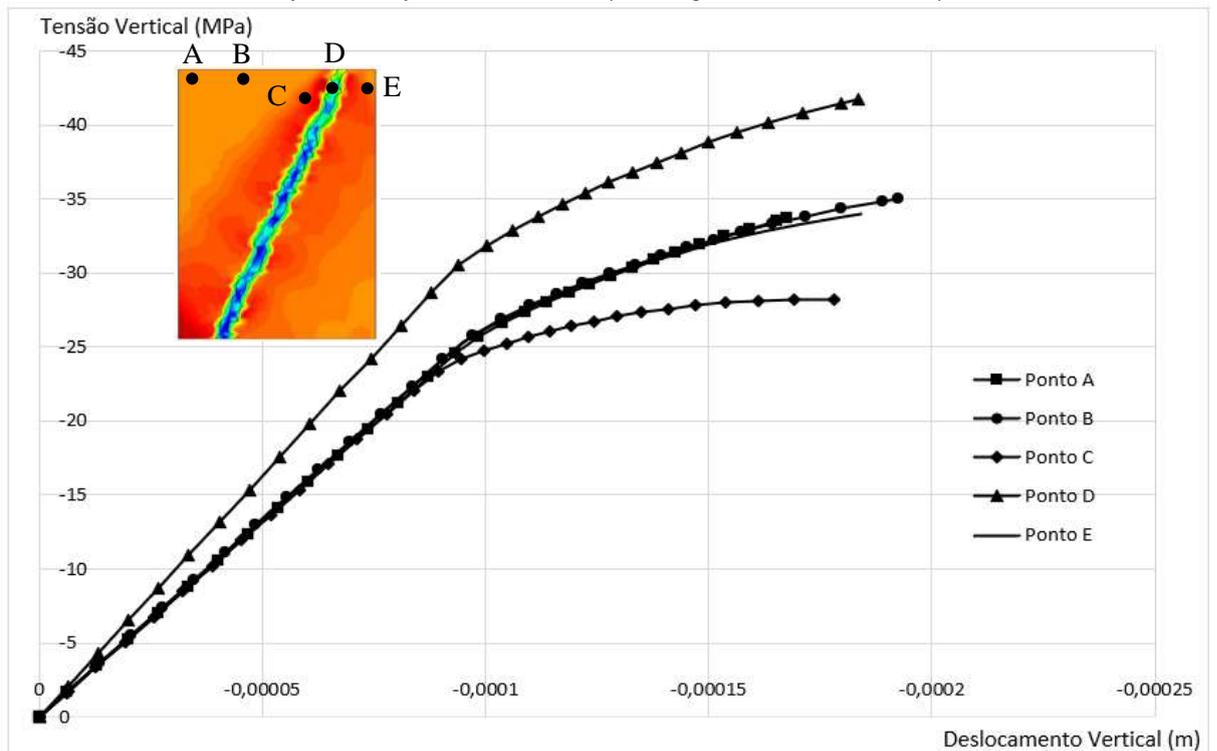
Nas Figuras 22 e 23, os pontos A, B e E apresentam também comportamentos similares, mesmo comportamento desses mesmos pontos na Figura 21, isso se dá pelo distanciamento da banda aos pontos. O ponto C também apresentou a menor resistência ao deslocamento, com tensão vertical para este cenário de aproximadamente 28 MPa e o ponto D apresentou maior resistência atingindo tensão vertical de 42 MPa, esse comportamento explica-se pelo ponto encontrar-se localizado no interior da banda e claramente apresentou resistência ao cisalhamento superior aos outros pontos.

Figura 22 - Variação do deslocamento vertical em função da tensão vertical ( $\gamma$ ) em pontos cenário 2 (inclinação da banda de 20°).



Fonte: O autor (2021)

Figura 23 - Variação do deslocamento vertical em função da tensão confinante ( $\gamma$ ) em pontos específicos para o cenário 3 (inclinação da banda de 30°).

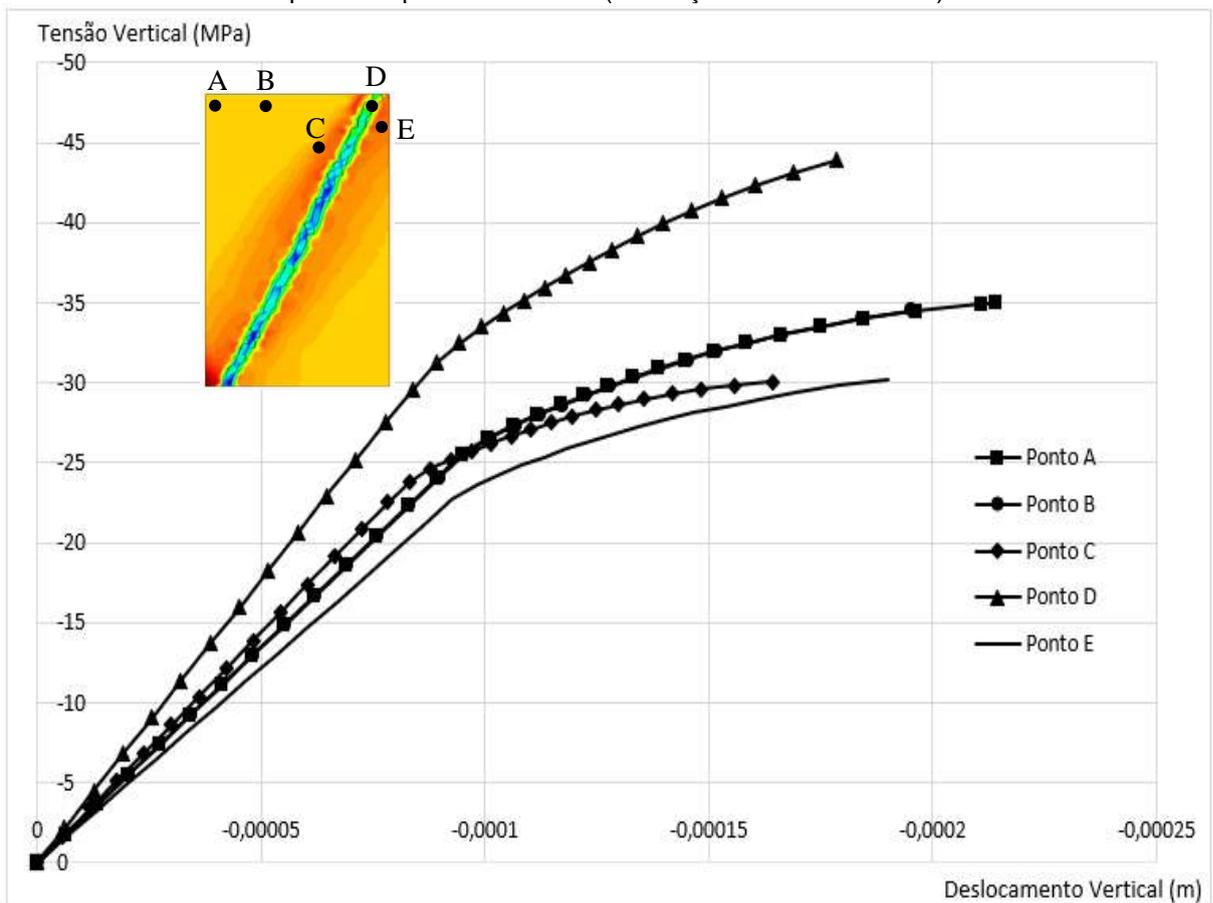


Fonte: O autor (2021)

O Figura 24 traz uma análise mais interessante sobre os pontos marcados, pois a banda se encontra com uma inclinação de  $40^\circ$  e o ponto E sofreu grande influência da mesma. Observa-se na Figura 24, que o ponto E foi o que plastificou mais rapidamente, com uma tensão vertical de aproximadamente 30 MPa. Além disso, os pontos A e B de menor resistência ao deslocamento, apresentam uma resposta mais significativa para esta Figura, devido ao que foi relatado anteriormente, que quando maior a inclinação da banda, menor a resistência do material ao qual ela está inserida.

