



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

CARLOS EDUARDO BESSA DE MEDEIROS

**MODELAGEM NUMÉRICA DE ZONAS DE FALHAS UTILIZANDO O MÉTODO  
DOS ELEMENTOS FINITOS**

Recife

2020

CARLOS EDUARDO BESSA DE MEDEIROS

**MODELAGEM NUMÉRICA DE ZONAS DE FALHAS UTILIZANDO O MÉTODO  
DOS ELEMENTOS FINITOS**

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

**Área de concentração:** Geotecnia.

**Orientador:** Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes.

Recife

2020

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

M488m Medeiros, Carlos Eduardo Bessa de.  
Modelagem numérica de zonas de falhas utilizando o método dos elementos finitos / Carlos Eduardo Bessa de Medeiros – Recife, 2020.  
155 f.: figs, quads., gráficos., tabs., símbolos.

Orientadora: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.  
Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Geologia estrutural. 3. Método dos elementos finitos. 4. Modelagem numérica. 5. Formação de zonas de falha. I. Gomes, Igor Fernandes (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2020-147

CARLOS EDUARDO BESSA DE MEDEIROS

**MODELAGEM NUMÉRICA DE ZONAS DE FALHAS UTILIZANDO O MÉTODO  
DOS ELEMENTOS FINITOS**

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

Aprovada em: 19/02/2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

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

---

Prof. Dr. Manoel Porfírio Cordão Neto (Examinador Externo)  
Universidade de Brasília

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à Deus pela saúde, as oportunidades que recebi, pela força e coragem para mudar e continuar minha jornada.

Agradeço imensamente a minha companheira de vida, Maressa Neiva, por ser esse ser humano iluminado, por tamanha bondade e amor compartilhados todos os dias.

Aos meus pais, Ana e Osvaldo, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida, e por confiarem na minha capacidade diante de quaisquer desafios.

Ao meu amigo Laerte de Paula pela amizade, pelos ensinamentos e recursos compartilhados, pela paciência nos momentos difíceis e pelo acolhimento na cidade do Recife. Obrigado por fazer parte da minha vida.

Ao Professor Igor Gomes pelas orientações prestadas, pela paciência em todos os momentos, pelo otimismo constante, por confiar em minhas capacidades diante desse tema e por exemplo de conduta e pessoa humana que é.

Ao Professor Tiago Miranda por todas as orientações e auxílios no desenvolvimento dessa pesquisa, por todo apoio e paciência com tamanha as dúvidas que sempre tive, por ser a luz das ideias em tantos momentos, pela simplicidade e humildade no lidar comigo sempre.

À minha amiga Ana Itamara pelas orientações, ajudas prestadas, pela paciência, pela amizade, por se colocar à disposição sempre que necessário e por ser essa pessoa maravilhosa. Não tenha dúvidas que as suas contribuições foram fundamentais na composição deste trabalho e pro meu crescimento como pessoa.

Aos amigos e colegas da pós-graduação pelos ensinamentos compartilhados, pelo companheirismo e solidariedade prestada.

À equipe administrativa Rose Mary, Priscila Gameiro, Andrea Negromonte e Claudiana pela simpatia no dia a dia e pelo imenso apoio na solução de problemas e demandas diversas.

Agradeço a Energi Simulation, a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), ao Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica (LMCG) e ao Laboratório de Modelagem de Bacias (ModLab) pelo apoio, incentivo e disponibilidade de recursos físicos e financeiros.

## RESUMO

Os processos formadores de estruturas complexas como as zonas de falhas em diferentes regimes tectônicos têm grande relevância na compreensão do comportamento mecânico da litosfera e dos fluídos subsuperficiais. Neste caso, a modelagem numérica apresenta-se como ferramenta fundamental para auxiliar no entendimento destes processos e diminuir as incertezas. Esta dissertação apresenta a modelagem numérica do processo de formação de zonas de falhas em regimes transcorrente, normal e oblíquo, bem como analisar o controle estrutural de falhas pré-existentes. As simulações numéricas foram realizadas aplicando o método dos elementos finitos e com o uso da técnica de descontinuidades fortes incorporadas, utilizando o código *in house* CODE-BRIGHT. As análises foram divididas em duas etapas. A primeira, com simulações direcionadas ao processo de formação de zonas de falha utilizando o modelo constitutivo elastoplástico de Drucker-Prager, apresentando resultados satisfatórios quanto a avaliação das deformações plásticas como parâmetro da formação de zonas de falha e deslocamentos como indicativo do comportamento rúptil das estruturas formadas. No segundo momento, foram realizadas análises com segmentos de falhas pré-existentes inseridos no contínuo por meio da técnica das descontinuidades fortes, em que foi possível verificar o processo de reativação tectônica dessas estruturas, além da formação de zonas de dano nas extremidades dos segmentos. Por fim, avaliou-se a influência e o controle das estruturas pré-existentes na distribuição das tensões no maciço.

Palavras-chave: Geologia estrutural. Método dos elementos finitos. Modelagem numérica. Formação de zonas de falhas;

## ABSTRACT

The processes that form complex structures such as fault zones in different tectonic regimes have great relevance in understanding the mechanical behavior of the lithosphere and subsurface fluids. In this case, numerical modeling is presented as a fundamental tool to assist in the understanding of these processes and reduce uncertainties. This dissertation presents the numerical modeling of the process of faulting and fault zones formation in strike-slip, normal and oblique regimes, as well as analyzing the structural control of pre-existing faults. Numerical simulations were performed using the finite element method and applying the technique of strong discontinuity using the CODE-BRIGHT code. The analyzes were divided into two stages. In the first stage, simulations were carried out to investigate the formation process of faults zones using the constitutive elastoplastic model of Drucker-Prager. The results presenting satisfactory regarding the evaluation of plastic deformations as a parameter to indicate a formation of fault zones, and displacements as an indication of behavior brittle structures. In the second moment, analyses were carried out with pre-existing fault segments inserted in the continuum using the strong discontinuity technique, in which was possible to verify the tectonic reactivation process of these structures, formation of damage zones at the tips of the segments and the influence and control of pre-existing structures on the distribution of stresses.

Keywords: Structural geology. Finite element method. Numerical modelling. Fault zone formation process.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia para a prática da Geologia Estrutural.....	28
Figura 2 – Classificação de Anderson (1951) relacionando tensões principais e regime tectônico: $\sigma_h$ é a tensão mínima horizontal; $\sigma_H$ é a tensão máxima horizontal; $\sigma_v$ é a tensão vertical; (P) representa a compressão e (T) a tração; $\sigma_1$ , $\sigma_2$ e $\sigma_3$ são as tensões principais. ....	31
Figura 3 – Tipos de comportamento elástico e elastoplásticos para gráfico tensão ( $\sigma$ ) versus deformação ( $\epsilon$ ). ....	33
Figura 4 – Distribuição de comportamento reológico (quartzo, feldspato e olivina) a partir da variação da tensão confinante e profundidade da litosfera. ....	34
Figura 5 – Tipos de fraturas e antifratura de acordo como o modelo mecânico: Tipo I por deslocamento perpendicular à fratura; Tipo II por transcorrência paralela à direção da fratura; Tipo III por cisalhamento característico do deslocamento paralelo ao mergulho do plano de fratura.....	35
Figura 6 – Gráfico tensão normal versus cisalhante e distribuição dos critérios de ruptura: (a) fratura extensional; (b) fratura híbrida ou de modo misto, (c) fratura de cisalhamento; (d) transição com cisalhamento rúptil dúctil; (e) deformação plástica. ....	36
Figura 7 – Esquema básico de uma falha: a) representação normal da falha normal com identificação do plano de falha, marcador cinemático indicativo de movimento, hanging wall e footwall; b) diagrama de movimento dos blocos que compõe uma falha apresentando o posicionamento do vetor de rejeito total, componentes de rejeito direcional e rejeito de mergulho, o mergulho de um bloco em função do outro, e o ângulo de mergulho $\theta$ . ....	36
Figura 8 – Modelo conceitual de uma zona de falha. ....	38
Figura 9 – Classificação da ligação de zonas de dano a depender do sentido da tensão aplicada. Os casos em extensão de (a) à (d), nos quais podem ser desenvolvidas fraturas de extensão, <i>pull-aparts</i> , bloco rotacionado e duplex transcorrente, respectivamente. Nos casos em compressão podem ser desenvolvidos, (e) até (g) em ordem, bloco rotacionado, falha de conexão e duplex transcorrente. ....	39
Figura 10 – Classificação ampla das zonas de dano de acordo com a posição e cinemática.....	40

Figura 11 – Relação da formação de zona de falha transcorrente e o Módulo de Young.	41
Figura 12 – Diagrama conceitual da evolução das falhas em diferentes escalas.....	42
Figura 13 – Esquema da determinação da espessura da zona de dano pela metodologia de Choi <i>et al.</i> (2016).....	43
Figura 14 – Comportamento uniaxial de materiais elastoplásticos por meio do gráfico tensão ( $\sigma$ ) versus deformação $\epsilon$ . ....	47
Figura 15 – Modelo de Drucker-Prager: a) superfície de fluência no espaço das tensões principais; b) aproximação da aproximação de Mohr-Coulomb.....	51
Figura 16 – Vetor de fluxo associado e não associado para a superfície de Drucker-Prager. ....	52
Figura 17 – 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 $\Omega e +$ .....	63
Figura 18 – 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. ....	63
Figura 19 – Fluxograma básico das etapas de execução das simulações. ....	66
Figura 20 – Esquema das direções das dimensões do maciço e da análise: a) maciço antes do falhamento; b) falha normal formada; c) falha transcorrente formada.....	67
Figura 21 – Organograma das simulações realizadas.....	68
Figura 22 – Vista aérea da falha transcorrente de Piqiangt na China, em que as regiões com colorações vermelhas, verdes e creme indicam a existência de rochas sedimentares e, neste caso são indicadores cinemático da transcorrência. ....	69
Figura 23 – Condições de contorno da simulação da falha transcorrente: a) litostático; b) cisalhamento.....	70
Figura 24 – Malha em elementos finitos para falhas transcorrentes e indicação dos elementos utilizados na análise de resultados. ....	70
Figura 25 – Linhas indicativas dos resultados para os gráficos em função da largura do maciço para os casos analisados, eixo x.....	71
Figura 26 – Indicação do local em que será determinado o deslocamento total e indicativo de movimento com marcador cinemático, para um fator de aumento de 10 vezes: a) maciço indeformado; b) maciço deformado. ....	71

Figura 27 – Distribuição das deformações plásticas no maciço para a transcorrência e tensão confinante de 10 MPa: a) maciço completo; b) detalhe 1.....	72
Figura 28 – Distribuição das tensões em MPa em regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa: a) tensões cisalhantes; b) tensões na direção do eixo x; c) tensões na direção do eixo y. ....	75
Figura 29 – Deslocamentos em metros no regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa: a) deslocamento na direção do eixo x; b) deslocamentos na direção do eixo y; c) deslocamentos totais.....	76
Figura 30 – Componentes das tensões principais máximas e mínimas, considerando a conversão de positivo para tensões à tração e negativo à compressão: a) tensão principal mínima; b) tensão principal máxima. ....	77
Figura 31 – Representação vetorial das tensões principais no maciço no regime transcorrente, em que as setas em azul indicam compressão e as setas em vermelho tração, o tamanho das setas proporcional a intensidade e com fator de visualização de 0,02: a) maciço por completo para; b) detalhe da região central do maciço enfatizando o aspecto romboidal das tensões; c) e d) detalhes nas regiões superior e inferior respectivamente para identificação dos vetores de tração e compressão, direção e intensidade.....	78
Figura 32 – Distribuição da porosidade: a) maciço inteiro; b) detalhe 2.....	80
Figura 33 – Zona de transtensão com cinemática dextral em rocha ortognaisse do Complexo Caicó (RN).....	92
Figura 34 – Condições de contorno da simulação da falha transcorrente com extensão: a) litostático; b) cisalhamento associado à extensão. ....	93
Figura 35 – Distribuição das tensões principais máximas e mínimas: a) distribuição da tensão principal mínima; b) detalhe 1; c) distribuição da tensão principal máxima; d) detalhe 2. ....	95
Figura 36 – Representação vetorial das tensões principais mínimas com fator de apresentação de 0,1 e representação das tensões tracionando em vermelho e compressão em azul: a) maciço completo; b) detalhe 1.....	96
Figura 37 – Representação vetorial das tensões principais máximas com fator de apresentação de 0,1 e representação das tensões tracionando em vermelho e compressão em azul: a) maciço completo; b) detalhe 1.....	97
Figura 38 – Condições de contorno da simulação da falha transcorrente com compressão: a) litostático; b) cisalhamento associado à compressão. ....	106

Figura 39 – Representação vetorial da tensão principal mínima, em que o tamanho das setas está fixo, logo não indica intensidade, na cor azul compressão e vermelho para tração: a) maciço completo; b) detalhe 1 com ênfase na região central. ....	108
Figura 40 – Representação vetorial da tensão principal máxima, em que o tamanho das setas está fixo, logo não indica intensidade, na cor azul compressão e vermelho para tração: a) maciço completo; b) detalhe 2 com ênfase na região central. ....	109
Figura 41 – Falhas normais com sentidos opostos, ângulo de mergulho semelhante. Arenito da Formação Barreiras (SE).....	117
Figura 42 – Condições de contorno da formação de zona de falha em regime normal: a) geostático, cálculo das tensões provenientes do peso próprio do solo pela aceleração da gravidade ( $g$ ) em $m/s^2$ ; b) aplicação de uma tensão vertical ( $\sigma V$ ) em MPa; c) imposição dos deslocamentos ( $u$ ) em metros formando um ângulo de $45^\circ$ com a horizontal. ....	118
Figura 43 – Geometria do maciço utilizado nas simulações da formação de zona de falha em regime normal discretizado em elementos triangulares. ....	118
Figura 44 – Maciço com marcador cinemático e diferentes estágios de deformação: a) indeformado; b) maciço deformado em que $\Delta x$ e $\Delta z$ correspondem aos deslocamentos totais em metros. ....	119
Figura 45 – Deformações plásticas no maciço ao final da simulação: a) representação das deformações plásticas no maciço como um todo; b) detalhe 3; c) detalhe 3 com ajuste na legenda limitando os valores maiores a um com mesma cor. ....	120
Figura 46 – Variação da porosidade na formação de zona de dano em regime normal: a) porosidade no maciço; b) detalhe 4 na região central do maciço cuja aumento da porosidade é expressivo. ....	121
Figura 47 – Representação das tensões principais mínimas para um fator de escala de 0,1 no maciço ao final da simulação para formação de zona de dano em regime normal, em que as setas em azul indicam compressão, em vermelho tração e o tamanho intensidade: a) maciço total; b) detalhe na central do maciço. ....	122
Figura 48 – Representação das tensões principais máximas para um fator de escala de 0,1 no maciço ao final da simulação para formação de zona de dano em	

	regime normal, em que as setas em azul indicam compressão, em vermelho tração e o tamanho intensidade: a) maciço total; b) detalhe A na central do maciço, e detalhe B na região inferior próximo a mudança da condição de contorno.....	123
Figura 49 –	Tensões principais da formação de zona de dano em regime normal: a) tensão principal menor em MPa; b) tensão principal maior em MPa. ....	124
Figura 50 –	Deslocamentos máximos no processo de formação de zona de dano em regime normal: a) deslocamentos na direção do eixo x em metros; b) deslocamentos na direção do eixo z em metros; c) deslocamentos equivalente em metros.....	126
Figura 51 –	Estrutura da Bacia Sergipe-Alagoas (AL), composta por par conjugado do tipo <i>pull-apart</i> (em mapa), neste caso relacionada à transcorrência dextral em arenito. ....	134
Figura 52 –	Geometria do problema utilizando segmentos de falha com a técnica de descontinuidades fortes incorporadas: a) condições de contorno; b) malha discretizada.....	135
Figura 53 –	Representação vetorial dos deslocamentos em transpressão no maciço com ênfase à região entre as extremidades internas dos dois segmentos de falha.	136
Figura 54 –	Deformações elásticas no maciço com detalhe para os segmentos incorporados em transpressão. ....	136
Figura 55 –	Deformações plásticas cisalhantes nos segmentos de falha. ....	137
Figura 56 –	Distribuição da tensão principal maior $\sigma_1$ (MPa) para o maciço com dois segmentos de falhas pré-existente incorporado.....	138
Figura 57 –	Distribuição da tensão principal menor $\sigma_3$ (MPa) para o maciço com dois segmentos de falhas pré-existente incorporado.....	138
Figura 58 –	Distribuição das tensões cisalhantes entre as extremidades internas das descontinuidades (MPa). ....	139
Figura 59 –	Geometria do problema: a) maciço com dimensões 40 x 40 m e segmento de falha com 2 m de comprimento e ângulo com a horizontal de 35° e detalhe A que será utilizado nas análises dos resultados; b) malha discretizada em elementos triangulares com maior refino na região central do maciço.....	140
Figura 60 –	Condições de contorno do problema: a) etapa inicial, imposição das tensões litostática ( $\sigma$ ) em MPa; b) imposição de deslocamento extensional $U_x$ mantido o estado de tensões imposto na etapa anterior. ....	141

Figura 61 – Deformações plásticas no maciço, em detalhe no segmento de falha incorporada.....	141
Figura 62 – Variação da porosidade na região próxima ao segmento de falha inserida no maciço. ....	142
Figura 63 – Variação da tensão cisalhante em MPa na região próxima ao segmento de falha.....	142
Figura 64 – Tensões principais no maciço em MPa: a) tensões principais mínima; b) tensões principais máxima; c) tensões principais médias. ....	143

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Algoritmo de implementação implícita do modelo de Drucker-Prager. ....	57
Quadro 2 – Esquema do algoritmo IMPL-EX. ....	60
Quadro 3 – Algoritmo para controle do passo de tempo.....	61
Quadro 4 – Parâmetros elásticos e mecânicos utilizados nos materiais, maciço e segmentos de falhas pré-existentes incorporadas.....	135