O ponto C teve comportamento parecido para todas as Figuras 21, 22, 23 e 24, sendo o que plastificou mais rapidamente, necessitando de uma menor influência da tensão vertical. Os pontos A, B e D também obtiveram mesmo comportamento para todos os Gráficos. Esses comportamentos reafirmam o quanto as bandas de deformação controlam o comportamento mecânico dos materiais, influenciando diretamente nos resultados obtidos nas Figuras apresentadas.

Figura 24 - Variação do deslocamento vertical em função da tensão confinante ( $\gamma$ ) em pontos específicos para o cenário 4 (inclinação da banda de  $40^\circ$ ).



Fonte: O autor (2021)

## 5.2 CENÁRIOS REAIS COM BASE EM AFLORAMENTO

Vale ressaltar que os cenários reais foram baseados no afloramento caverna descrito por Oliveira (2019), mencionado anteriormente neste trabalho no item 2.1.

### 5.2.1 COMPORTAMENTO DAS TENSÕES

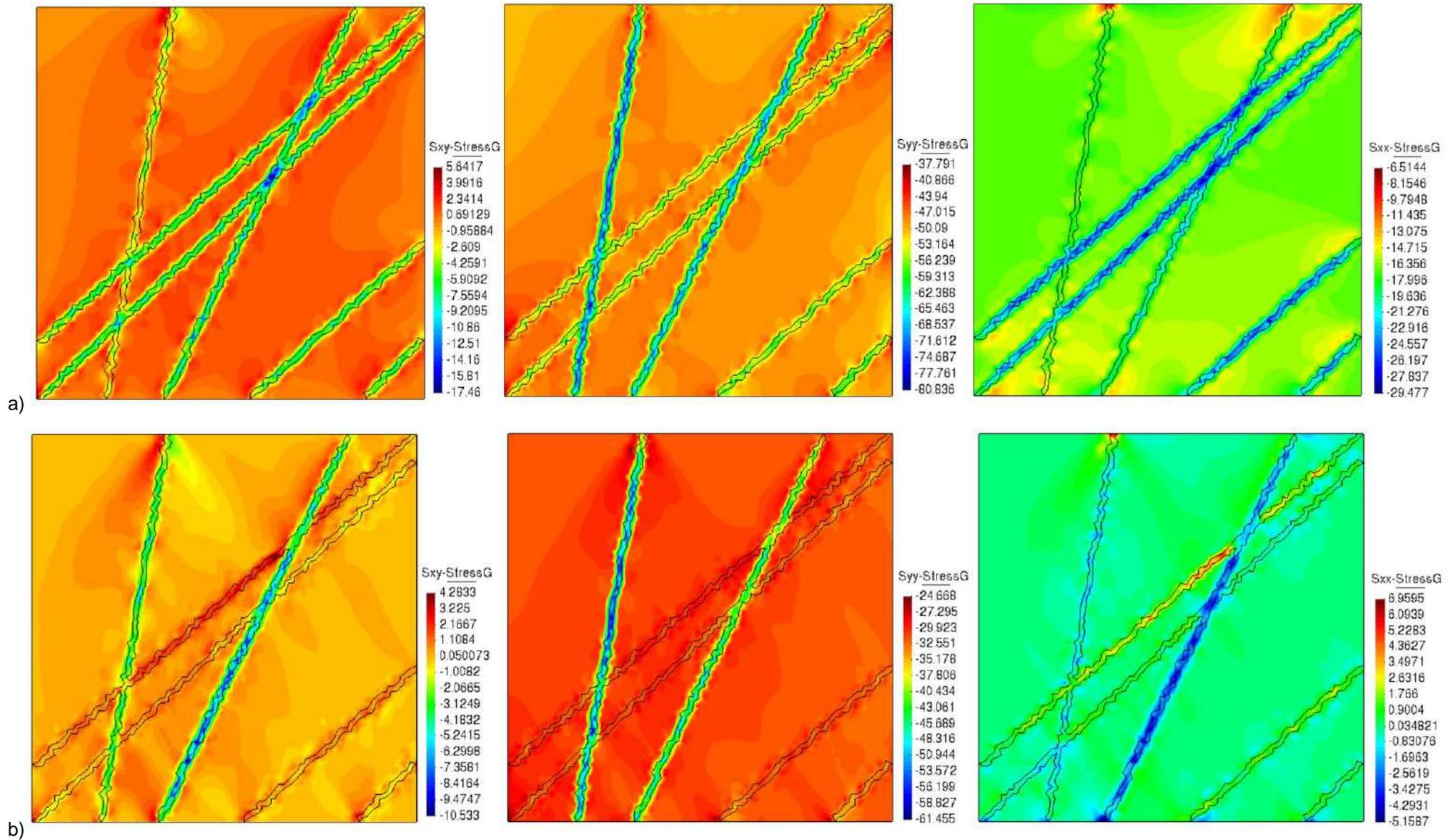
Na Figura 25, observa-se a distribuição das tensões cisalhantes ( $S_{xy}$ ) e das tensões normais (x e y) para o cenários 1 e 2 baseados em afloramentos. Sendo o cenário 1, sofreu a aplicação de uma tensão máxima  $\sigma_H$  de 50 MPa e tensão mínima  $\sigma_h$  de 17 Mpa, simulada a um espaço de tempo de aproximadamente 1 ano. Já o cenário 2, é o maciço rochoso é submetido a uma tensão vertical de  $\sigma_1$  50 MPa (diferente da primeira em que foi aplicado  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ ) simulada a um espaço de tempo de aproximadamente 297 dias, pouco tempo após o material entrar na fase de cisalhamento, no qual será analisado para este cenário, com base na influência da tensão vertical. Para as tensões cisalhantes verifica-se uma concentração maior no cruzamento das bandas e no entorno delas, mas com uma intensidade um pouco menor próximo a banda.