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição da deformação plástica cisalhante versus largura do maciço no meio do maciço no regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa. .....	73
Gráfico 2 – Distribuição da deformação plástica cisalhante versus largura do maciço nas extremidades no regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa. ...	73
Gráfico 3 – Relação do deslocamento com relação a largura do maciço na transcorrência para tensão confinante de 10 MPa.....	79
Gráfico 4 – Envoltória de Drucker-Prager e elementos na região central e extremidades. .....	80
Gráfico 5 – Porosidade na linha central de análise no meio do maciço no regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa.....	81
Gráfico 6 – Distribuição da porosidade nas extremidades do comprimento no regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa.....	82
Gráfico 7 – Deformações plásticas no meio do maciço variando a tensão confinante no regime transcorrente. ....	83
Gráfico 8 – Variação da porosidade no regime transcorrente com incremento da tensão confinante. ....	84
Gráfico 9 – Deformação plástica cisalhante no regime transcorrente na extremidade inferior variando a tensão confinante. ....	84
Gráfico 10 – Deformação plástica cisalhante no regime transcorrente na extremidade superior variando a tensão confinante. ....	85
Gráfico 11 – Deslocamentos em x e y em relação a largura do maciço no regime transcorrente. ....	85
Gráfico 12 – Deslocamentos total em relação a largura do maciço no regime transcorrente variando a tensão confinante. ....	86
Gráfico 13 – Relação da espessura da zona de dano com o deslocamento total máximo no regime transcorrente para diversas tensões confinantes.....	87
Gráfico 14 – Distribuição da tensão cisalhante em função da largura do maciço no regime transcorrente variando a tensão confinante. ....	88
Gráfico 15 – Detalhe do Gráfico 14 limitando o eixo horizontal entre 20 e 60 metros. ....	88
Gráfico 16 – Distribuição da deformação plástica cisalhante na região central do maciço variando o módulo de elasticidade no regime transcorrente. ....	89

Gráfico 17 – Distribuição da deformação plástica cisalhante na extremidade inferior do comprimento no regime transcorrente variando o módulo de rigidez. ....	90
Gráfico 18 – Distribuição da deformação plástica cisalhante na extremidade superior no regime transcorrente variando o módulo de rigidez.....	90
Gráfico 19 – Deslocamentos totais para a transcorrência para diferentes módulos de elasticidade. ....	91
Gráfico 20 – Distribui porosidade para falha transcorrente para diferentes módulos de elasticidade. ....	91
Gráfico 21 – Deformações plásticas distribuídas no meio ao longo da largura do maciço em transtensão variando a tensão confinante. ....	94
Gráfico 22 – Deformações plásticas na extremidade superior em transtensão variando a tensão confinante. ....	98
Gráfico 23 – Deformações plásticas na extremidade inferior em transtensão variando a tensão confinante. ....	98
Gráfico 24 – Porosidade no meio do maciço em transtensão variando a tensão confinante. ....	99
Gráfico 25 – Deslocamentos na direção x ao longo da largura do maciço no meio em transtensão variando a tensão confinante. ....	100
Gráfico 26 – Deslocamento na direção y ao longo do maciço no meio em transtensão variando a tensão confinante. ....	100
Gráfico 27 – Deslocamento total ao longo do meio do maciço em relação a largura em transtensão variando a tensão confinante. ....	101
Gráfico 28 – Relação espessura da zona de dano em metros com deslocamento máximo do maciço na região superior em transtensão variando a tensão confinante..	101
Gráfico 29 – Distribuição da tensão cisalhante no meio do maciço em transtensão variando a tensão confinante. ....	102
Gráfico 30 – Deformação plástica cisalhante no meio do maciço em transtensão para diferentes módulos de Young do material.....	103
Gráfico 31 – Porosidade para linha central para o maciço em transtensão variando o módulo de elasticidade. ....	104
Gráfico 32 – Deslocamento total para o maciço em transtensão variando o módulo de elasticidade. ....	104
Gráfico 33 – Variação do rejeito em função da variação do módulo de elasticidade para maciço em transtensão. ....	105

Gráfico 34 – Distribuição da tensão cisalhante na linha central para o maciço em transtensão variando o módulo de elasticidade. ....	105
Gráfico 35 – Variação da deformação plástica cisalhante para linha central do maciço em transpressão variando a tensão confinante. ....	107
Gráfico 36 – Deformação plástica cisalhante nas extremidades no maciço em transpressão variando a tensão confinante: a) inferior; b) superior. ....	110
Gráfico 37 – Deslocamentos em relação a largura do maciço: a) deslocamentos no eixo x em metros; b) deslocamentos no eixo y em metros. ....	111
Gráfico 38 – Distribuição da porosidade na linha central do maciço em transpressão variando a tensão confinante: a) largura completa do maciço; b) detalhe para região central de 35 à 45 m. ....	113
Gráfico 39 – Distribuição da tensão cisalhante em transpressão variando a tensão confinante. ....	114
Gráfico 40 – Deformação plástica cisalhante na linha central para maciço em transpressão variando a módulo de elasticidade. ....	115
Gráfico 41 – Distribuição da porosidade na linha central para maciço em transpressão variando a módulo de elasticidade. ....	115
Gráfico 42 – Variação da tensão cisalhante para transpressão variando o módulo de elasticidade. ....	116
Gráfico 43 – Deslocamentos na formação de zona de dano em regime normal: a) deslocamentos em x em função da largura em metros; b) deslocamentos em y em função da largura em metros. ....	125
Gráfico 44 – Deformações plásticas para formação de zona de dano em regime normal na linha central em função da largura: a) para todo o maciço; b) detalhe 1; c) detalhe 2. ....	128
Gráfico 45 – Deformações na formação de zona de dano em regime normal em relação a largura: a) linha inferior; b) linha superior. ....	129
Gráfico 46 – Espessura da zona de dano em função da tensão vertical e deformações plásticas máximas em função da tensão vertical no eixo secundário. ....	130
Gráfico 47 – Variação da porosidade em relação a largura do maciço na formação de zona de dano em regime normal variando a tensão vertical. ....	131
Gráfico 48 – Deslocamento total em relação a largura do maciço em metros para a formação de zona de dano em regime normal variando a tensão vertical. ....	131

Gráfico 49 – Variação da deformação plástica cisalhante na linha central da formação de zona de dano em regime normal com variação do módulo de elasticidade. ...	132
Gráfico 50 – Correlação da espessura da zona de dano (m) com o módulo de elasticidade (GPa) para a formação de zona de dano em regime normal. ....	133
Gráfico 51 – Deformações plásticas dos segmentos de falha pré-existentes incorporados em função do comprimento da descontinuidade. ....	137
Gráfico 52 – Tensões desviadora (MPa) versus tensões médias (MPa) para os elementos da extremidade interna dos segmentos de falha pré-existentes incorporados. ....	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros da rocha utilizado nas simulações numéricas, em que $E$ é o módulo de elasticidade, $\nu$ é o coeficiente de Poisson, $c$ a coesão, $\phi$ é o ângulo de atrito e $\psi$ é o ângulo de dilatância. ....	71
Tabela 2 – Variação da tensão confinante, deformação máxima e largura da zona de plastificação no regime transcorrente. ....	83
Tabela 3 – Tensões cisalhantes máximas e mínima no regime transcorrente variando a tensão confinante. ....	87
Tabela 4 – Cisalhamentos máximos e mínimos para falha transcorrente variando o módulo de elasticidade. ....	92
Tabela 5 – Cisalhamentos máximos e mínimas para transtensão com variação da tensão confinante. ....	102
Tabela 6 – Porosidade máxima e mínima para o maciço em transpressão variando a tensão confinante. ....	112
Tabela 7 – Tensão cisalhante máxima e mínima para maciço em transpressão variando a tensão confinante. ....	114
Tabela 8 – Variação da porosidade para maciço em transpressão variando a módulo de elasticidade. ....	116
Tabela 9 – Deformações máximas para cada tensão vertical aplicada na formação de zona de dano em regime normal. ....	127

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_1$	Tensão principal máxima
$\sigma_2$	Tensão principal intermediária
$\sigma_3$	Tensão principal mínima
$\sigma_m$	Tensão média
$\rho$	Densidade da rocha
$g$	Aceleração da gravidade
$z$	Profundidade em metros
$\sigma_H$	Tensão máxima horizontal
$\sigma_h$	Tensão mínima horizontal
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma_V$	Tensão vertical
$\sigma$	Tensão
$\epsilon$	Deformações
$\sigma_d$	Tensão confinante
$E$	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
$d_{máx}$	Rejeio máximo das falhas
$D$	Deslocamento das falhas
$T$	Espessura do núcleo de falha
$W$	Espessura da zona de dano
$\nabla$	Operador divergente
$\sigma$	Tensor de tensões
$\mathbf{b}$	Forças de corpo
$\mathbf{S}$	Tensor desviador
$\mathbf{I}$	Tensor identidade
$p$	Tensão média
$J$	Segunda invariante de tensões
$\epsilon^e$	Parcela elástica das deformações
$\epsilon^p$	Parcela plásticas das deformações

$\mathbf{D}_e$	Matriz rígenes elástica
$\mathbf{D}_p$	Matriz rígenes plástica
$\sigma_y$	Estado de tensões limite elástico
$\mathbb{E}_\sigma^e$	Domínio elástico
$F$	Função de fluência
$\kappa$	Parâmetro de estado
$\partial\mathbb{E}_\sigma$	Superfície de fluência
$h$	Parâmetro de endurecimento
$W^p$	Trabalho plástico
$\mathbf{D}_{ep}$	Tensor elastoplástico
$P$	Função potencial de plastificação
$m$	Vetor parâmetro de estado
$\Lambda$	Multiplicador plástico
$A$	Constante do comportamento do material
$\eta$	Parâmetro material
$c$	Coesão do material
$\phi$	Ângulo de atrito interno do material
$\xi$	Parâmetro material
$\psi$	Dilatância
$g$	Função de fluxo
$\mathbf{n}$	Vetor de fluxo
$t$	Componente tempo
:	Operador do produto interno
$K$	Módulo elástico volumetrico
$G$	Modulo elástico cisalhante
$\gamma$	Multiplicador plástico
$F_{tol}$	Artificio de tolerância
$dtime$	Passo de tempo anterior
$Fator$	Artificio para recoduzir à zonda de tensões admissíveis
$\Omega_e$	Domínio quadricular de um corpo

$\Omega$	Domínio de um corpo
$\Gamma_u$	Domínio dos deslocamentos
$\Gamma_t$	Domínio de contorno
$\bar{t}$	Vetor tração em um corpo
$\Omega_e$	Domínio de um elemento triangular
$l_e$	Comprimento de uma banda de deformação
$S_e$ ,	Banda de deformação
$l$	Largura
$h$	Altura
$u$	Deslocamentos
$u_s$	Deslocamento do corpo rígido
$u_\Omega$	Deslocamento no contínuo
$C$	Comprimento do maciço
$L$	Largura do maciço
$P$	Profundidade do maciço

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>24</b>
1.1	OBJETIVOS.....	25
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	25
<b>2</b>	<b>GEOLOGIA ESTRUTURAL .....</b>	<b>27</b>
2.1	TENSÃO E DEFORMAÇÃO NA LITOSFERA .....	28
<b>2.1.1</b>	<b>Reologia e o Comportamento Rúptil das Rochas.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Zona de Falha .....</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>MECÂNICA DO CONTÍNUO E PLASTICIDADE.....</b>	<b>44</b>
3.1	RELAÇÕES CONSTITUTIVAS.....	44
<b>3.1.1</b>	<b>Invariantes de Tensão .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Fundamentos da Plasticidade.....</b>	<b>46</b>
3.1.2.1	Equação Constitutiva Elástica.....	47
3.1.2.2	Função e Superfície de Fluência .....	48
3.1.2.3	Tensor Elastoplástico .....	49
3.2	MODELO CONSTITUTIVO DE DRUCKER-PRAGER.....	50
<b>4</b>	<b>MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....</b>	<b>54</b>
4.1	FORMULAÇÃO IMPLÍCITA.....	54
4.2	ALGORITMO DE INTEGRAÇÃO IMPLÍCITA-EXPLÍCITA (IMPL-EX)	58
4.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS COM DESCONTINUIDADES FORTES INCORPORADAS .....	62
<b>5</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA DE ZONA DE FALHA .....</b>	<b>65</b>
5.1	FORMAÇÃO DE ZONA DE FALHA EM REGIME TRANSCORRENTE	69
<b>5.1.1</b>	<b>Influência da Tensão Confinante.....</b>	<b>82</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Rigidez da Rocha no Processo Cisalhante.....</b>	<b>88</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Formação de Falha em Zona de Transtensão.....</b>	<b>92</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Formação de Falha em Zona de Transpressão.....</b>	<b>105</b>
5.2	FORMAÇÃO DE ZONA DE FALHA EM REGIME NORMAL .....	117
<b>5.2.1</b>	<b>Influência da Tensão Vertical .....</b>	<b>127</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Influência da Rigidez da Rocha .....</b>	<b>132</b>
5.3	SEGMENTOS DE FALHAS .....	133

5.3.1	Segmentos de Falha Pré-existentes em um Maciço Elástico em Transpressão.....	133
5.3.2	Segmento de Falha Incorporado no Maciço em Transtensão .....	139
6	DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	144
6.1	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	146
	REFERÊNCIAS .....	147

## 1 INTRODUÇÃO

A modelagem numérica é um elemento chave para o melhor entendimento da origem tectônica de estruturas geológicas. Falhas são estruturas que possuem um complexo contexto geológico-estrutural, principalmente no que diz respeito a sua gênese, propagação e consequente desenvolvimento de heterogeneidades mecânicas, hidráulicas e térmica ao longo de sua região de ocorrência (POLLARD; FLETCHER, 2006). Desta forma, as zonas de falhas são atualmente alvo de investigação, tanto pela indústria como pela academia.

O estudo de zonas de falha está associado a desafios relacionados ao melhor entendimento sobre a ocorrência de depósitos minerais, migração de fluidos (hidrocarbonetos, água, CO<sub>2</sub> e resíduos nucleares) e construção tuneis (GUDMUNDSSON, 2011). Todavia, se estas estruturas estão ativas (falhas sísmica), podem estar estreitamente relacionada a terremotos (FOSSSEN, 2016). O estudo das zonas de falha em bacia sedimentares é fundamental para a compreensão da migração de fluidos e de processos de reativação, principalmente tectônica (FLINT; BRYANT, 1993; MIRANDA *et al.*, 2018). Diversos trabalhos foram desenvolvidos em zonas de falha aplicados à indústria do petróleo (*e.g.* MOLNÁR; TIVADAR; SCHUBERT, 2015; CHOI *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2017; MAYOLLE *et al.*, 2019; TORABI; JOHANNESSEN; ELLINGSEN, 2019), à hidrogeologia (*e.g.* MAYER *et al.*, 2007; BURBEY, 2008; FOLCH; MAS-PLA, 2008; BENNE *et al.*, 2013; MCCALLUM *et al.*, 2018; SCHINDEL, 2019), a resíduos nucleares (*e.g.* FÄLTH *et al.*, 2015; ORELLANA; GIORGETTI; VIOLAY, 2019), a formação de depósitos minerais, armazenamento de CO<sub>2</sub> e quedas de blocos em taludes rochosos (*e.g.* HERMANN; LONGVA, 2013; PINOTTI; CARNEIRO, 2015). No que tange este último tema, engenharia de taludes em rochas, Stead e Wolter (2015) citam quantidade limitada de trabalhos que considerem não apenas as relações de contato da falha e a instabilidade do talude, mas também, processos de conexão entre falhas, mecanismos de arrasto, preenchimento dessas estruturas, deformação e diagênese de rochas sedimentares.

A presente dissertação propõe o uso de simulações numéricas utilizando o método dos elementos finitos bidimensional para deformações infinitesimais. A utilização do método baseia-se na propagação do dano em cada formação geológica. Portanto, este fato permite a análise da origem de zonas de falha de acordo com diferentes regimes tectônicos (extensional, contraccional e transcorrente). Conseqüentemente, de acordo com a observação dos parâmetros do modelo constitutivo mecânico, pressão litostática e fator de escala a simulação numérica

permite a quantificação da espessura de zonas de dano e a análise da influência na geometria do padrão estrutural ao longo de zonas de falha.

### 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo geral a modelagem bidimensional de zonas de falha utilizando o método dos elementos finitos para pequenas deformações, com e sem a pré-existência de falhas através de processos cisalhantes.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as condições básicas para modelagem de zonas de falha em regime transcorrente;
- Utilizar o modelo elastoplástico de Drucker-Prager para simular maciços rochosos em condição de cisalhamento;
- Averiguar a influência da tensão confinante e parâmetros materiais no processo de formação de zona de falha, avaliando deformações plásticas, tensões e porosidade;
- Modelar sistemas com segmentos de falhas pré-existentes, para regime compressional e extensional;
- Analisar o controle estrutural das falhas pré-existentes na reativação tectônica.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do presente trabalho inicia-se com a apresentação básica do contexto que se insere o estudo de zonas de falha, seguido pela justificativa à escolha desta temática e dos objetivos básicos do estudo. No segundo momento será tratado da revisão bibliográfica básica da geologia estrutural, direcionado ao tema em estudo, cujo intuito é estabelecer e padronizar os conceitos e nomenclaturas que nortearam o desenvolvimento das análises.

No terceiro capítulo será tratado de maneira sucinta os conceitos básicos da mecânica do contínuo, do mesmo modo que os conceitos de plasticidade direcionados ao modelo constitutivo de Drucker-Prager, sua formulação e aplicação utilizando elementos finitos. Na quarta parte será apresentado o método dos elementos finitos, desde o código básico implícito até aquele que faz uso da técnica especial de descontinuidades fortes incorporadas, no código *in house* em que serão analisados os casos propostos.

O capítulo seguinte, quinta parte, apresentará os casos analisados e os resultados e discussões a respeito destes quanto a validade física e fenomenológica relacionados a geologia

estrutural e aplicação de métodos numéricos. Por fim, serão apresentadas as considerações finais, conclusões, possíveis melhorias e trabalhos futuros que nortearão a continuidade das pesquisas no que tange modelagem numérica de zonas de falha.

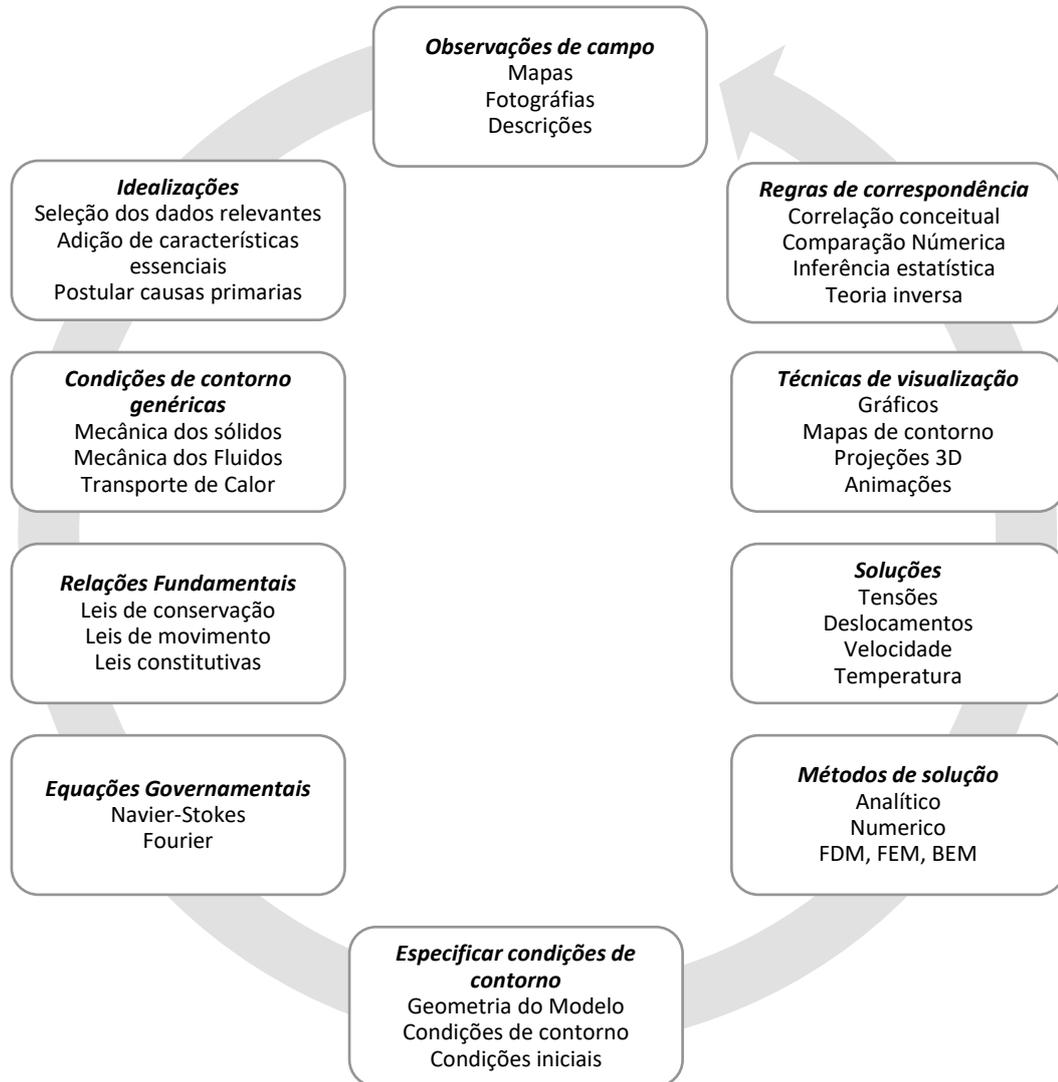
## 2 GEOLOGIA ESTRUTURAL

Segundo Fossen (2016) é necessário uma distinção clara nos conceitos de geologia estrutural e tectônica. A primeira trata das estruturas formadas no processo de deformação das rochas, sem contar com estruturas primárias formadas por processos magmáticos ou sedimentares. Já a geologia tectônica trata da formação das estruturas primárias, por movimentação das placas tectônicas (em escala regional) e por razões externas, resultando na estruturação da litosfera terrestre.

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.

Pollard e Fletcher (2010) estruturam um esquema metodológico básico, adaptado na Figura 1, para a prática da geologia estrutural, interconectando cada etapa e relacionando a prática de campo e modelagem. Os autores propõem um fluxograma com início nas investigações de campo, perpassando pelo processo de idealização e estudo amplo da mecânica do contínuo e leis físicas fundamentais, chegando à modelagem e a aplicações de técnicas de visualização, finalizando no estabelecimento de correlações para o reinício. A presente seção versará sobre conceitos básicos de geologia estrutural que serão a base para as simulações apresentadas neste trabalho.

Figura 1 – Metodologia para a prática da Geologia Estrutural.



Fonte: Adaptado de Pollard e Fletcher (2010).

## 2.1 TENSÃO E DEFORMAÇÃO NA LITOSFERA

Compreender os princípios que regem tensão e deformação, bem como mensurar as tensões na crosta terrestre tem sido um desafio na geologia durante as décadas. A ocorrência de múltiplas estruturas geológicas, processos deformacionais que se sobrepõe ao longo do tempo e a capacidade da crosta em armazenar o estado tensional e preservá-lo no tempo geológico remanescente, são fatores que ampliam a complexidade ao medir e compreender tensão e deformação (ENGELDER, 1993; MEANS, 1976).

As definições de tensão e deformação são básicas da mecânica do contínuo, em que os esforços são usualmente representados como tensor de tensões de segunda ordem que pode ser

decomposto em uma parcela isotrópica e noutra anisotrópica, tensão média e tensor de tensão deviatória, respectivamente. A equação (1) apresenta esquematicamente e simplificado o tensor de tensões, em que a tensão média  $\sigma_m$  é igual a média aritmética das tensões principais. Para um ponto qualquer em um bloco rochoso tridimensional utiliza-se o conceito de elipsoide de tensão para compreender a intensidade e sentido das tensões. Assim, para os eixos do elipsoide as tensões principais são definidas por  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , em ordem decrescente de intensidade, ou seja,  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  (MEANS, 1976).

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{11} - \sigma_m & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \sigma_m & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - \sigma_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

A deformação de um material é pode ser entendida como a mudança de configuração inicial (indeformada) para uma condição posterior (deformado). Contudo, apesar de relacionar o conceito anterior com a aplicabilidade na geologia, Means (1976) estabelece o uso do termo deformação (*deformation*) tanto para tratar dos deslocamentos de corpo rígido, como rotação e translação, bem como das variações de volume e deformações internas (*strain*). No presente texto será utilizado este último conceito, contudo trataremos apenas de deformações internas e, neste caso, a palavra deformação será utilizada com o propósito de se referir apenas a este conceito. A representação das deformações pode ser realizada utilizando o elipsoide de deformações, análogo ao das tensões.

O trabalho de Marrett e Peacock (1999) apresenta uma revisão do uso das palavras esforço (*stress*) e deformação interna (*strain*), na perspectiva da geologia estrutural. Estes termos podem ser utilizados para as análises cinemáticas e dinâmicas, salientando que o emprego do termo deformação é apropriado para descrever movimentos e as estruturas naturalmente formadas, enquanto que as expressões relacionadas a tensão (esforço) devem ser utilizadas para a origem formadora das estruturas. Logo, um material genérico que se deforma ao ser submetido a uma tensão uniaxial de tração ou compressão, poderá sofrer extensão ou contração respectivamente, caracterizando o movimento (*strain*).

Inúmeros modelos simplificadores foram criados com o intuito de representar a mudança do estado tensional na crosta, desconsiderando configuração das placas tectônicas da litosfera e aceitando-a como única placa (ENGELDER, 1993). Os estados de referência baseiam-se nas propriedades das rochas, condições de contorno do maciço e propriedades térmicas.

O estado de referência listostático é idealizado de maneira simplista considerando que a rocha não apresenta tensão cisalhante ( $\tau = 0$ ), e que qualquer ponto estará sujeito a tensões principais idênticas, conforme apresentada a expressão (2), em que  $\rho$  é a densidade da rocha,  $g$  a força da gravidade e  $z$  a profundidade (ENGELDER, 1993).

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \rho g z \quad (2)$$

Outro modelo proposto é o estado de referência de deformação uniaxial, fundamentado em condições de contorno que não permitem que ocorra alongamento ou encurtamento horizontalmente. Desta maneira, as tensões horizontais são determinadas pela correlação das tensões verticais, que de fato provoca deformações, com o coeficiente de Poisson. A relevância deste estado implica na proximidade de ocorrências reais, como a compactação de sedimentos desconsiderando os efeitos tectônicos, e os esforços horizontais  $\sigma_H = \sigma_h$  determinados por uma relação com o coeficiente de Poisson  $\nu$  e a tensão vertical  $\sigma_V$ , conforme equação (3) (ENGELDER, 1993).

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_V \quad (3)$$

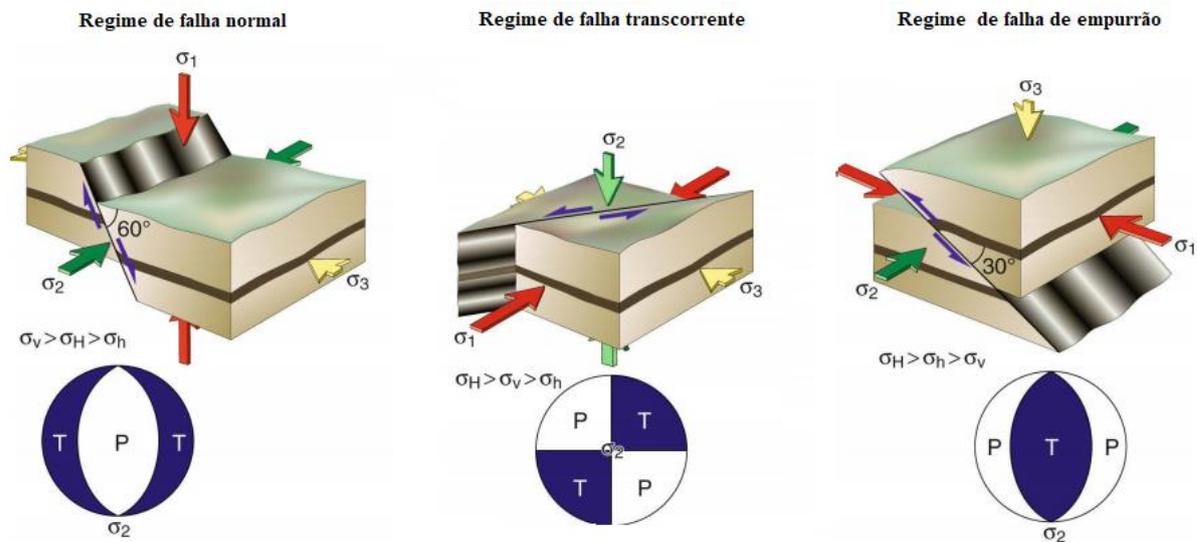
Fossen (2016) ratifica que este estado de referência tensional é significativo e apresenta relevância para falhas normais, possibilitando obter de maneira adequada os esforços para este caso.

Tomando como ponto de partida os estados de referência, os processos que provocam mudanças nas condições de contorno regionais ou locais são resultantes de movimentos das placas tectônicas. Este fato, implica em mudança na componente horizontal das tensões (esforços). Portanto, se houver o desvio do estado de referência este é provocado por esforços tectônicos. A classificação de Anderson, proposta em 1951 (ENGELDER, 1993) para rochas isotrópicas e em regime deformacional uniaxial, é utilizada desde então para explicar a relação dos eixos de esforços tectônicos ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ ) associados aos três principais tipos de falhas geológicas:

- Falha normal: tensão vertical igual a tensão principal máxima ( $\sigma_V = \sigma_1$ ).
- Falha transcorrente: tensão vertical igual a tensão principal média ( $\sigma_V = \sigma_2$ ).
- Falha empurrão: tensão vertical igual a tensão principal mínima ( $\sigma_V = \sigma_3$ ).

A Figura 2 apresenta a classificação de Anderson, incluindo os estereogramas de compressão (P) e tração (T), além do eixo de tensão máxima horizontal  $\sigma_H$ , tensão mínima horizontal  $\sigma_h$  e tensão vertical  $\sigma_V$ .

Figura 2 – Classificação de Anderson (1951) relacionando tensões principais e regime tectônico:  $\sigma_h$  é a tensão mínima horizontal;  $\sigma_H$  é a tensão máxima horizontal;  $\sigma_V$  é a tensão vertical; (P) representa a compressão e (T) a tração;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são as tensões principais.



Fonte: Adaptado de Fossen (2016).

### 2.1.1 Reologia e o Comportamento Rúptil das Rochas

Scott Blair (1969) apresenta uma pesquisa etimológica do termo reologia e estabelece o termo como área das ciências que estuda as propriedades mecânicas dos sólidos, líquidos e gases. Sendo assim, a reologia estuda as deformações e escoamento de sólidos e fluídos, por meio de diferentes abordagens metodológicas avaliando fatores extrínsecos e intrínsecos aos materiais. Na mecânica das rochas destacam-se os fatores externos temperatura, estado tensional, por outro lado a presença de fluídos, anisotropia estrutural e heterogeneidade litológica, propriedades inerentes as rochas.

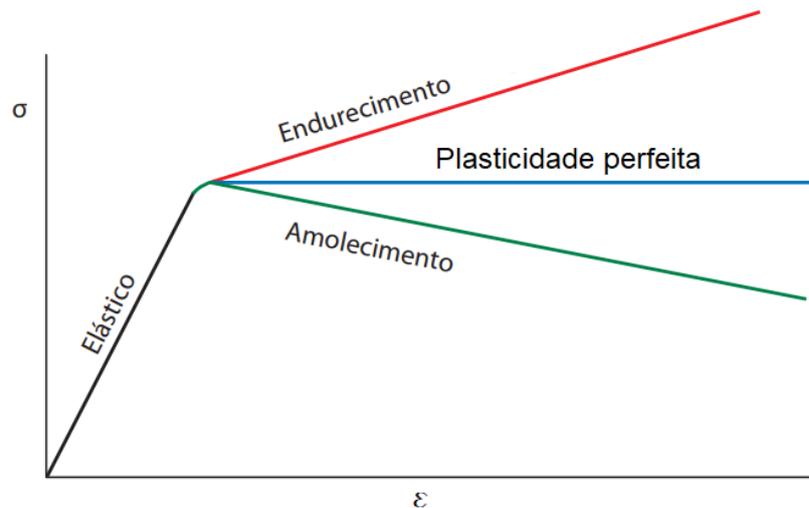
Utilizando a simplificação de que uma amostra de rocha tridimensional é composta por um meio homogêneo e contínuo, sem alteração nas propriedades físicas em qualquer porção, possibilita a descrição matemática e física dentro da mecânica do contínuo por meio de equações constitutivas ou modelos constitutivos. 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).

Considerando determinado material isotrópico, existe condições idealizadas que simplificam o seu comportamento para um histórico de deformações. Dentre as principais, vale ressaltar os comportamentos elástico, plástico e viscoso dos materiais. Os materiais elásticos quando submetido a um estado tensional se deforma e ao findar a aplicação das tensões toda a deformação é recuperada sem o rompimento da estrutura atômica. Já os materiais que apresentam comportamento plástico ao serem submetidos a um estado tensional e após cessar os esforços a deformação não é recuperada por completo, porquanto há modificação na estrutura do material (OLIVELLA; BOSCH, 2002; REDDY, 2013). Por fim, a viscosidade é o parâmetro utilizado para descrever o escoamento dos materiais ao longo do tempo, diretamente associado a temperatura e a taxa de deformação em que é submetido, com valores típicos na geologia da crosta terrestre com ordem de grandeza variando entre  $10^{-13}$  à  $10^{-15} \text{ s}^{-1}$ , equivalente 1 cm/ano (PFIFFNER; RAMSAY, 1982).

As rochas como materiais complexos necessitam de modelos constitutivo 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 3 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, conseqüentemente isto simplifica as modelagens estruturais da litosfera e permite identificar o comportamento de falhamento das rochas (deformações dúcteis e rúpteis) (MORAES, 2016).

Figura 3 – Tipos de comportamento elástico e elastoplásticos para gráfico tensão ( $\sigma$ ) versus deformação ( $\epsilon$ ).



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

O comportamento rúptil das rochas está relacionado ao processo de endurecimento sucedido de amolecimento. Portanto, a deformação rúptil pode estar associada ao processo de gênese de falha por representar de maneira mais adequada o processo de resistência inicial, aumento de resistência no pico e posterior redução. Este fato pode ser observado na transição entre endurecimento e amolecimento na curvatura superior após a tensão do limite elástico, o que propicia o rearranjo estrutural e formação de outras estruturas (PATERSON; WONG, 2005).

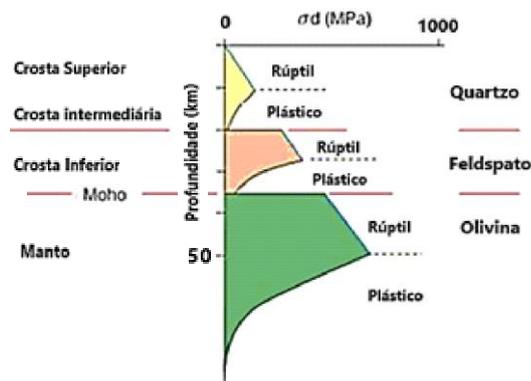
Na mecânica das rochas os termos rúptil e dúctil são aplicados aos materiais a partir do seu comportamento relacionado a tensão e deformação ao qual é submetido. Assim, é possível estabelecer que o comportamento deformacional da rocha está intimamente ligado a tensões externas, histórico de tensões, taxa de deformação, exposição química e variação de temperatura (MANDL, 2000).