Para o cenário onde há a consideração de tensões horizontais confinantes, observa-se que há uma importante concentração do cisalhamento no cruzamento entra as bandas de deformação e nas suas terminações nas fronteiras do domínio. Já para o caso em que se assuma apenas a sollicitação desviadora em uma das direções e não sendo imposta uma tensão confinante horizontal no contorno lateral, verifica-se que o padrão de cisalhamento é completamente diferente, sendo similar às respostas observadas nos cenários de ensaios de compressão uniaxial, com a tendência de formação de zonas de dano cisalhantes secundárias na rocha intacta sendo estas derivadas das terminações das bandas. Verifica-se também que nessas condições, há uma concentração de tensões cisalhantes ao longo das bandas, mais pronunciadas em algumas delas a depender de sua direção. Desta forma, verifica-se a influência da tensão confinante, embora um estudo de sensibilidade seja mais adequado para uma melhor avaliação.

Com relação às tensões normais (x e y), verifica-se a concentração de tensões compressivas nas bandas, em especial nas mais verticalizadas para a tensão ( $S_{yy}$ ) e para as mais horizontalizadas no casos da tensão  $S_{xx}$ , o que é consistente com as respostas observadas nas análises dos cenários de ensaio de compressão uniaxial. Este padrão ocorre para ambos os casos, porém, verifica-se que no caso confinado

(cenário 1) todo o meio ainda se apresenta sob um regime compressivo em termos de tensões normais, enquanto que para o cenário sem tensão horizontal confinante (cenário 2), há a formação de zonas de tração quanto à tensão horizontal indicando potencial ruptura à tração na rocha e em regiões de algumas bandas.

Figura 25 - Distribuição das tensões cisalhantes ( $S_{xy}$ ), na direção do eixo y ( $S_{yy}$ ) e na direção do eixo x ( $S_{xx}$ ) em MPa: a) cenário 1 e b) cenário 2.

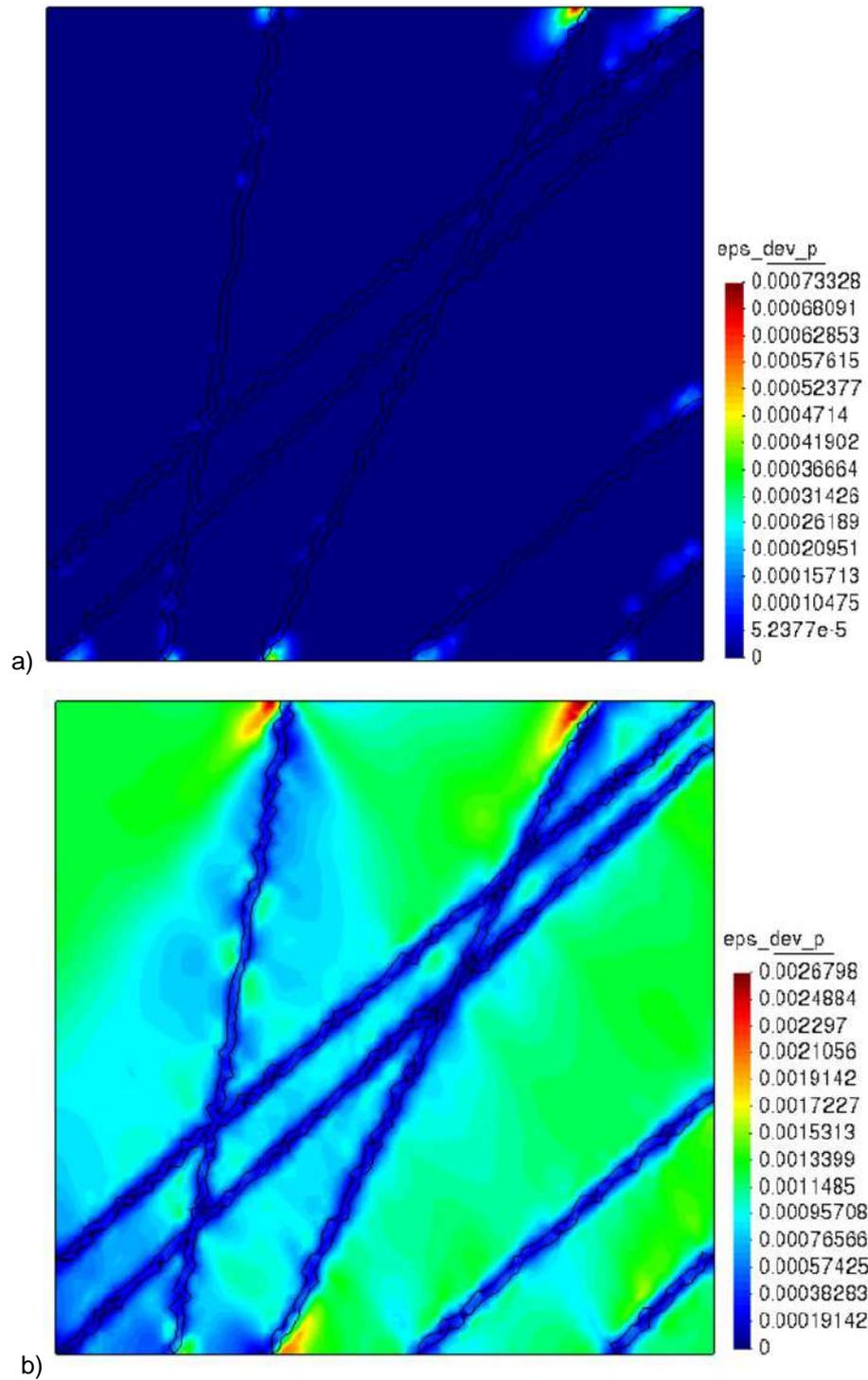


Fonte: O autor (2021)

### 5.2.2 DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS CISALHANTES

A distribuição das deformações plásticas cisalhantes encontra-se exposta Figura 26. Verifica-se que para o cenário 1, considerando a existência de tensões confinantes, o maciço apresenta ainda uma resposta elástica, porém com alguns pontos com localização de plastificação, o que implica que o confinamento propicia uma maior resistência deformacional ao meio demandando um nível de esforço mais expressivo para que se leve à ruptura do material. Já para uma condição sem confinante, as deformações plásticas são observadas seguindo o mesmo padrão de resposta apresentado para as análises de ensaios de compressão uniaxial. Estas indicam a formação de zonas cisalhantes diagonalizadas em relação às bandas mais ortogonalizadas aos contornos do domínio, e com formação de zonas de dano cisalhante no entorno das bandas de deformação. Dada a densidade de bandas e a diversidade de orientações, percebe-se uma tendência de interligação das zonas de dano geradas no processo cisalhante induzido. Neste caso, pode-se ter uma alteração petrofísica e geomecânica dispersa e heterogênea para o maciço rochoso. Tal condição poderia ser observada ao se contemplar um modelo de plasticidade com lei de *hardening/softening*, o que consiste em uma limitação desta análise ao se considerar plasticidade perfeita.

Figura 26 - Deformações plásticas cisalhantes de ensaio compressão uniaxial no tempo final para: a) cenário 1 e b) cenário 2.