Com base em estudos de laboratório e nos conhecimentos da mecânica do contínuo, um material é idealmente rúptil ao ser exposto a um estado tensional deformando até um determinado valor de tensão máxima em que haveria ruptura por fraturamento concomitantemente com uma queda repentina de tensão e liberação de energia de tensão armazenada. Enquanto que, um material é interpretado como dúctil quando ao ser submetido a tensões superiores a da tensão de pico, não apresenta faturamento e permanece deformando (JAEGER; COOK; ZIMMERMAN, 2007). Fossen (2016) exemplifica o comportamento em regime dúctil para rochas metamórficas na crosta intermediária e inferior, estabelecendo e demonstrando um fator de escala macroscópico para este comportamento. Da mesma forma,

este autor estabelece que o termo mais adequado para o comportamento da crosta na região citada é o de plasticidade.

As deformações contínuas em rochas no comportamento rúptil, fenômeno denominado de fluxo, podem ocorrer de maneira abrangente por fluxo cataclástico e/ou ruptura localizada, amplamente influenciado pelas tensões confinantes e baixas temperaturas. Enquanto que para o comportamento dúctil a ocorrência do fluxo ocorre proveniente de deformações plásticas, caracterizadas por *creep*. Este tipo de deformação é controlado pela taxa de deformação aplicada e está associado comumente à temperaturas mais elevadas (MORAES, 2016). A Figura 4 apresenta a reologia da litosfera e sua distribuição esquemática do regime rúptil e plástico associados a variação de profundidade e tensão confinante.

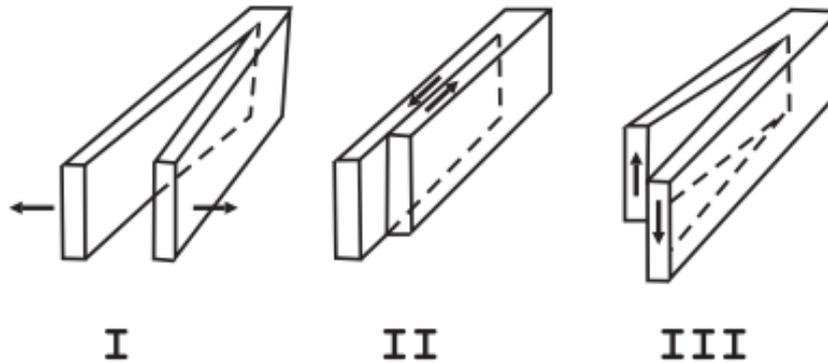
Figura 4 – Distribuição de comportamento reológico (quartzo, feldspato e olivina) a partir da variação da tensão confinante e profundidade da litosfera.



Fonte: Adaptado de Fossen (2016).

As fraturas são descontinuidades formadas no regime rúptil por processos externos ou internos que ocasionam quebra de grãos e/ou perda de coesão (FOSSSEN, 2016). A ocorrência dessas descontinuidades determina as estruturas dependendo do tipo cinemática (cisalhamento, extensão ou compressão). As fraturas tipo Modo I são representadas por deslocamento perpendicular à estrutura decorrente de regime extensional. As fraturas do tipo Modo II (transcorrência) são características do deslizamento paralelo à direção da fratura. As estruturas do Modo III (cisalhamento) representam o deslocamento paralelo ao mergulho do plano de fratura (FOSSSEN, 2016; POLLARD; FLETCHER, 2006). A Figura 5 apresenta ilustrações simples de cada tipo de fratura e respectiva indicação de movimento.

Figura 5 – Tipos de fraturas e antifratura de acordo como o modelo mecânico: Tipo I por deslocamento perpendicular à fratura; Tipo II por transcorrência paralela à direção da fratura; Tipo III por cisalhamento característico do deslocamento paralelo ao mergulho do plano de fratura.



Fonte: Moraes (2016).

Fraturas do modo II e III são associadas as estruturas formadas por superfícies cisalhantes (*shear fracture*), fraturas em pequenas e grandes escalas, em processos de falhas oblíquas extensionais e transcorrência respectivamente. As fraturas do modo I são relacionadas às juntas (*joints*) que apresentam pequenos deslocamentos, são preenchidas por minerais e fluidos, nomeadas veios (*veins*), por processos formadores relacionados às falhas normais.

Há também a formação de antifraturas, o Modo IV (fechamento), relacionado o processo de compressão perpendicular à superfície da fratura (MOLLEMA; ANTONELLINI, 1996). As estruturas formadas por contração como estilólitos (*stylolite*) são provenientes do modo IV formados por processos de transpressão, com ampla importância nos estudos associados a fluxo de fluidos (FOSSEN, 2016).

O uso de critérios de ruptura, ou critério de fluxo (MORAES, 2016), na geologia, considera os modelos constitutivos tratados na mecânica do contínuo para relacionar os processos formadores e comportamentais de estruturas geológicas no ambiente rúptil e dúctil. Nesse caso, há limitação das tensões suportadas e utiliza-se por base os experimentos de laboratório e informações coletadas de campanhas de campo. Portanto, os processos de falhamentos estão associados a presença de tensões, anteriormente descrito pela classificação andersoniana, tipo de cinemática (compressional ou extensional) e características intrínsecas das rochas que compõe o maciço antes da ruptura, relacionados através de modelos constitutivos (MANDL, 2000). A Figura 6 apresenta de maneira esquemática alguns critérios de ruptura, que refletem o comportamento previsto para cada um desses modelos constitutivos, ao longo do gráfico tensão normal versus tensão cisalhante, em que cada critério se mostrou apropriado para cada tipo de fratura e de deformação.



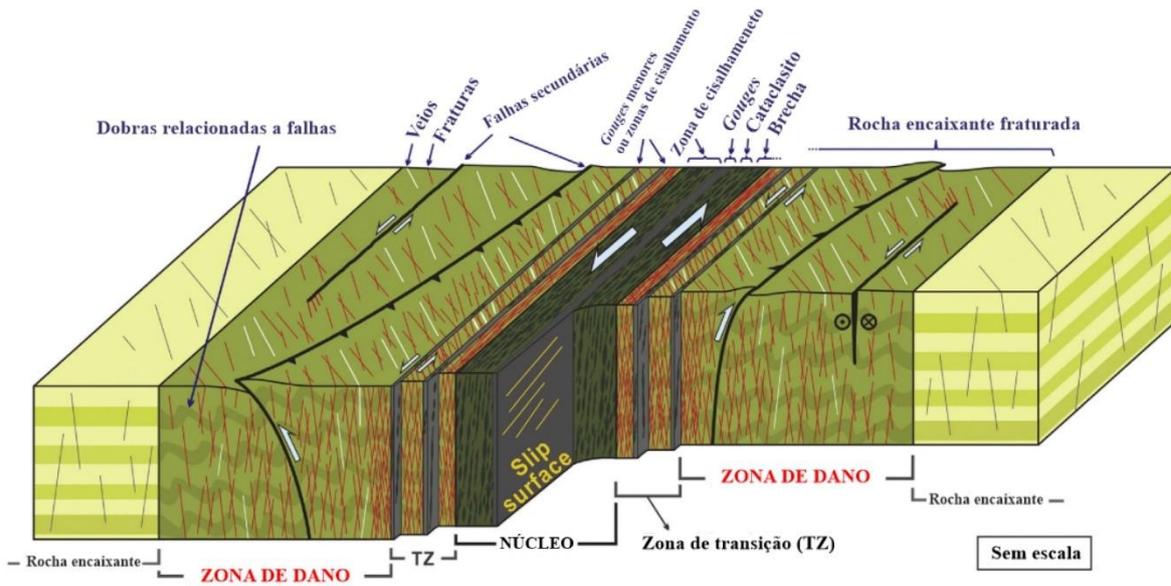
A disposição dos blocos, capa e muro, também são elementos fundamentais para a identificação do tipo de falha, assim a Figura 2 apresenta as falhas do tipo normal, transcorrente, inversa (ou reversa) ou oblíqua. As falhas oblíquas estão associadas ao movimento transcorrente com componente de encurtamento ou extensão, transpressão ou transtensão, respectivamente. Em regimes de transpressão é característico o domínio de estruturas compressionais, como dobras e soerguimentos (SANDERSON; MARCHINI, 1984). As falhas transcorrentes associadas com extensão são caracterizadas por uma movimentação oblíqua de transtensão, o que pode favorecer a formação de bacias sedimentares tipo *pull-apart* (SYLVESTER, 1988).

Vide a complexidade e heterogeneidade das deformações, as falhas usualmente são definidas como zonas de falhas com amplitude nas deformações e estruturas encontradas cujo objetivo é simplificar o entendimento da formação e estabelecer aplicações práticas relacionadas a estas zonas (CHILDS *et al.*, 2009).

Choi *et al.* (2016) dividem a zona de falha basicamente em três porções morfológicas e litológicas dominantes, o núcleo da falha (*core* ou *slip surface*), zona de dano (*damage zone*) e a rocha encaixante (*host rock*). O núcleo da falha representa a região em que está inserido o plano de ruptura que acumula o maior deslocamento entre blocos, maior intensidade de deformação, e onde está localizado os principais tipos de rocha de falha, tais como: *gouges*, cataclasitos, brechas e em menor ocorrência pseudotaquilito (MORAES, 2016). A região do núcleo da falha pode representar um conduto para o fluxo de fluido ou uma barreira hidráulica. O primeiro caso ocorre quando as rochas de falha apresentam alta permeabilidade devido à intensa catáclase. No entanto, esta região pode apresentar uma redução significativa na permeabilidade devido a ocorrência de argilominerais associados ao *gouge* de falha. As zonas de dano são regiões adjacentes ao núcleo que apresentam características de deformação provenientes do processo de falhamento. Nesta região são encontradas fraturas secundárias (e.g. fraturas de cisalhamento, veios, juntas e estilólitos) relacionadas a tensões menores se comparado ao núcleo ( FAULKNER *et al.*, 2010; CHOI *et al.*, 2016; TORABI *et al.*, 2019; CELESTINO *et al.*, em publicação).

A Figura 8 apresenta um modelo conceitual de zona de falha com as estruturas que podem compor cada região a depender do processo formador, do protólito até o núcleo da falha. Contudo, além dos elementos descritos anteriormente, em certos casos há uma região intermediária entre a zona de dano e o núcleo da falha denominada como zona de transição (*transitional zone* ou TZ) que pode aparecer em ambos os lados na zona de dano composta por estruturas deformacionais já existentes na região de zona de falha (CHOI *et al.*, 2016).

Figura 8 – Modelo conceitual de uma zona de falha.

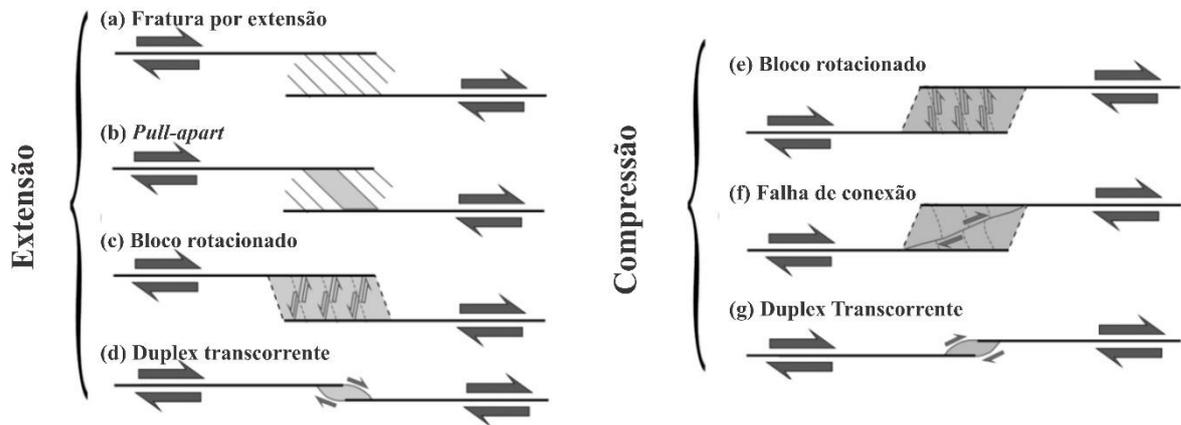


Fonte: Adaptado de Choi *et al.* (2016).

Baseados em trabalhos de campo e revisão da literatura, Kim, Peacock e Sanderson (2004) propuseram a classificação das zonas de dano para falhas transcorrentes, e análogo para falhas normais e de empurrão, com base na localização e nomeando em *tip damage zone* quando localizado próximo a extremidade da falha, *linking damage zone* quando da existência da zona de dano entre dois segmentos de falha próximos, e *wall damage zone*, que ocorre ao longo do comprimento da falha dependendo do modo de formação, modo II e/ou modo III. A classificação além de considerar a posição e modo de formação, considera as estruturas dominantes para cada caso. Então, para falhas do modo II a zona de dano ao redor da extremidade da falha transcorrente é do tipo *tip-damage zone*, neste caso a classificação será determinada pela estrutura dominante, podendo ser do tipo fratura rabo de cavalo, *wing crack*, *splaying* e fratura de cisalhamento antitético.

Nas circunstâncias de dano de ligação entre falhas transcorrentes, *linking damage zone* no modo II, interligadas nas extremidades ocasionalmente variam a depender do processo cinemático. Nos casos extensionais, Figura 9 de (a) à (d), há a formação de fraturas por extensão (*extension fracture*), a citar veios e juntas, *pull-aparts*, blocos rotacionados (*rotated block*) e duplex transcorrente (*isolated lens*). Para o regime em compressão, Figura 9 de (e) à (g), as estruturas que podem ser formadas entre extremidades de segmentos de falhas transcorrentes são os blocos rotacionados, falhas de conexão (*connecting fault*) e duplex transcorrente.

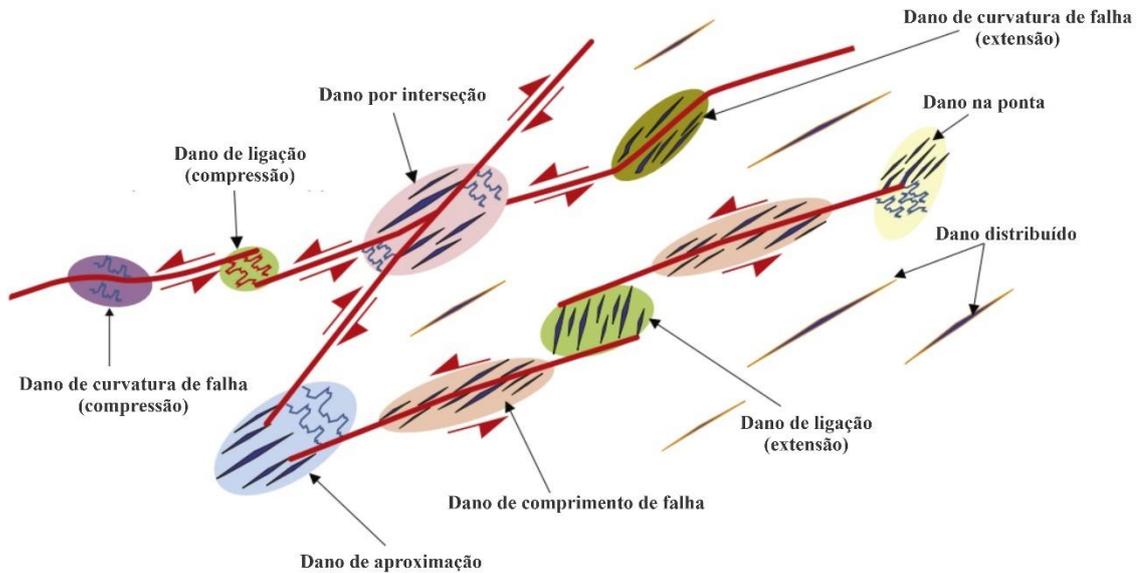
Figura 9 – Classificação da ligação de zonas de dano a depender do sentido da tensão aplicada. Os casos em extensão de (a) à (d), nos quais podem ser desenvolvidas fraturas de extensão, *pull-aparts*, bloco rotacionado e duplex transcorrente, respectivamente. Nos casos em compressão podem ser desenvolvidos, (e) até (g) em ordem, bloco rotacionado, falha de conexão e duplex transcorrente.



Fonte: Adaptado de Kim, Peacock e Sanderson (2004).

Nos casos das zona de dano ao longo do comprimento da falha (*wall damage zone*) foi proposto a divisão inicial em grupos, distintos pela curvatura do comprimento e repetição de estruturas, longas e estreitas, bem como casos de zonas de dano intensas em apenas um lado da falha (KIM; PEACOCK; SANDERSON, 2004). Esses grupos são distintos pelo modo em que as falhas são geradas, pela forma de propagação das estruturas e cinemática formadora, espessura do núcleo e majoritariamente pelas estruturas secundárias formadas. Não obstante, Peacock *et al.* (2017) complementaram a classificação das zonas de dano de ligação, *linking damage zone*, renomeando esse tipo de zona de dano como do tipo zona de dano de interação (*interaction damage zone*) e subdividindo em dois grupos distintos compostos por duas ou mais falhas. O primeiro grupo engloba as zonas de dano de interação por aproximação (*approaching damage zone*), em que a interação é apenas cinemática, ou seja, não há ligação de uma falha com a outra geometricamente, apenas contato cinemático pelo acúmulo de deformações e deslocamentos. O segundo grupo formado pelas zonas de dano por interação em que há o contato geométrico (físico) entre os segmentos de falhas, compondo uma zona de dano por interseção (*intersection damage zone*). Ademais, os autores introduzem duas classificações para zona de dano, a zona de dano de curvatura de falha (*bend damage zone*) ligada diretamente a curvatura do comprimento, e zona de dano distribuída (*distributed damage zone*) que corresponde a uma área na qual a deformação é mais intensa e existe fraturas anteriores a formação de falha. A Figura 10 resume a classificação das zonas de dano, diferenciando-as de acordo com a posição, cinemática e ocorrência.

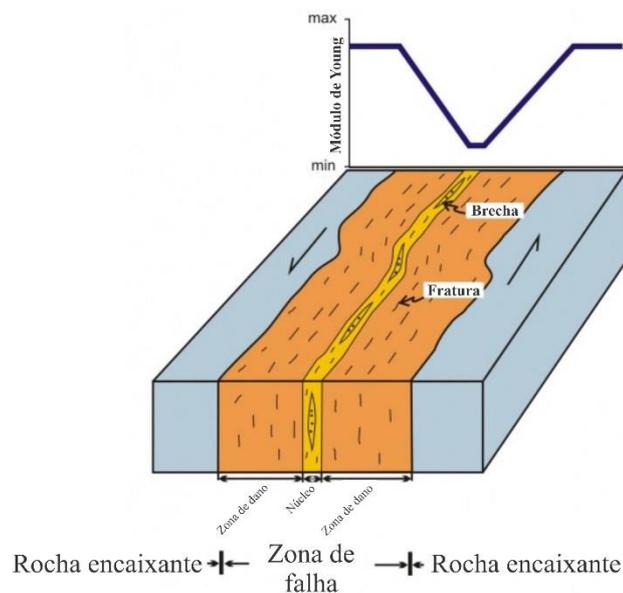
Figura 10 – Classificação ampla das zonas de dano de acordo com a posição e cinemática.



Fonte: Adaptado de Peacock *et al.* (2017).

Gudmundsson (2004) relaciona os processos formadores das zonas de falhas à mudança das características físicas das rochas, especificamente a mudança da rigidez da rocha no desenvolvimento da falha que implica em variação do módulo de Young ( $E$ ), bem como estabelecer relações analíticas entre esse parâmetro mecânico com o comprimento da falha e deslocamento relativo entre os blocos, por meio de análises de campo e ensaios de laboratório. Esse comportamento corrobora ao processo de amolecimento em que o falhamento em ambiente rúptil tem comportamento bem representado. A Figura 11 apresenta esquematicamente a zona de uma falha transcorrente formada e a distribuição do módulo de elasticidade através do comprimento perpendicular ao plano de falha, em que há uma queda progressiva do seu valor na zona de dano até um valor mínimo no núcleo de falha.

Figura 11 – Relação da formação de zona de falha transcorrente e o Módulo de Young.



Fonte: Adaptado de Gudmundsson<sup>1</sup> (2019).

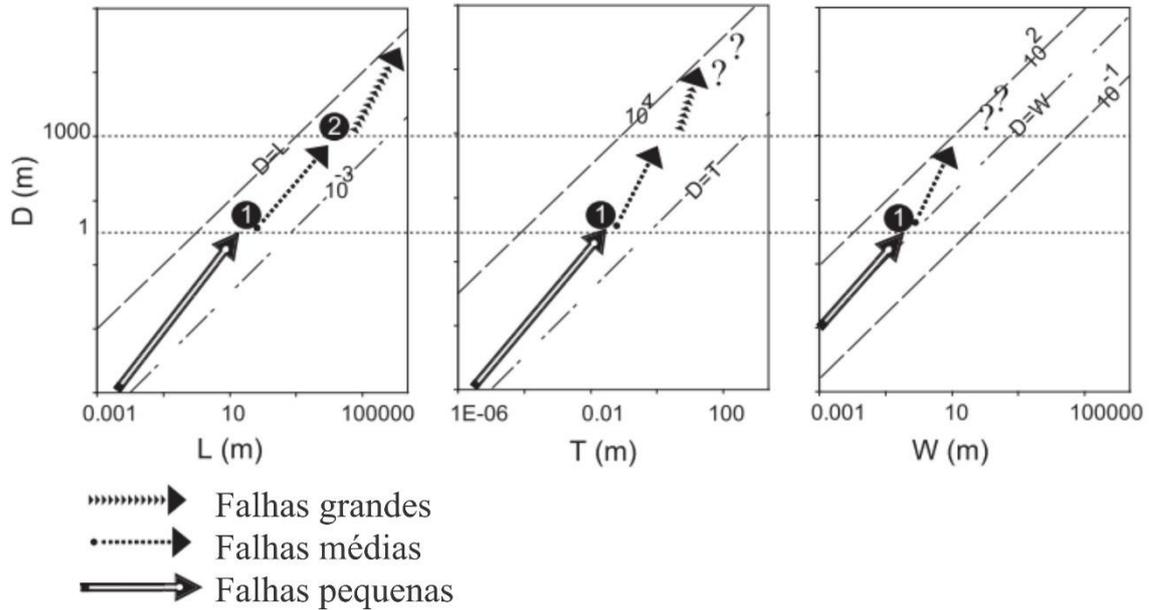
Kim e Sanderson (2005) apresentam uma revisão sistemática para relacionar o deslocamento relativo máximo entre blocos da falha, rejeito máximos das falhas ( $d_{máx}$ ), ao comprimento de falha ( $L$ ). Estes autores estabelecem uma relação entre  $d$  e  $L$  para ajustes às populações de falhas (normais, transcorrentes e reversas). Esta relação entre conjuntos distintos de falha mostra que diferentes relações escalares. Além disso, para um grande número de falhas levantadas o valor da relação  $d_{máx}/L$  é maior que  $10^{-3}$ , sendo influenciado principalmente pelas características mecânicas das estruturas secundárias e da rocha (*e.g.* módulo de elasticidade). Ademais, a evolução da falha e a superposição de eventos no histórico formador têm grande influência na relação de rejeito com comprimento e nos processos de interligação de falha, salvo o caso de reativação de falhas que tende a diminuir o valor da relação.

Contudo, o trabalho de Torabi e Berg (2011) apresenta a não linearidade da transição das dimensões de alguns atributos de falhas (deslocamento de falha, comprimento, espessura do núcleo e espessura da zona de dano) na mudança de escala ao tratar uma base de dados estatísticos globais, sem distinção litologia ou configuração tectônica. Assim, infere-se que a diferença de escala para cada atributo poderia influenciar na hierarquia na ordem das falhas e no entendimento dos processos mecânicos. A Figura 12 apresenta um diagrama conceitual

<sup>1</sup> GUDMUNDSSON, A. Disponível em <[http://agustgudmundsson.co.uk/?attachment\\_id=117](http://agustgudmundsson.co.uk/?attachment_id=117)> Acesso em: nov. 2019.

relacionado o crescimento do deslocamento (D) com o comprimento de falha (L), espessura do núcleo da falha (T) e a espessura da zona de dano (W), todos em metros.

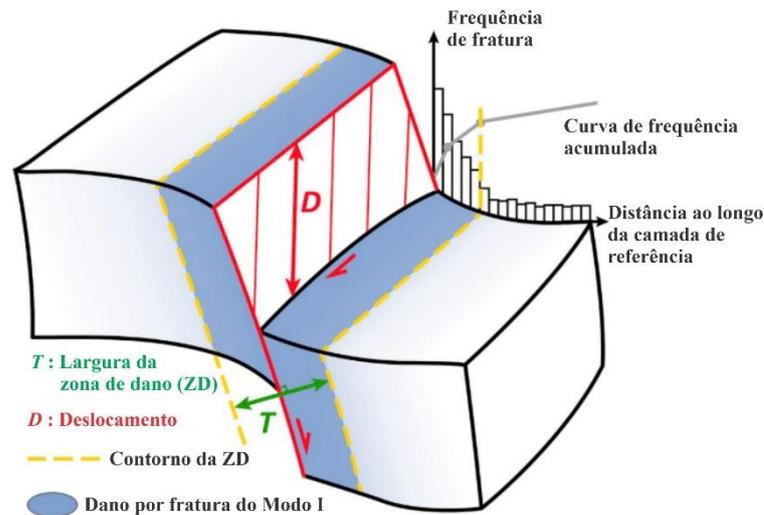
Figura 12 – Diagrama conceitual da evolução das falhas em diferentes escalas.



Fonte: Torabi e Berg (2011).

Usualmente as zonas de dano são determinadas a partir de análises de campo utilizando técnicas tradicionais de levantamentos estruturais de detalhe via linha de varredura (*scanlines*). A técnica de *scanlines* consiste em coletar atributos de estruturas que cruzam uma determinada linha demarcada no afloramento (MIRANDA *et al.*, 2018; ORTEGA; MARRETT; LAUBACH, 2006; PRIEST; HUDSON, 1981). Choi *et al.* (2016) propõe uma metodologia para a determinação da largura das zonas de dano utilizando o método analítico das *scanlines* em diferentes pontos ao longo do comprimento de falha, com o uso de gráficos de frequência acumulativa e estabelecendo que mudança abrupta da inflexão da curva indica a largura da zona. A Figura 13 apresenta um esquema básico de como é realizado a determinação da espessura da zona de dano utilizando *scanlines* e gráficos de frequência acumulada.

Figura 13 – Esquema da determinação da espessura da zona de dano pela metodologia de Choi *et al.* (2016).



Fonte: Adaptado de Mayolle *et al.* (2019).

Contudo, a classificação tridimensional da arquitetura das zonas de falha é uma atividade extremamente complexa, visto as incertezas envolvidas no processo de estimativa de deslocamento, bem como a dificuldade de descrição das estruturas dominantes em falhas de grande escala com geometria complexa (KIM; PEACOCK; SANDERSON, 2004; KIM; SANDERSON, 2005). Ainda assim observações de campo e inferências devem ser realizadas, associadas à interpretação de possíveis estágios evolutivos, abastecendo e servindo como ferramenta para modelos analógicos. Portanto, a caracterização detalhada da deformação e interação de falhas auxilia na acurácia da quantificação da espessura de zonas de dano, servindo como elemento de calibração para simulações numéricas de zonas de falha (PEACOCK *et al.*, 2017).

### 3 MECÂNICA DO CONTÍNUO E PLASTICIDADE

A seguir serão apresentados os conceitos básicos da mecânica do contínuo baseados nos trabalhos de Trusdell e Toupin (1960), Gurtin (1981), Gonzalez e Stuart (2008) e Reddy (2013).

O estudo de um meio contínuo formado por infinitas partículas é proposto macroscopicamente, sem considerar quaisquer descontinuidades a nível atômico ou molecular, utilizando funções matemáticas para a descrição deste meio. Baseado nos conhecimentos de mecânica dos sólidos, a condição de equilíbrio de um corpo deve ser respeitada e mantida. Portanto, seja o corpo  $B$  composto por uma superfície  $\Gamma$ , ocupa um volume  $\Omega$  no espaço, e que para a superfície descrita esteja submetida a um tensor tensões de Cauchy  $\boldsymbol{\sigma}$ , e  $\mathbf{b}$  o vetor de forças de corpo. Considerando que há uma relação das deformações infinitesimais e os deslocamentos, como também as forças de corpo  $F$  com uma matriz de rigidez para o corpo. A equação de equilíbrio para um caso quase-estático que obedece às leis de conservação de massa, momento e energia, determinado pela Equação (4).

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

#### 3.1 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS

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. Reddy (2013) resume bem esses requisitos a seguir.

1. Todas as equações constitutivas devem respeitar as leis de conservação de massas, equilíbrio 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.

### 3.1.1 Invariantes de Tensão

A seguir serão apresentados os invariantes fundamentais para a compreensão do texto e das 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 (5).

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} - p\mathbf{I} \quad (6)$$

$$p = tr(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (7)$$

Onde  $I$  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 (8).

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} - p & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} - p \end{bmatrix} \quad (8)$$

A segunda invariante de tensões que será necessária, corresponde a segunda invariante de tensões desviadoras dado pela equação (9).

$$J = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_{xx} - p)^2 + (\sigma_{yy} - p)^2 + (\sigma_{zz} - p)^2 + 2(\tau_{xy}^2 + \tau_{yx}^2 + \tau_{xy}^2) \right]} \quad (9)$$

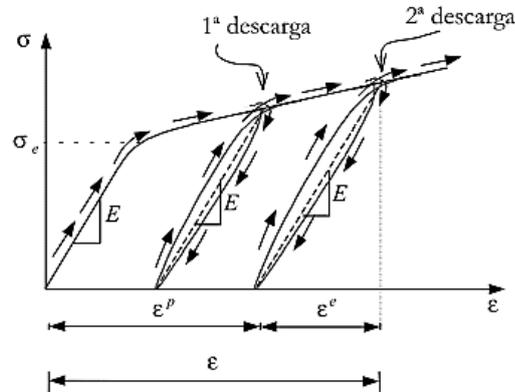
A formulação apresenta para os invariantes visa a compreensão dos passos posteriores na descrição e implementação do modelo elastoplástico.

### 3.1.2 Fundamentos da Plasticidade

A definição proposta por Hill (1998) é que a teoria da plasticidade corresponde, partido de observações macroscópicas experimentais, ao estudo matemático da relação tensão e deformação de sólidos plasticamente deformados perante estado de tensão uniforme. Na seção 2.1.1 foi apresentado o conceito do comportamento plástico de um material, lembrando, um corpo submetido a tensões externas sofre deformações inicialmente reversíveis, regime elástico, e posteriormente deformações plásticas, irreversíveis.

O comportamento plástico pode ser representado pela Figura 14, 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 ( $\boldsymbol{\epsilon}^e$ ). 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 ( $\boldsymbol{\epsilon}^p$ ). Caso o processo descrito fosse repetido em ciclos, com incremento de tensões, a parcela elástica permaneceria a mesma e aumentaria a deformação plástica.

Figura 14 – Comportamento uniaxial de materiais elastoplásticos por meio do gráfico tensão ( $\sigma$ ) versus deformação ( $\epsilon$ ).



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 ( $\epsilon$ ) de um sólido sujeito a um estado de tensões, superior ao limite elástico, nas parcelas da deformação plástica e elástica. A Equação (10) apresenta a formulação deste princípio.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (10)$$

A formulação da equação constitutiva elástica e plástica, bem como os conceitos básicos ao entendimento das formulações aqui apresentadas e que será nas próximas seções apresentada 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).

### 3.1.2.1 Equação Constitutiva Elástica

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 (11).

$$\sigma = \mathbf{D}_e \epsilon \quad (11)$$

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.

### 3.1.2.2 Função e Superfície de Fluência

Um material elastoplástico pode assumir o comportamento elástico ou plástico a depender o estado de tensão ao qual está submetido. O estado de tensões ( $\sigma_y$ ) limita a região elástica e a partir desse valor, ocorre o início das tensões plásticas, porém a partir desse momento não é possível determinar as tensões totais utilizando unicamente as deformações totais. Assim, um parâmetro de estado  $\kappa$  contendo o histórico de tensões e deformações do material deve ser introduzido e uma função de fluência  $F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)$  é definida relacionando o parâmetro de estado e tensões (POTTS; ZDRAVKOVIC, 1999). Portanto, a função de fluência restringe uma região no espaço das tensões, através de uma superfície, o comportamento elástico e plástico.

O domínio elástico ( $\mathbb{E}_\sigma^e$ ) pode ser apresentado como o interior do domínio da função de fluência  $F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) = 0$ , representado na equação (12).

$$\mathbb{E}_\sigma^e = \{\boldsymbol{\sigma} \mid F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) < 0\} \quad (12)$$

A superfície de fluência ( $\partial\mathbb{E}_\sigma$ ) e o espaço das tensões admissíveis são representados respectivamente pelas equações (13) e (14).

$$\partial\mathbb{E}_\sigma = \{\boldsymbol{\sigma} \mid F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) > 0\} \quad (13)$$

$$\mathbb{E}_\sigma = \mathbb{E}_\sigma^e \cup \partial\mathbb{E}_\sigma = \{\boldsymbol{\sigma} \mid F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) \leq 0\} \quad (14)$$

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 (15).

$$h = h(\varepsilon^p) \quad (15)$$

Nos casos em que há solicitações multiaxiais é possível que a mudança no tamanho da superfície provocado por componentes de deformação plástica acumulada, nesta situação o aumento da superfície é denominado trabalho plástico  $W^p$ , expresso pela equação (POTTS; ZDRAVKOVIC, 1999).

$$W^p = \int \{\boldsymbol{\sigma}\}^T \{\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^p\} \quad (16)$$

A distinção entre endurecimento isotrópico e cinemático reflete diretamente em como a superfície de fluência muda a forma e tamanho, no primeiro caso pode ocorrer expansão ou diminuição enquanto que para a segunda opção a superfície é transladada sem que ocorra mudança de tamanho ou forma.

### 3.1.2.3 Tensor Elastoplástico

O material apresenta comportamento elástico para condição, anteriormente exposta, de  $F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) < 0$ . Nesse sentido e utilizando a equação anterior (11), relação entre os vetores de tensão e deformação através de um tensor elástico. As equações (17) e (18) apresentam, respectivamente os vetores de tensão e deformação.

$$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{xz} \ \tau_{yz})^T \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{xz} \ \gamma_{yz})^T \quad (18)$$

Para as situações em que o material plastifica, ou seja, ocorre deformações plásticas e isso implica em  $F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) = 0$ , considerando o parâmetro plástico diferente de zero, derivando-se a função de fluência em relação ao tempo, teremos que:

$$\dot{F} = \left[ \frac{\partial F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right]^T \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \left[ \frac{\partial F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)}{\partial \kappa} \right]^T \dot{\kappa} = 0 \quad (19)$$

Considerando que o tensor elastoplástico  $\mathbf{D}_{ep}$ , e utilizando a decomposição aditiva, em que a tensão e deformação variam com o tempo, teremos as equações (20), (21) e (22).