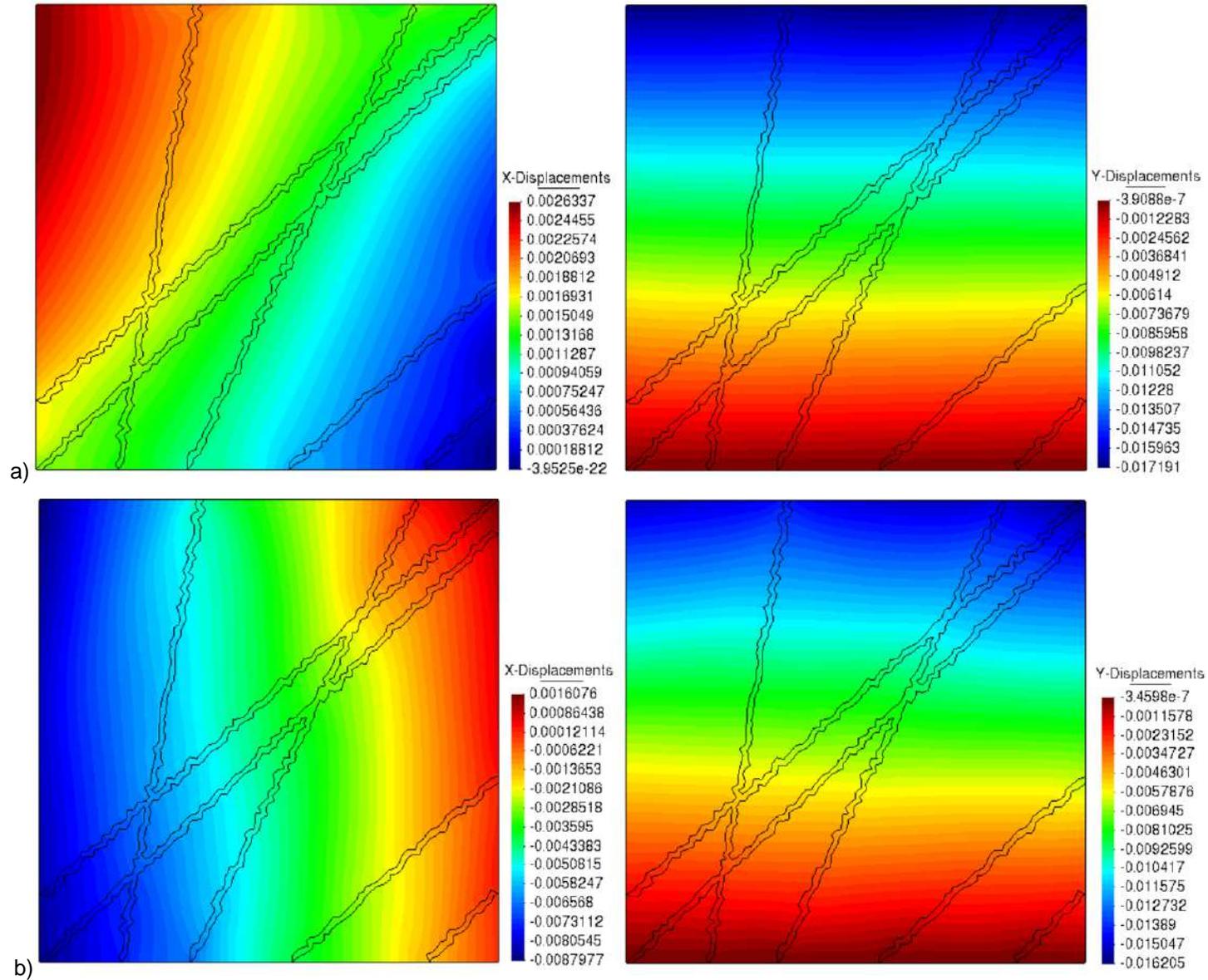
Fonte: O autor (2021)

### 5.2.3 DESLOCAMENTOS

É comprovado que as bandas de deformação controlam o comportamento mecânico das rochas e se apresentam como importantes elementos de heterogeneidade mecânica do meio, como já analisado nos cenários amostrais de ensaios de compressão uniaxial. Esse controle do comportamento mecânico fica perceptível na Figura 27, se observado a distribuição dos deslocamentos horizontais e verticais para os cenários 1 e 2. Observa-se um padrão deformacional disperso, em ambas as direções, com controle feito pelas bandas, o mesmo padrão para os casos amostrais.

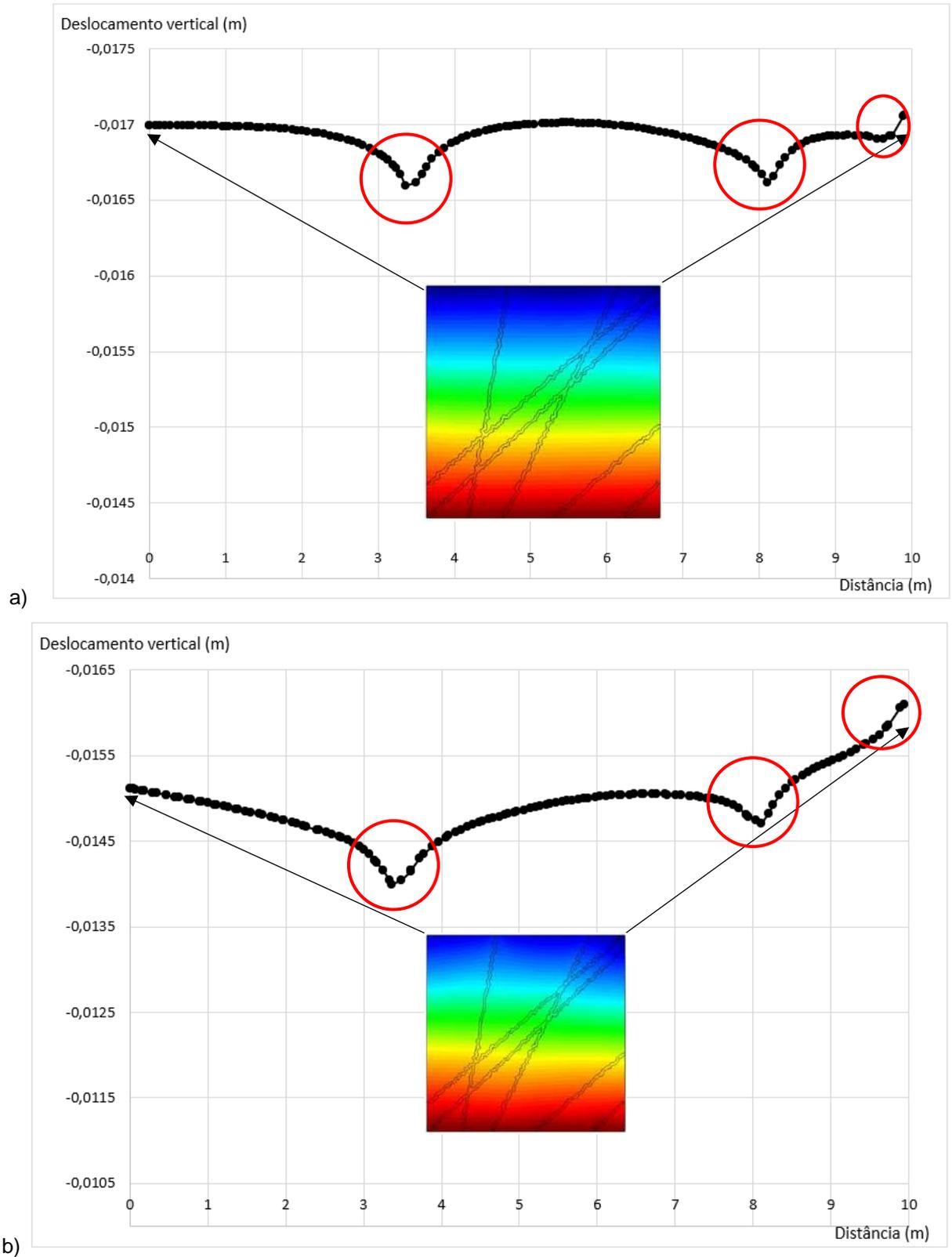
A Figura 28 apresenta as medidas de deslocamentos verticais no topo das amostras de forma quantitativa. Nesta figura é possível ver uma descontinuidade maior dos deslocamentos nas zonas onde as bandas estão localizadas. (áreas destacadas por círculos vermelhos). Com isso, observa-se uma discrepância no campo de deslocamentos entre a parte com e sem a presença de bandas, o que mostra o quão resistente estas bandas são em comparação ao material aos quais estão introduzidas.

Figura 27 - Deslocamentos na direção do eixo x e y em metros no tempo final: : a) cenário 1 e b) cenário 2.



Fonte: O autor (2021)

Figura 28 - Medidas de deslocamento vertical no topo da amostra no tempo final: a) cenário 1 e b) cenário 2.

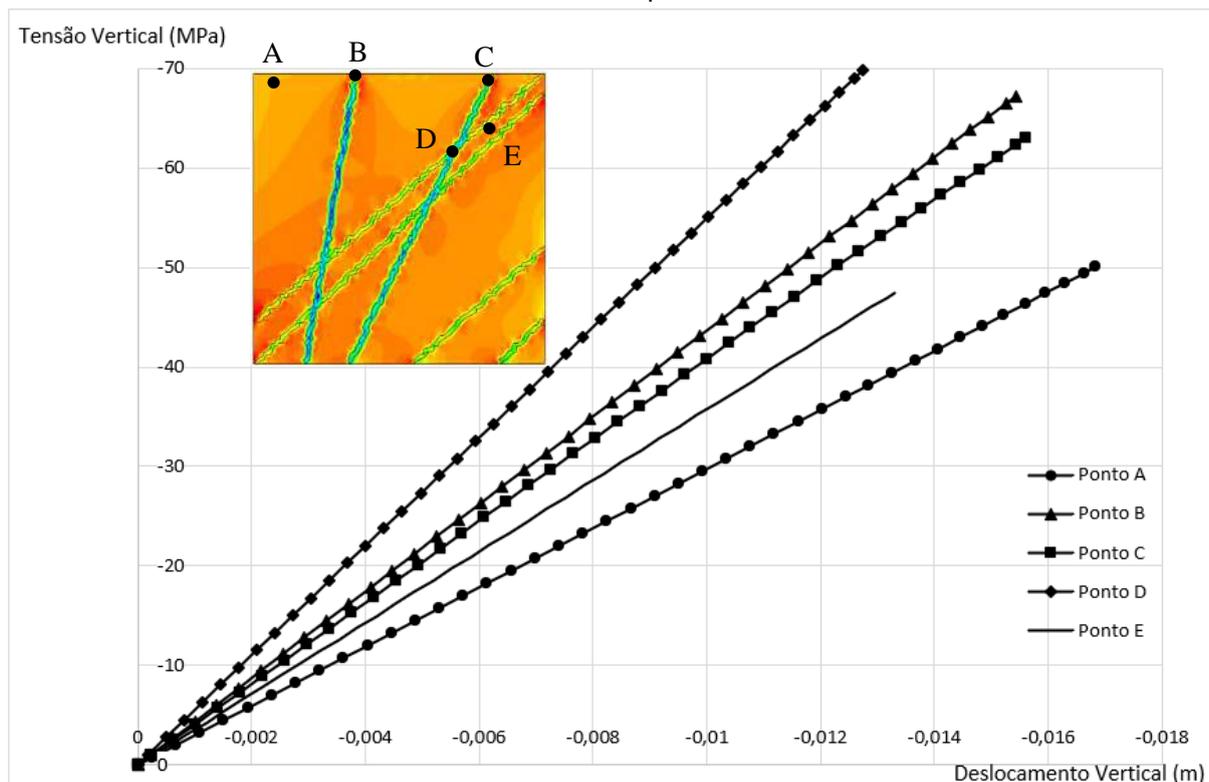


Fonte: O autor (2021)

As Figuras 29 e 30 retratam uma variação do deslocamento vertical em função da tensão vertical ( $y$ ) em pontos específicos para os cenários 1 e 2, analisados.

Inicialmente, para a Figura 29, foi estudado o ponto A, que se encontra mais afastado das bandas, e conseqüentemente sofre menos influência das mesmas, fato este comprovado pelo comportamento no qual este ponto apresenta. Já os pontos B e C mostram maior resistência ao deslocamento, devido estarem situados no interior das bandas. Suas declividades implicam em um módulo elástico elevado em relação às resposta tensão deformação dos demais. O ponto D teve um dos comportamentos mais resistentes e interessantes de serem analisados, pois está localizado no cruzamento entre bandas e pode-se afirmar através da sua resposta ao deslocamento que essa zona no qual ele está situado é uma zona de maior resistência ao deslocamento, se comparado até mesmo com os pontos que estão no interior das bandas (B e C). Porém, é importante destacar que os cruzamentos entre bandas tendem a apresentar maior concentração de cisalhamento conforme observado nas análises de tensões e o processo de ruptura pode ter um caráter mais abrupto. O ponto E, por estar entre bandas, obteve uma resistência ao deslocamento maior apenas do que o ponto A. Todos os pontos revelam uma resposta de deformação, o que comprova o processo de contração da rocha. O Figura 29 mostra que os resultados da resposta tensão deformação do maciço rochoso, para o cenário com tensões confinantes, indica um comportamento elástico.

Figura 29 - Variação do deslocamento vertical em função da tensão vertical ( $\gamma$ ) em pontos específicos para o cenário 1 no tempo final de 1 ano.