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D}_e \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (20)$$

$$\mathbf{D}_{ep} = \mathbf{D}_e - \mathbf{D}_p \quad (21)$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p \quad (22)$$

Relacionando as equações e utilizando uma regra de fluxo que relaciona a deformação com uma função potencial de plastificação  $P(\boldsymbol{\sigma}, m)$ , em que  $m$  é um vetor parâmetro de estado,

direcionando o incremento de deformação, é possível chegar a uma equação do multiplicador plástico da equação (23).

$$\Lambda = - \frac{\left[ \frac{\partial F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right]^T \mathbf{D}_e \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{\left[ \frac{\partial F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right]^T \mathbf{D}_e \left[ \frac{\partial P(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right] + A} \quad (23)$$

A constante  $A$  foi inserida justamente para caracterizar o comportamento do material, se plasticidade perfeita  $A = 0$ , se ocorrer endurecimento ou amolecimento será descrito pela equação (24).

$$A = - \frac{1}{\Lambda} \left[ \frac{\partial F(\boldsymbol{\sigma}, m)}{\partial \kappa} \right]^T \frac{\partial \kappa}{\partial \varepsilon^p} \varepsilon^p \quad (24)$$

Por fim, a equação do tensor elastoplástico é definido pela equação (25).

$$\mathbf{D}_{ep} = \mathbf{D}_e - \frac{\mathbf{D}_e \left[ \frac{\partial P(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right] \left[ \frac{\partial F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right]^T \mathbf{D}_e}{\left[ \frac{\partial F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right]^T \mathbf{D}_e \left[ \frac{\partial P(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right] + A} \quad (25)$$

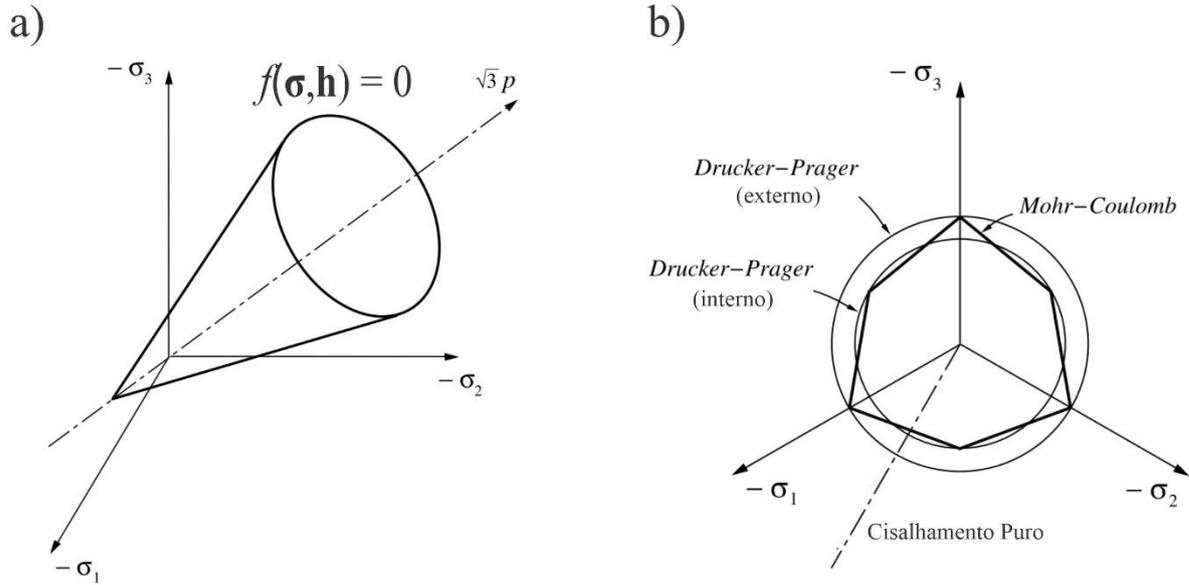
### 3.2 MODELO CONSTITUTIVO DE DRUCKER-PRAGER

O modelo constitutivo elastoplástico desenvolvido por Drucker e Prager (1951) foi desenvolvido inicialmente para problemas geotécnicos utilizando a teoria clássica da mecânica dos solos. 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. Utilizando da notação apresentada por Souza Neto, Peric e Owens (2008), a função de fluência pode ser escrita conforme equação (26).

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{h}) = J + \eta p - \xi c \quad (26)$$

Os parâmetros  $\eta(c, \phi)$  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 15 exhibe a representação gráfica no campo das tensões principais da superfície de Drucker-Prager.

Figura 15 – Modelo de Drucker-Prager: a) superfície de fluência no espaço das tensões principais; b) aproximação da aproximação de Mohr-Coulomb.



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

Os valores dos parâmetros de aproximação pelos vértices externos da envoltória de Mohr-Coulomb pelas equações (27) e (28), delimitando o cone compressional.

$$\eta = \frac{6 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (27)$$

$$\xi = \frac{6 \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (28)$$

Entretanto, para o caso da aproximação ser interna aos vértices da envoltória de Mohr-Coulomb no plano  $\pi$ , conhecido por cone extensional, então os parâmetros  $\eta$  e  $\xi$  serão determinados pelas equações (29) e (30).

$$\eta = \frac{6 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (29)$$

$$\xi = \frac{6 \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (30)$$

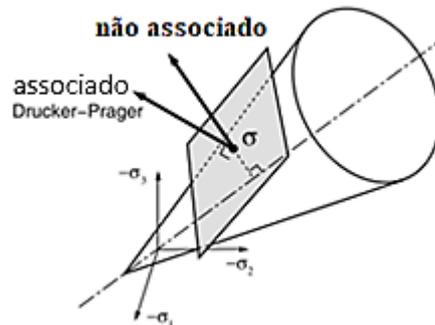
Por fim, para os casos em que se deseja a coincidência com o eixo de ruptura se utiliza as equações (31) e (32).

$$\eta = \frac{3 \sin \phi}{\sqrt{3}} \quad (31)$$

$$\xi = \frac{2 \cos \phi}{\sqrt{3}} \quad (32)$$

O uso de uma regra de fluxo determina a direção da deformação plástica quando a condição de tensão limite elástico é ultrapassada. Assim, o modelo constitutivo de Drucker-Prager deve ser tratado para dois casos, na superfície de fluência do cone e no vértice. Portanto, faz-se uso de uma regra de fluxo, em que para plasticidade associada utiliza-se a derivada da equação (26), e os ângulos de atrito interno e dilatância  $\psi$  são iguais,  $\phi = \psi$ , ocasionando plasticidade perfeita. Contudo, para este caso há uma previsão excessiva de dilatância justificando o uso de uma regra de fluxo não associado, para minimizar este efeito. A Figura 16 apresenta as condições de fluxo para ambos os casos.

Figura 16 – Vetor de fluxo associado e não associado para a superfície de Drucker-Prager.



Fonte: Adaptado de Souza Neto, Perić e Owen (2008).

Utilizando as equações apresentadas, adotou-se uma regra de fluxo não associado em que a função potencial é definida pela equação (33) e  $\phi \neq \psi$ .

$$g(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{h}) = J + \bar{\eta}p \quad (33)$$

Análogo a formulação de aproximação da superfície de fluência de Drucker-Prager à de Mohr-Coulomb,  $\bar{\eta}$  é definida em função da dilatância para o cone externo, interno e coincidente com a ruptura, respectivamente as equações (34), (35) e (36).

$$\bar{\eta} = \frac{6 \sin \psi}{\sqrt{3}(3 - \sin \psi)} \quad (34)$$

$$\bar{\eta} = \frac{6 \sin \psi}{\sqrt{3}(3 + \sin \psi)} \quad (35)$$

$$\bar{\eta} = \frac{3 \sin \psi}{\sqrt{3}} \quad (36)$$

Logo para a superfície de fluência de Drucker-Prager a equação (37) representa o vetor de fluxo.

$$\mathbf{n} = \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\mathbf{S}}{\|\mathbf{S}\|} - \frac{\bar{\eta}}{3} \mathbf{I} \quad (37)$$

Alguns trabalhos ratificam que os modelos elastoplásticos com regra de fluxo não associado são adequados para modelar a gênese de falha, visto que o uso de regra de fluxo associada superestimar a dilatância da rocha proporcionando maiores deformações volumétricas no processo cisalhante. (*e.g.* MÄKEL; WALTERS, 1993; GERBAULT; POLIAKOV; DAIGNIERES, 1998; MANDL, 2000).

## 4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

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 (*e.g.* SCHÖPFER; CHILDS; WALSH, 2007a, 2007b; CLAUSEN *et al.*, 2019), e o método dos elementos finitos (*FEM*) aplicados à simulações de geração e reativação de falhas (*e.g.* NEVITT; POLLARD, 2017; XU; BUSETTI; ARSON, 2017; LIU *et al.*, 2018; NABAVI; ALAVI; JABARABADI, 2019).

Neste 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 (*e.g.* GENS *et al.*, 2010; PEREIRA *et al.*, 2014; 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).

### 4.1 FORMULAÇÃO IMPLÍCITA

A simplicidade em implementar o modelo constitutivo elastoplástico de Drucker-Prager vem sendo tratado no texto consiste na existência apenas de uma singularidade, no vértice, e há a simetria com o eixo hidrostático. 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 (38).

$$\Delta t = t_{n+1} - t_n \quad (38)$$

O estado de tensões *trial*, o estado de tensão por tentativa, indicado pelo índice sobrescrito. Para o entendimento inicial o tensor de tensões é atualizado pela equação (39), onde

$\Delta\gamma$  corresponde é o 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.

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{\text{trial}} - \Delta\gamma\mathbf{D}_e:\mathbf{n}_{n+1} \quad (39)$$

O incremento da deformação plástica será calculado utilizando o vetor de fluxo para a porção suave do cone de acordo com a equação (40).

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^p = \Delta\gamma\mathbf{n}_{n+1} = \Delta\gamma\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\frac{\mathbf{S}_{n+1}^{\text{trial}}}{\|\mathbf{S}_{n+1}^{\text{trial}}\|} - \frac{\bar{\eta}}{3}\mathbf{I}\right) \quad (40)$$

Consequentemente a atualização de tensões ficará:

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{\text{trial}} - \Delta\gamma\left(\sqrt{2}G\frac{\mathbf{S}_{n+1}^{\text{trial}}}{\|\mathbf{S}_{n+1}^{\text{trial}}\|} - K\bar{\eta}\mathbf{I}\right) \quad (41)$$

Os parâmetros  $K$  e  $G$  representam os módulos elásticos volumétrico e cisalhante, respectivamente, equações (42) e (43). No presente trabalho  $E$  representa o módulo de Yong e  $\nu$  o coeficiente de Poisson.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (42)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (43)$$

Reestruturando a equação (41) em função das tensões hidrostáticas e desviadoras é possível obter as equações (44) e (45).

$$\mathbf{S}_{n+1} = \left(1 - \frac{\sqrt{2}G}{\|\mathbf{S}_{n+1}^{\text{trial}}\|}\right)\mathbf{S}_{n+1}^{\text{trial}} \quad (44)$$

$$p_{n+1} = p_{n+1}^{\text{trial}} - K\bar{\eta}\Delta\gamma \quad (45)$$

A condição de consistência da formulação, ou seja, condição associada a superfície de fluência e a regra de fluxo, ficará representado pela equação (46).

$$f_{n+1} = \frac{\sqrt{2}}{2}\|\mathbf{S}_{n+1}\| + \eta p_{n+1} - \xi c = 0 \quad (46)$$

Fazendo usos das equações apresentadas é possível chegar na equação (47) para o multiplicador plástico. Após esse passo há a atualização das tensões através da equação (41).

$$\Delta\gamma = \frac{f_{n+1}^{\text{trial}}}{G + K\eta\bar{\eta}} \quad (47)$$

Para o vértice, singularidade, as tensões serão atualizadas conforme equação (48) a equação de consistência será reduzida para a seguinte forma:

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1} = (p_{n+1}^{\text{trial}} - K\Delta\varepsilon_V^p)\mathbf{I} \quad (48)$$

$$c\frac{\xi}{\bar{\eta}} - p_{n+1}^{\text{trial}} + K\Delta\varepsilon_V^p = 0 \quad (49)$$

O retorno ao cone é garantido utilizando a uma condição de retorno expresso pela equação (50), para o parâmetro  $\gamma$ , se verdadeiro o algoritmo é validado. Caso contrário utiliza-se a condição de retorno para o vértice.

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \|\mathbf{S}_{n+1}^{\text{trial}}\| - G\Delta\gamma = 0 \quad (50)$$

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. O Quadro 1 apresenta de maneira esquemática e resumida o algoritmo implementado por Beserra (2010).

Quadro 1 – Algoritmo de implementação implícita do modelo de Drucker-Prager.

## 1) Base de dados

Entrada:

$$\sigma_n, \Delta \epsilon, \epsilon_n^p$$

$$E, \nu, c, \phi, \psi$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (42)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (43)$$

## 2) Estado Trial

$$\sigma_{n+1}^{\text{trial}} = \sigma_n - \mathbf{D}_e : \Delta \epsilon \quad (51)$$

$$f^{\text{trial}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \|\mathbf{s}_{n+1}^{\text{trial}}\| + \eta p_{n+1}^{\text{trial}} - \xi c \quad (52)$$

## 3) Verificar se passo é elástico ou elastoplástico

$$\text{Se } f^{\text{trial}} \leq 0 \quad (53)$$

$$\text{Então } \begin{cases} \sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{\text{trial}} \\ \Delta \epsilon^p = 0 \end{cases} \quad (54)$$

$$\text{Senão } \begin{cases} \Delta \gamma = \frac{f^{\text{trial}}}{G + K\eta\bar{\eta}} \\ \Delta \epsilon^p = \gamma^{n+1} \frac{\partial g}{\partial \sigma} \\ \sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{\text{trial}} - \mathbf{D}_{ep} : \Delta \epsilon^p \end{cases} \quad (55)$$

## 4) Verifica tensão no vértice

$$\text{Se } \frac{\|\mathbf{s}_{n+1}^{\text{trial}}\|}{\sqrt{2}} < \gamma^{n+1} \quad (56)$$

$$\text{Então } \begin{cases} \sigma_{n+1} = \frac{c\xi}{\eta} \\ \Delta \epsilon^p = \mathbf{D}_{ep} : (\sigma_{n+1} - \sigma_n) \end{cases} \quad (57)$$

Fim.

Fonte: Adaptado de Beserra (2010).

## 4.2 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 plástico 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.

Seguindo o fio da implementação realizada por Beserra (2010), o primeiro ponto em que houve mudança, como citado, foram nos passos de tempo. Assim, o multiplicador plástico apresentado na equação (58), 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 ( $\Delta t^n$ ).

$$\gamma^{n+1} = \frac{\Delta t^{n+1}}{\Delta t^n} \gamma^n \quad (58)$$

A equação anterior tem reflexo direto na determinação das deformações plásticas, conforme apresentado na equação (55). Beserra (2010) propôs o cálculo das deformações totais através da equação (59), estimando as deformações totais a partir da projeção das deformações totais do tempo anterior.

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^* = \frac{\Delta t^{n+1}}{\Delta t^n} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_n \quad (59)$$

O estado de tensões trial é determinado partindo-se da projeção das deformações utilizando a equação (60). O estado de plastificação será verificado utilizando o novo estado de tensões para a equação

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{\text{trial}*} = \boldsymbol{\sigma}_n - \mathbf{D}_e : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^* \quad (60)$$

$$f^{\text{trial}*} = \frac{\sqrt{2}}{2} \|\mathbf{S}_{n+1}^{\text{trial}*}\| + \eta p_{n+1}^{\text{trial}*} - \xi c \quad (61)$$

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, equação (62).

$$\gamma^{n+1} = \frac{f^{\text{trial}*}}{G + K\eta\bar{\eta}} \quad (62)$$

O restante do algoritmo é análogo ao apresentado na seção 4.1, com diferença apenas na matriz tangente consistente que passa a ser calculada com o passo de tempo anterior, tornando ainda mais robusto computacionalmente. O Quadro 2 apresenta esquematicamente o algoritmo implementado, os índices das equações que se repetem indicam que já foi citado anteriormente.

Quadro 2 – Esquema do algoritmo IMPL-EX.

1) Base de dados

$$\text{Entrada: } \left\{ \begin{array}{l} K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \end{array} \right. \quad (42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_n, \Delta \epsilon, \epsilon_n^p \\ E, \nu, c, \phi, \psi \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} G = \frac{E}{2(1+\nu)} \end{array} \right. \quad (43)$$

2) Se IMPL-EX, estima-se o multiplicador plástico

$$\Delta \epsilon_{n+1}^* = \frac{\Delta t^{n+1}}{\Delta t^n} \Delta \epsilon_n \quad (59)$$

$$\sigma_{n+1}^{\text{trial}*} = \sigma_n - \mathbf{D}_e : \Delta \epsilon_{n+1}^* \quad (60)$$

$$f^{\text{trial}*} = \frac{\sqrt{2}}{2} \|\mathbf{S}_{n+1}^{\text{trial}*}\| + \eta p_{n+1}^{\text{trial}*} - \xi c \quad (61)$$

$$\gamma^{n+1} = \frac{f^{\text{trial}*}}{G + K\eta\bar{\eta}} \quad (62)$$

3) Estado *trial* definido para ambos os algoritmos (implícito e IMPL-EX)

$$\sigma_{n+1}^{\text{trial}} = \sigma_n - \mathbf{D}_e : \Delta \epsilon \quad (51)$$

$$f^{\text{trial}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \|\mathbf{S}_{n+1}^{\text{trial}}\| + \eta p_{n+1}^{\text{trial}} - \xi c \quad (52)$$

4) Se implícito, calcula multiplicador plástico

$$\gamma^{n+1} = \frac{f^{\text{trial}*}}{G + K\eta\bar{\eta}} \quad (62)$$

5) Verificar se o passo é elástico ou elastoplástico

$$\text{Se } f^{\text{trial}} \leq 0 \quad (53)$$

$$\text{Então } \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{\text{trial}} \\ \Delta \epsilon^p = 0 \end{array} \right. \quad (54)$$

$$\text{Senão } \left\{ \begin{array}{l} \gamma^{n+1} = \frac{f^{\text{trial}}}{G + K\eta\bar{\eta}} \\ \Delta \epsilon^p = \gamma^{n+1} \frac{\partial g}{\partial \sigma} \\ \sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{\text{trial}} - \mathbf{D}_{ep} : \Delta \epsilon^p \end{array} \right. \quad (63)$$

6) Verifica tensão no vértice

$$\text{Se } \frac{\|\mathbf{S}^{\text{trial}}\|}{\sqrt{2}} < \gamma^{n+1} \quad (56)$$

$$\text{Então } \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{n+1} = \frac{c\bar{\xi}}{\eta} \\ \Delta \epsilon^p = [\mathbf{D}_{ep}]^{-1} : (\sigma_{n+1} - \sigma_n) \end{array} \right. \quad (64)$$

Fim.