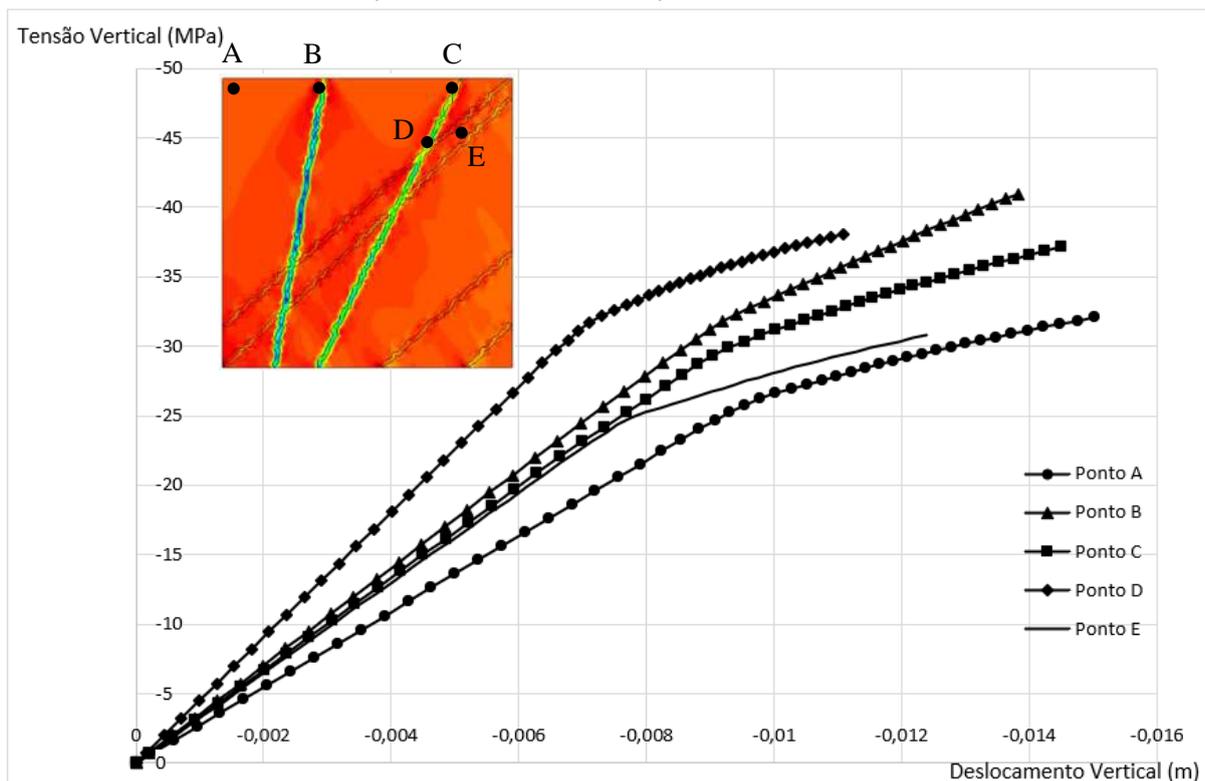


Fonte: O autor (2021)

Na Figura 30, que corresponde às respostas tensão deformação para o cenário

sem tensão confinante, percebe-se uma resposta elastoplástica para todos os pontos observados, no ponto A o material plastifica de forma prematura se comparado aos outros pontos. O ponto E tende a uma resposta elástica similar aos pontos B e C, mas com uma resposta de plastificação mais rápida exigindo um nível de tensão inferior. O ponto D (cruzamento entre bandas) também apresenta maior rigidez dada a declividade da curva tensão deformação, porém entre no processo de plastificação de forma mais antecipada que os demais pontos uma vez que esta região é a que se observou forte concentração de tensões cisalhantes. Os pontos B e C apresentaram respostas elásticas similares por serem relativos ao topo das bandas de deformação, porém, mostram uma evolução das deformações com as tensões com tendências divergentes, o que é claramente função da inclinação destas bandas.

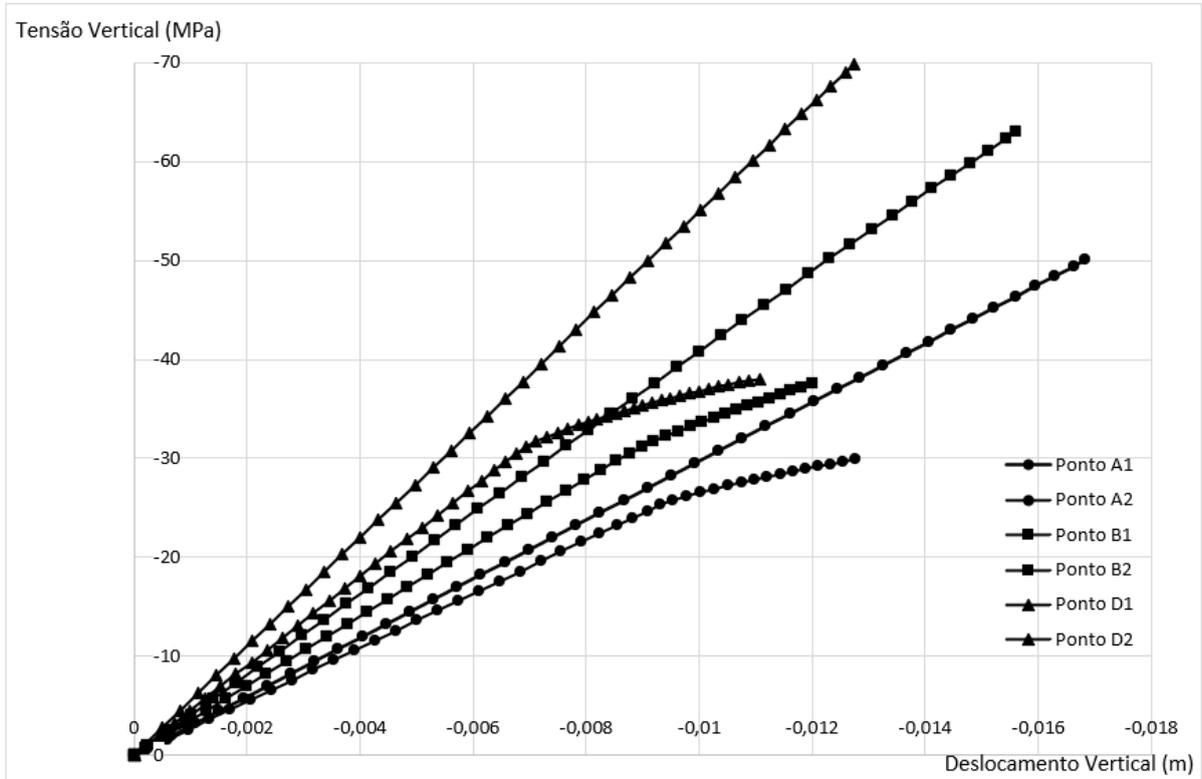
Figura 30 - Variação do deslocamento vertical em função da tensão confinante ( $y$ ) em pontos específicos para o cenário 2 no tempo final de 297 dias.



Fonte: O autor (2021)

A Figura 31 correlaciona os pontos A, B e D dos cenários 1 e 2. Neste caso pode-se observar que para mesmos valores de deslocamento, as respostas são distintas devido que para o cenário 1 tem-se a atuação de tensões confinantes e para o cenário 2 não há a atuação dessas tensões, assim o material responde de maneira elástica para o cenário 1 e elastoplástica para o cenário 2. Interessante observar que para ambos os casos as bandas de deformação atuam de forma semelhante, influenciando na resistência do material.