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 3.

Quadro 3 – Algoritmo para controle do passo de tempo.

1) Base de dados		
Entrada:		
	$dtime_{min}$	
	$F_{tol}$	
2) Condição de consistência		
	Se	$f > 0, g > 0 \text{ e } dtime > dtime_{min}$ (65)
	Então	$Fator = \frac{1 + F_{tol}}{1 + f}$ (66)
		$dtime = dtime \times Fator$ (67)
Fim.		

Fonte: Adaptado de Acioli (2017).

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

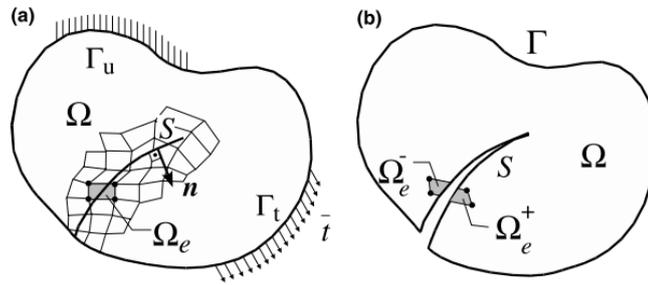
A complexidade ao se estudar maciços rochosos é associada diretamente a presença de inúmeras descontinuidades no ambiente geológico, como por exemplo fraturas e falhas. Uma alternativa à simulação destas descontinuidades inerentes aos materiais na mecânica do contínuo advém da utilização da técnica de descontinuidades fortes incorporadas, que consiste em caracterizar as descontinuidades como saltos no campo dos deslocamentos através de linhas fixas no material (SIMO; OLIVER; ARMERO, 1993).

O trabalho de Oliver *et al.* (2001) apresenta a comparação duas famílias de aplicações numéricas são amplamente utilizadas para a simulações de descontinuidades, mecânica da fratura linear e a abordagem utilizando a mecânica de contínuo, este através das equações constitutivas não lineares que conduz bandas de deformação estreitas e evidenciando a necessidade de outras soluções que incluem, por exemplo, regularização de malha para diminuir oscilações numéricas. Nesse contexto, os autores apresentam uma vasta revisão bibliográfica do desenvolvimento da técnica de descontinuidades fortes e ressaltam como qualidades ao uso da técnica:

- 1) A utilização das equações não lineares que regem a mecânica do contínuo para tensão e deformação para materiais inelásticos;
- 2) Abordagem baseada na consideração cinemática das descontinuidades fortes;
- 3) As análises são matematicamente compatíveis pela relação de 1) e 2).

Esquemáticamente Manzoli e Shing (2006) apresentam um corpo  $\Omega$  contendo uma descontinuidade cuja interface é determinada por  $S$ , conforme apresentado na Figura 17. A Figura 17(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 quadrangular é dividido em duas porções  $\Omega_e^-$  e  $\Omega_e^+$  quando a superfície de contorno submetido a tração  $\bar{t}$ , Figura 17(b)

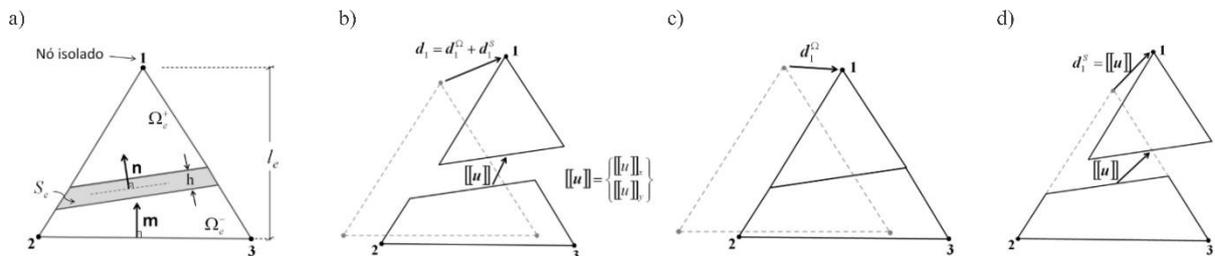
Figura 17 – Corpo arbitrário com descontinuidade incorporada: (a) domínio discretizado próximo a descontinuidade incorporada; (b) configuração do corpo deformado, separando o elemento  $\Omega_e$  em duas partes  $\Omega_e^-$  e  $\Omega_e^+$ .



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 condigo em elementos finitos CODE-BRIGHT, amplamente aplicado e testado na literatura (e.g. OLIVER, 1989; DVORKIN; CUITIÑO; GIOIA, 1990; 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 18, 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 18 – 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 (68).

$$u = u_s + u_\Omega \quad (68)$$

Assim, 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 (69) e (70) respectivamente.

$$\llbracket \mathbf{u} \rrbracket = \begin{Bmatrix} \llbracket u \rrbracket_x \\ \llbracket u \rrbracket_y \end{Bmatrix} \quad (69)$$

$$H_{S_e} = \begin{cases} 1 & \text{em } \Omega_e^+ \\ 0 & \text{em } \Omega_e^- \end{cases} \quad (70)$$

Portanto, considerando que dentro do elemento o movimento relativo da interface é uniforme, a parcela do corpo rígido é definida conforme equação (71)

$$u_s = H_{S_e} \llbracket \mathbf{u} \rrbracket \quad (71)$$

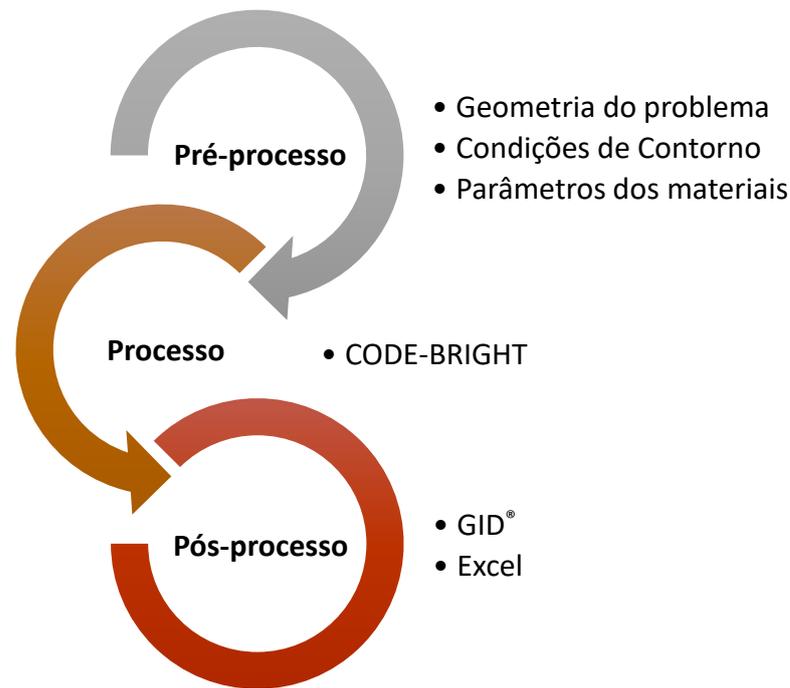
## 5 MODELAGEM NUMÉRICA DE ZONA DE FALHA

A modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos tem se desenvolvido em consonância com os avanços tecnológicos e metodológicos na geologia estrutural, buscando modelar de maneira apropriada afloramentos e condições estruturais de campo com o intuito de auxiliar no entendimento da gênese e acúmulo de processos cinemáticos dessas estruturas. Nesse contexto, serão apresentadas modelagens numéricas da formação de falhas em regime transcorrente, oblíquas e normal. Além disso, será considerado a reativação de zonas de fraqueza pré-existentes a partir da aplicação do método das descontinuidades incorporadas

O fluxo das simulações consiste nas etapas de pré-processo, processo e pós-processo. Para pré-processo foi utilizado o *software* livre Gmsh (GEUZAINÉ; REMACLE, 2009), em que foi gerada a geometria inicial do problema e condições de contorno dos problemas de interesse, e possíveis sucessões de eventos, gerando arquivo no formato *.msh* com todas as entradas definidas e malha discretizada. 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. Para os casos do uso da técnica de descontinuidades incorporadas a malha discretizada deverá ser submetida à outras rotinas no MATLAB, para a incorporação geométrica da descontinuidade em linha reta nos elementos selecionados, maiores detalhes no trabalho de Araújo (2019).

Com os arquivos de entrada devidamente configurados com os parâmetros dos materiais baseados na literatura são configurados de acordo com o tipo de rocha que se deseja simular com o modelo constitutivo elastoplástico de Drucker-Prager. Os arquivos dão entrada no código em elementos finitos e após processamento, resulta nos arquivos de saída. Estes são tratados diretamente com o auxílio do *software* GID<sup>®</sup> em conjunto com outras ferramentas de análise de dados, por exemplo Microsoft Office Excel. A Figura 19 apresenta o esquema básico do processo de modelagem e das etapas que compõem cada uma.

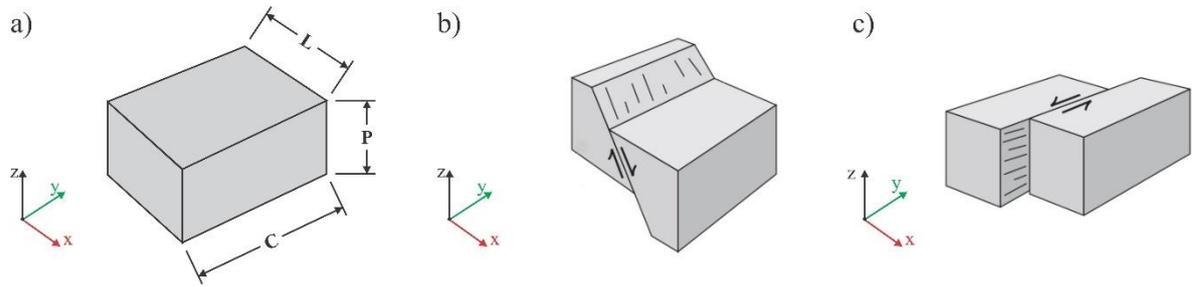
Figura 19 – Fluxograma básico das etapas de execução das simulações.



Fonte: O Autor (2020).

A geometria dos problemas bidimensionais consistiu da simplificação do problema tridimensional, em que é possível trabalhar com cada plano separadamente. Ou seja, para um maciço antes do falhamento apresenta dimensões como comprimento de falha ( $C$ ), largura do maciço ( $L$ ) e profundidade ( $P$ ), como apresentado na Figura 20 a). Para as análises realizando a formação de falhas normais utilizou-se o plano  $zx$  e foi respeitado a relação  $L \geq 4P$ , e nas análises da formação de falhas transcorrentes e oblíquas as análises foram realizadas em planta no plano  $yx$  respeitando a relação  $L \geq 4C$ . Estas relações entre as dimensões para cada caso foram propostas por Anastasopoulos *et al.* (2007) com o intuito de evitar quaisquer problema relacionados a malha e geometria do problema. Assim, nas Figuras 20 b) e c) temos o maciço após o falhamento formando uma falha normal e transcorrente, respectivamente, em que é identificar os eixos das dimensões

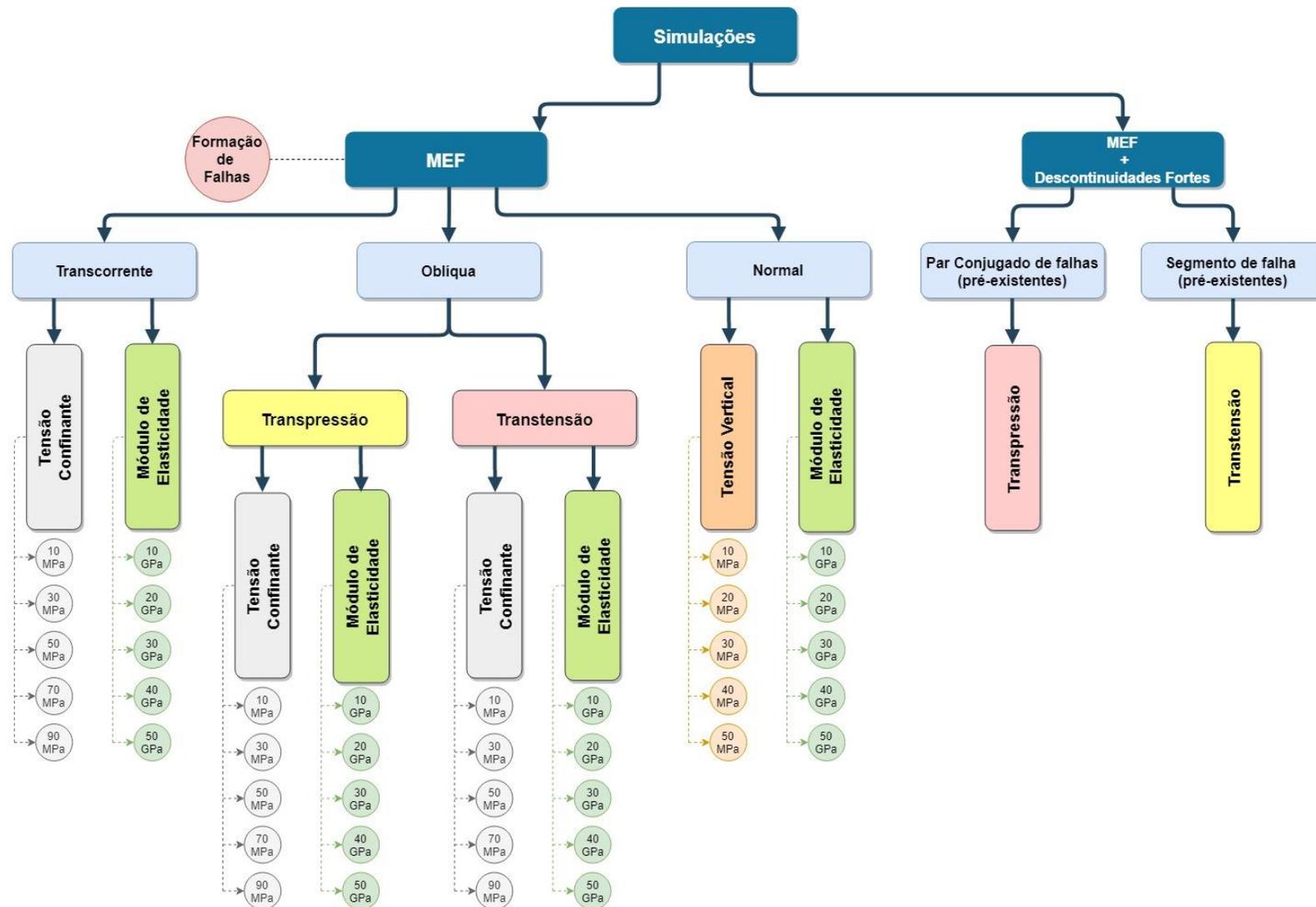
Figura 20 – Esquema das direções das dimensões do maciço e da análise: a) maciço antes do falhamento; b) falha normal formada; c) falha transcorrente formada.



Fonte: Adaptado de Pluijm e Marshack (2004).

A Figura 21 apresenta o organograma das simulações realizadas, em que a deformação plástica cisalhante ( $\varepsilon_{xy}^p$ ) foi o parâmetro utilizado como característico à formação da zona de dano, variando-se o regime formador, as tensões confinantes aplicadas, influência do rigidez dos materiais por meio do módulo de elasticidade e a influência da tensão vertical, na formação de falha normal. Vale ressaltar que o tempo para análises elastoplásticas é fictício e utilizado para ordenar as ações. A critério de simplificação, em todos os casos optou-se por utilizar plasticidade associada e perfeita, sem ocorrência do fenômeno de amolecimento ou endurecimento. Outra consideração numérica fundamental ao entendimento dos valores das tensões é que o sinal negativo se refere às tensões de compressão e os valores positivos às tensões tracionando o maciço.

Figura 21 – Organograma das simulações realizadas.



Fonte: O Autor (2020).

## 5.1 FORMAÇÃO DE ZONA DE FALHA EM REGIME TRANSCORRENTE

O primeiro caso analisado consiste na análise da formação de uma falha em regime transcorrente. Inicialmente o maciço é submetido ao regime listostático de tensões e posterior imposição de deslocamento em metade do problema no sentido de  $y$  positivo. As condições de contorno foram determinadas baseadas nos ensaios e simulações numéricas de cisalhamento direto (e.g. POTTS; DOUNIAS; VAUGHAN, 1987; CIVIDINI; GIODA, 1992; MOAYED; TAMASSOKI; IZADI, 2012; ALONSO; ZANDARÍN; OLIVELLA, 2013). A Figura 22 apresenta um exemplo de falha transcorrente em escala regional, nesse caso na China, a falha de Piqiangt, em que através da vista aérea é possível identificar a existência da falha por meio dos marcadores cinemáticos existentes, rochas sedimentares nas cores vermelho, verde e creme.

Figura 22 – Vista aérea da falha transcorrente de Piqiangt na China, em que as regiões com colorações vermelhas, verdes e creme indicam a existência de rochas sedimentares e, neste caso são indicadores cinemático da transcorrência.

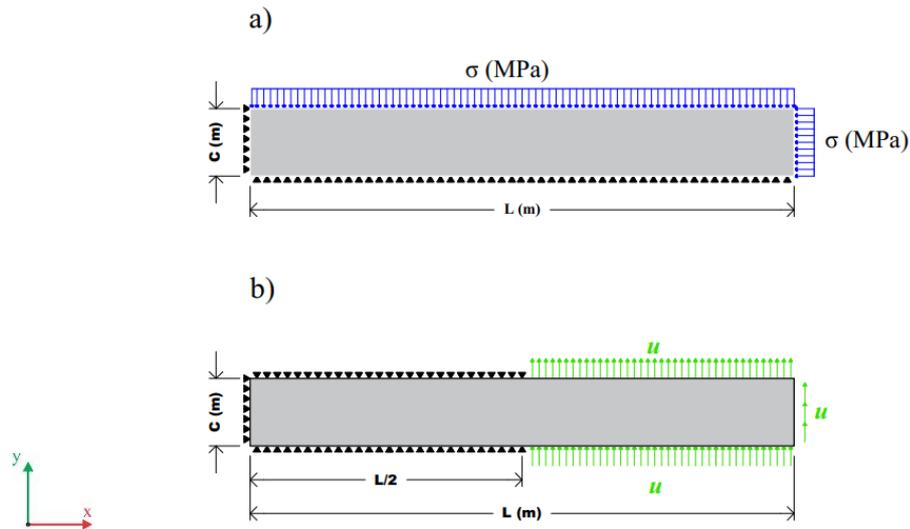


Fonte: NASA (2013)<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> NASA. Disponível em < <https://earthobservatory.nasa.gov/images/82853/faults-in-xinjiang> > Acesso em: nov. 2019.