Figura 31 - Variação do deslocamento vertical em função da tensão confinante ( $\gamma$ ) nos pontos A, B e D para o cenário 1 e 2 no tempo final de cada.



Fonte: O autor (2021)

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as principais conclusões em relação a pesquisa realizada e algumas sugestões para pesquisas futuras que ajudariam a entender melhor os resultados apresentados anteriormente.

### 6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a influência mecânica das bandas de deformação em maciços rochosos com os dados da bacia do Rio do Peixe através da simulação de cenários de plug e de afloramento submetidos a determinados estados de tensões.

Primeiramente foram simulados 4 cenários de plug, baseados em ensaios de compressão uniaxial, onde a diferença entre estes cenários foi a inclinação da banda de deformação. Observou-se que a medida que o ângulo de inclinação aumenta, menor a influência da banda no material. Isso pode ser comprovado na comparação entre os cenários 1 (com inclinação de 10°) e 4 (com inclinação de 40°) em que observa-se que a influência da banda sobre a deformação plástica cisalhante na rocha diminui com o aumento da inclinação.

Para as tensões cisalhantes na direção vertical ( $S_{yy}$ ), observa-se com clareza a distribuição da tensão  $\sigma_1$  aplicada, em que mostra a capacidade da banda de absorver as tensões impostas sobre ela. Para a distribuição das tensões cisalhantes na direção horizontal ( $S_{xx}$ ), percebe-se menor influência sobre as bandas porque a tensão horizontal foi considerada nula em todos os cenários simulados (ensaio compressão uniaxial). Entretanto, observa-se uma maior distribuição no interior das bandas à medida que sua inclinação sofre um aumento. Assim, pode-se concluir que há a possibilidade de formação de microestruturas rúpteis encontradas no entorno das zonas de cisalhamento secundárias, fazendo com que ocorra uma formação de zonas de dano induzidas contemplando cisalhamento e microfraturas diagonalizadas a partir da banda, no caso de estruturas verticalizadas, ou formando a zona de dano paralela à banda quando o seu mergulho for mais acentuado.

Em relação aos cenários baseados em afloramento pode-se observar que para o cenário 1 no qual sofreu a aplicação de uma tensão máxima  $\sigma_H$  de 50 MPa e tensão mínima  $\sigma_h$  de 17 MPa, simulada a um espaço de tempo de aproximadamente 1 ano, considerando a existência de tensões confinantes, o maciço apresentou uma resposta elástica, porém com alguns pontos com localização de plastificação, que revela que o confinamento ocasiona uma maior resistência deformacional ao meio, exigindo um nível de esforço maior para que se ocorra a ruptura do material.

Para a segunda condição do cenário de afloramento sem tensão confinante, o maciço rochoso é submetido a uma tensão vertical de  $\sigma_1$  50 MPa simulada a um espaço de tempo de aproximadamente 297 dias. Foi analisado para este cenário, com base na influência da tensão vertical as deformações plásticas as quais seguiram o mesmo padrão de resposta parecidos aos apresentados para as análises de ensaios de compressão uniaxial a nível de plug. Para as tensões cisalhantes verificou-se uma concentração maior no cruzamento das bandas e no entorno delas, chegando à conclusão de que a região de cruzamento de bandas é a de maior resistência ao cisalhamento, por isso é a região que concentra maior tensão cisalhante.

Assim, a importância da análise desses cenários dá-se pelo fato de que poucos ainda são os estudos numéricos sobre a influência das bandas de deformação em maciços rochosos. Com isso, além de estudos mecânicos, com a simulação de maciços que sofrem a influência dessas estruturas, pode-se entender e prever o comportamento dessas bandas em rochas reservatório de hidrocarbonetos quando submetidas a diferentes estados de tensões.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões podem ser apresentadas para seguimento de trabalhos futuros:

- Realizar ensaios de compressão uniaxial e triaxial e realizar as simulações desses ensaios.
- Fazer um estudo mais aprofundado do melhor modelo numérico para simulações triaxiais.
- Utilizar método de elementos finitos para grandes deformações.
- Fazer análise de amostras com bandas em diferentes bacias estratigráficas.
- Analisar amostras com bandas em direções distintas.
- Realizar um estudo de sensibilidade para o cenário de afloramento.

## REFERÊNCIAS

- ANASTASOPOULOS, I. *et al.* Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 133, n. 8, p. 943–958, 2007. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0241%282007%29133%3A8%28943%29>>. Acesso em: 20 abril de 2021.
- AYDIN, A. Small faults formed as deformation bands in sandstone. *Pure and Applied Geophysics*, 1978.
- ARAÚJO, A. I. P. **Simulação de geração e propagação de fraturas em rochas empregando técnicas especiais em elementos finitos**. 2019. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
- AZEVEDO, F. S. Estudo Experimental da Influência de Tensões na Permeabilidade de Rochas Produtoras de Petróleo. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2005.
- ANTONELLINI, M. A.; AYDIN, A.; POLLARD, D. D. Microstructure of deformation bands in porous sandstones at Arches National Park, Utah. *Journal of Structural Geology*, v. 16, p. 941-959, 1994.
- ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 371–389, 2007.
- Al-Harthy, S. S.; Dennis, J.; Jing, X. D.; Marsden, J. R. **Petrophysical Properties Under True-Triaxial Stress For Hydrocarbon Recovery Prediction**. SPE 39770, Society of Petroleum Engineers, March 1998a.
- ABBO, Andrew John. **Finite element algorithms for elastoplasticity and consolidation**. 1997. Thesis (PhD) - University of Newcastle, Newcastle, 1997.
- BISHOP, A.W. (1966). The strength of soils as engineering materials. *Geotechnique*, Vol 16, pp. 91-128.
- BESERRA, L. B. S. **Implementação de algoritmos de integração implícita para modelos constitutivos elasto-plásticos na simulação geomecânica**. 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- BESERRA, L. B. S. **Análise Hidromecânica do Fraturamento Hidráulico via Elementos Finitos com Descontinuidades Fortes Incorporadas**. 2015. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- COSTA C. F. G. Desenvolvimento de um sistema de monitoração e controle para ensaios triaxiais de solo. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. 2008.
- CHEN, W. F. (1975). *Limit Analysis and Soil Plasticity*. Elsevier Scient. Publ. Co.,

Amsterdam, Vol. 7, 1975, 638 p.

COSTA, A. B. S.; CÓRDOBA, V. C.; JARDIM DE SÁ, E. F. Diagenesis and Provenance of the Sandstones of the Rift Tectonosequence of Araripe and Rio do Peixe basins, NE Brazil. 2010, Lisbon: [s.n.], 2010. p. 60–64. DA SILVA, Ajosenildo Nunes. *Arquitetura, Litofácies E Evolução Tectono- Nordeste Do Brasil* *Arquitetura, Litofácies E Evolução Tectono- Estratigráfica Da Bacia Do Rio Do Peixe, Nordeste Do Brasil*. 2009. 2009.

DRUCKER, D.C.; PRAGER, W. (1952). Soil Mechanics and Plasticity Analysis on Limit Design. *Quarterly of Appl. Math*, Vol. 10, pp. 157-165.

DE CASTRO, D. L.; CASTELO BRANCO, R. M G. Caracterização da arquitetura interna das bacias do vale do cariri (NE do Brasil) com base em modelagem gravimétrica 3-D. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 17, n. 2–3, p. 128–143, 1999.

Fachri, M., Tveranger J., Cardozo, N., Pettersen O., 2011, The impact of fault envelope structure on fluid flow: A screening study using fault facies: *AAPG Bulletin*, v. 95, no. 4, p. 619–648

FAULKNER, D. R.; JACKSON, C. A. L.; LUNNR, J.; SCHLISCHE, R. W.; SHIPTON, Z. K.; WIBBERLEY, C. A. J. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow of fault zones. *Journal of Structural Geology*, v. 32, p. 1557-1575, 2010.

Fossen, H.; Schultz, R.; Shipton, Z.K.; Mair, K. Deformation bands in a sandstone e a review. *Journal of the Geological Society*. v. 164, p. 755-769, 2007.

FRANÇA P. T. Estudo do comportamento de túneis análise numérica tridimensional com modelos elasto-plásticos. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia. 2006.

GENS, A. *et al.* Modelling thermo-hydro-mechano-chemical interactions for nuclear waste disposal. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 2, n. 2, p.97–102, 2010.

GADDE, M.M.; RUSNAK, J.A. Applicability of Drucker-Prager failure criterion to estimate polyaxial rock strength. 42<sup>nd</sup> U.S. Rock Mechanics Symposium and 2<sup>nd</sup> U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium. San Francisco, 2008.

HOLCOMB, D.; RUDNICKI, J. W.; ISSEN, K. A.; STERNLOF, K. Compaction localization in the Earth and the laboratory: state of the research and research directions. *Acta Geotechnica*, v. 2, p. 1-15, 2007.

HILL, R. **The Mathematical Theory of Plasticity**. Oxford: Oxford University Press Inc., 1998.

JAEGER, J. C.; COOK, N. G. W. W.; ZIMMERMAN, R. W. **Fundamentals of Rock**

**Mechanics**. 4th. ed. Malden: Blackwell Publishing, 2007.

LIU, Jingshou *et al.* Quantitative Prediction of Lower Order Faults Based on the Finite Element Method: A Case Study of the M35 Fault Block in the Western Hanliu Fault Zone in the Gaoyou Sag, East China. **Tectonics**, [s. l.], v. 37, n. 10, p. 3479–3499, 2018.

LINS, C. *et al.* Numerical and Experimental Analysis of Horizontal Stress Modified Oedometer Cell. **Soil and Rocks**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 19–27, 2016.

LOBATO, K. C. R. Simulação Física e Numérica de Problemas de Estabilidade de Poços. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO. 2009

MANZOLI, O. L.; SHING, P. B. A general technique to embed non-uniform discontinuities into standard solid finite elements. **Computers & Structures**, [s. l.], v. 84, n. 10–11, p. 742–757, 2006. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794905003871>>. Acesso em: 10 abril de 2021.

MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITONEVES, B. B. Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. [S.l.]: Editora Beca, 2004.

MARAGON M. Mecânica dos solos II. Resistência ao Cisalhamento dos solos. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2018

MEDEIROS, C. E. B. MODELAGEM NUMÉRICA DE ZONAS DE FALHAS UTILIZANDO O MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2020

MORAES, Anderson. **MECÂNICA DO CONTÍNUO PARA A GEOLOGIA ESTRUTURAL**. 2ª ed. São Paulo: PerSe, 2016.

NEVITT, Johanna M.; POLLARD, David D. Impacts of off-fault plasticity on fault slip and interaction at the base of the seismogenic zone. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 44, n. 4, p. 1714–1723, 2017.

NABAVI, Seyed Tohid *et al.* Analysis of transpression within contractional fault steps using finite-element method. **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 96, p. 1–20, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191814117300135>>. Acesso em: 20 abril de 2021.

NICCHIO, M. A. Origem e evolução de bandas de deformação do tipo filossilicáticas e influência sobre as propriedades petrofísicas em arenitos grossos da Bacia do Rio do Peixe, NE, Brasil. Dissertação de mestrado. 2017.

OLIVEIRA, L. S. B. Estratigrafia mecânica e análise estrutural aplicadas ao estudo de bandas de deformação na Bacia Rio do Peixe, NE Brasil. Dissertação de Mestrado. 2019.

OLIVELLA, S. *et al.* Numerical formulation for a simulator (CODE\_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. **Engineering Computations**, [s. l.], v. 13, n. 7, p. 87–112, 1996.

OLIVELLA, Xavier; BOSCH, Carlos Agelet de Saracíbar. **Mecánica de medios continuos para ingenieros**. 2nd. ed. Barcelona: Edicions UPC, 2002.

OLIVEIRA, A. D. Análise das Alterações Físico-Químicas Decorrentes de Ensaio de Dissolução em Rochas Carbonáticas Sintéticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2016.

PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3 edição. 2006.

<https://document.onl/documents/curso-basico-mecanica-dos-solos-carlos-de-souza-pintopdf.html>

PIMENTA M. M.; ZINGANO A. C.; CARDOZO F. A. C.; Comportamento de Rochas Sob Carregamento Cíclico em Ensaio de Compressão. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas – SBMR 2016.

PONTES C. C. C., NOGUEIRA F. C. C., BEZERRA F. H. R., BALSAMO F., MIRANDA T. S., NICCHIO M. A., SOUZA J. A. B. e CARVALHO B. R. B. M. Petrophysical properties of deformation bands in high porous sandstones across fault zones in the Rio do Peixe Basin, Brazil. 2019.

REDDY, J. N. **An Introduction to Continuum Mechanics**. 2nd. ed. New York: Cambridge University Press, 2013.

SOUZA NETO, Eduardo A. *et al.* **Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications**. Chichester: Wiley, 2008.

SIMO, J. C.; OLIVER, J.; ARMERO, F. An analysis of strong discontinuities induced by strain-softening in rate-independent inelastic solids. **Computational Mechanics**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 277–296, 1993. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF00372173>>

SCHÖPFER, Martin P. J.; CHILDS, Conrad; WALSH, John J. Two-dimensional distinct element modeling of the structure and growth of normal faults in multilayer sequences: 2. Impact of confining pressure and strength contrast on fault zone geometry and growth. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 112, n. B10, p. B10404, 2007. b. Disponível em:

<<http://doi.wiley.com/10.1029/2006JB004903>>. Acesso em: 20 abril de 2021.

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>>.

TEIXEIRA G. M.; LIMA L. G. B. S. e TORO J. M. F. Aplicaciones Mecánicas de la ley constitutiva de Drucker Prager. Jornada de Mecánica Computacional Sociedad Chilena

Pucón – Chile 2009.

VALDERRAMA, J. O. e ASSIS, A. P. Modelagem do comportamento e fraturamento de rochas em compressão triaxial usando modelo de mecanismo de dano. Dissertação de mestrado em geotecnia. Universidade de Brasília, 2018.