Portanto, utilizando de um modelo sintético em escala métrica baseado em casos reais, a Figura 23 apresenta as condições de contorno do problema dividido em duas etapas. A primeira etapa apresenta a condição litostática, seguindo notação andersoniana neste caso  $\sigma_h = \sigma_H = \sigma$ , em que  $\sigma$  representará a tensão confinante. No segundo momento, foi mantido o estado de tensões e o maciço cisalhado com a imposição de um deslocamento na direção de  $y^+$ .

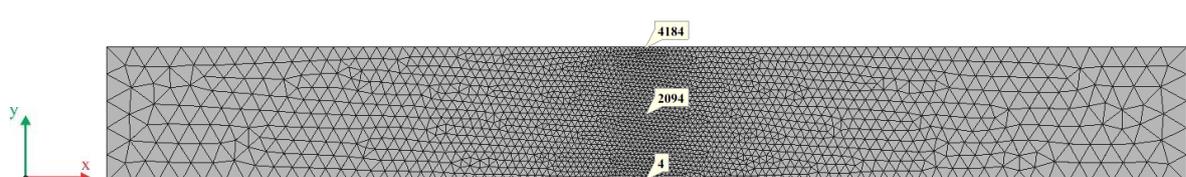
Figura 23 – Condições de contorno da simulação da falha transcorrente: a) litostático; b) cisalhamento.



Fonte: O Autor (2020).

A geometria do maciço foi definida com as seguintes dimensões:  $L=80$  m e  $C=10$  m, respeitando a condição geométrica  $L \geq 4C$ . A condição de deslocamento imposto tem total máximo de 1 m, à uma taxa de deformação máxima de 1 mm/min. Estes parâmetros foram retirados do estudo experimental em escala métrica de Xu *et al.* (2018). A malha do modelo foi discretizada com 2201 nós e 4189 elementos triangulares, com tamanho mínimo dos elementos de 25 cm a região central. A Figura 24 apresenta a malha em elementos triangulares e o posicionamento dos nós 4, 4184 e 2094, nas extremidades e centro respectivamente, fundamentais na avaliação das deformações e tensões.

Figura 24 – Malha em elementos finitos para falhas transcorrentes e indicação dos elementos utilizados na análise de resultados.



Fonte: O Autor (2020).

Os parâmetros físicos e elásticos da rocha correspondem à arenitos. Estes dados foram retirados da literatura com ênfase nos trabalhos relacionados a mecânica das rochas (DEB; VERMA, 2016; GUDMUNDSSON, 2011), e de simulações numéricas (ANTUNES, 2003). A Tabela 1 apresenta resumidamente todos os parâmetros utilizados neste modelo.

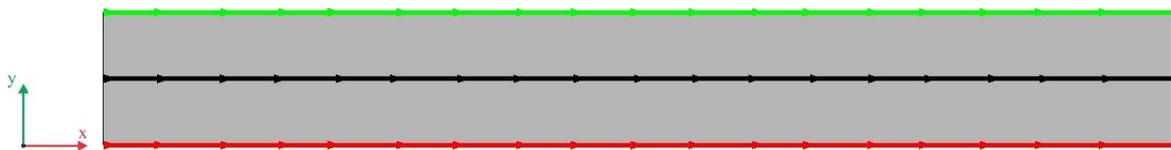
Tabela 1 – Parâmetros da rocha utilizado nas simulações numéricas, em que  $E$  é o módulo de elasticidade,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $c$  a coesão,  $\phi$  é o ângulo de atrito e  $\psi$  é o ângulo de dilatância.

Rocha	$E$ (GPa)	$\nu$	$c$ (MPa)	$\phi = \psi$ (°)	Porosidade
Arenito	10	0,25	10	30°	0,2

Fonte: O Autor (2020).

As análises serão realizadas utilizando os resultados de cada simulação em relação a deformações plásticas, porosidade, tensões, deslocamentos nas direções  $x$  e  $y$ , e invariante de tensões. Estes resultados quando relacionados a largura do maciço serão retirados ao longo da linha central (metade do comprimento), linha inferior e linha superior. A Figura 25 apresenta três linhas indicativas, na cor preta para a linha central, na cor vermelha indicando a linha da extremidade inferior e verde para a linha na extremidade superior, todas em função da largura do maciço, de 0 à 80 metros.

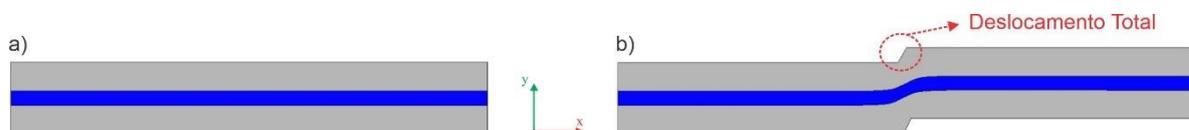
Figura 25 – Linhas indicativas dos resultados para os gráficos em função da largura do maciço para os casos analisados, eixo  $x$ .



Fonte: O Autor (2020).

Para o primeiro caso foi imposto uma tensão litostática no maciço de 10 MPa e posterior cisalhamento com imposição do deslocamento. A Figura 26 apresenta o maciço antes da imposição do cisalhamento e pós cisalhamento, deformado e com marcador cinemático, com fator dez vezes maior para facilitar visualização. Além disso, está a indicação do deslocamento máximo do maciço.

Figura 26 – Indicação do local em que será determinado o deslocamento total e indicativo de movimento com marcador cinemático, para um fator de aumento de 10 vezes: a) maciço indeformado; b) maciço deformado.



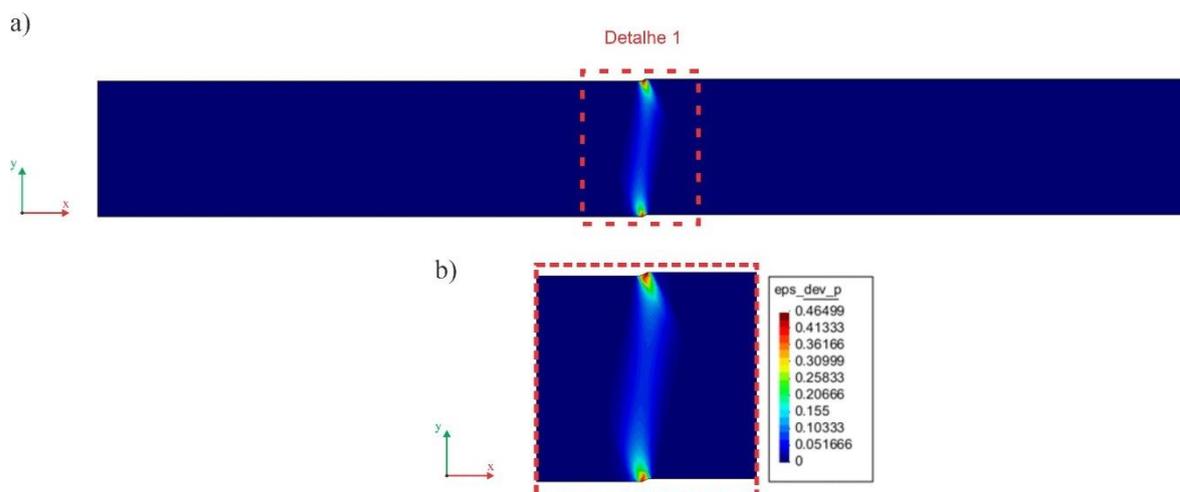
Fonte: O Autor (2020).

O processo cisalhante resultou na formação de uma região central plastificada, ou seja, presença de deformações plásticas com valores acentuados nos elementos das extremidades em que há a mudança da condição de contorno, ocorrendo a propagação de um lado a outro do comprimento do maciço. A Figura 27 apresenta a distribuição das deformações na região central chegando à um máximo de 0,465 na extremidade superior.

O Gráfico 1, que relaciona deformação plástica cisalhante versus largura do maciço na linha central de análise, é notório a concentração destas deformações na região central. Ao traçar linhas de tendência lineares em cada trecho com mudança de inflexão é possível verificar a intersecção entre as retas com a horizontal, referente a região sem deformações plásticas, e delimitar a região com deformação plástica cisalhante com largura de 4,11 m, caracterizando a largura máxima da zona de dano. A utilização desse artifício decorre da necessidade de relacionar estatisticamente a progressão da largura em função do máximo nessa região, não só apenas aos elementos que têm deformações diferentes de zero.

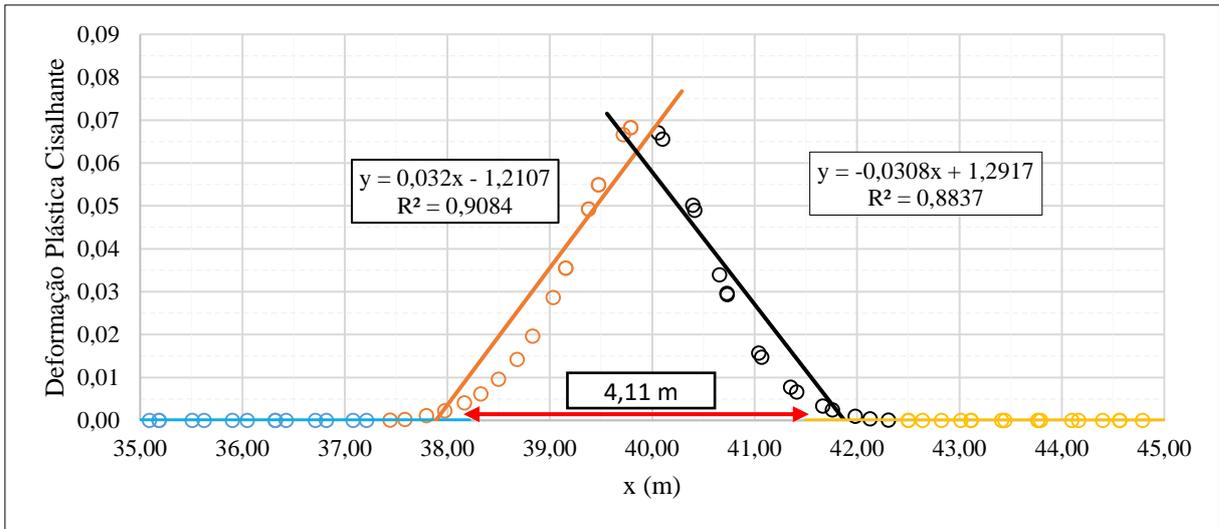
No Gráfico 2 é apresentado a distribuição da deformação plástica cisalhante nas extremidades superior e inferior, com máximo 0,465 e 0,427 respectivamente, e largura bem definida em aproximadamente 1 m. É importante ressaltar a não coincidência dos picos na extremidade superior e inferior justamente por conta do comportamento dos deslocamento em x, sentido positivo na região inferior e sentido negativo na parte superior.

Figura 27 – Distribuição das deformações plásticas no maciço para a transcorrência e tensão confinante de 10 MPa: a) maciço completo; b) detalhe 1.



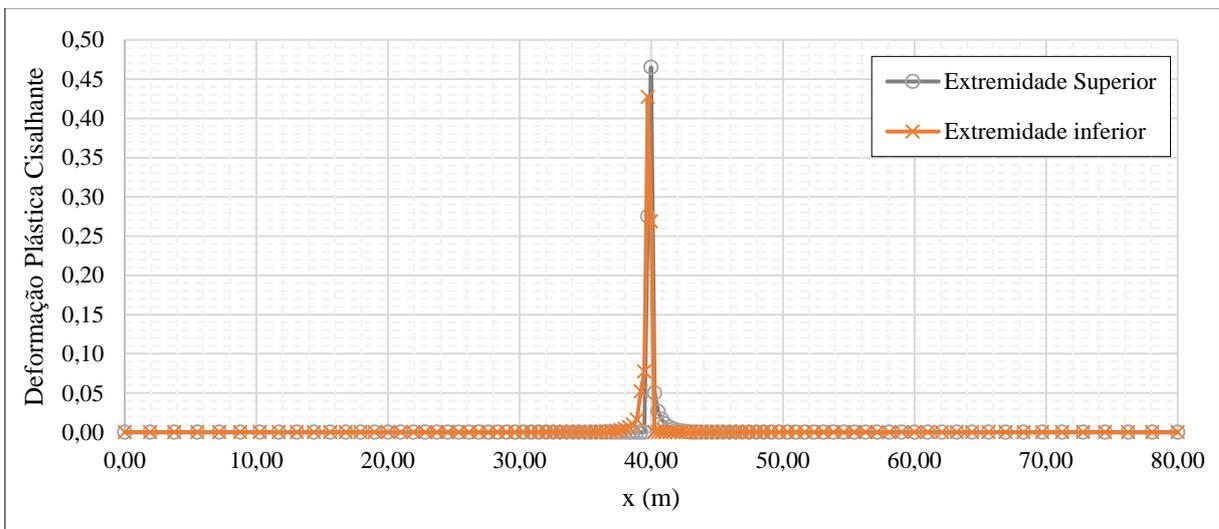
Fonte: O Autor (2020).

Gráfico 1 – Distribuição da deformação plástica cisalhante versus largura do maciço no meio do maciço no regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa.



Fonte: O Autor (2020).

Gráfico 2 – Distribuição da deformação plástica cisalhante versus largura do maciço nas extremidades no regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa.



Fonte: O Autor (2020).

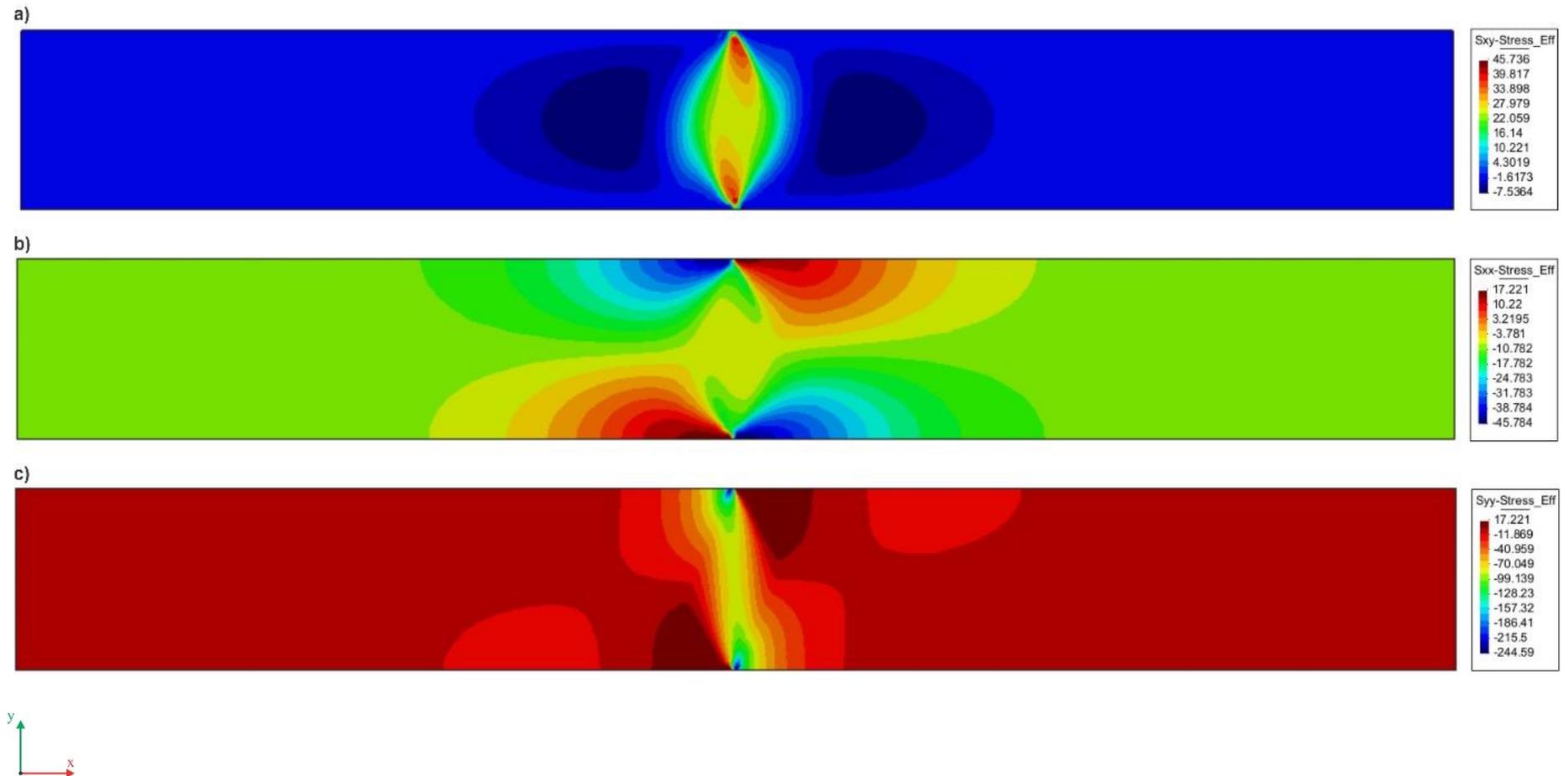
A distribuição das tensões no maciço variou de acordo com a imposição do movimento. A região central cuja deformações plásticas foram proeminentes, concentrou os maiores valores das tensões cisalhantes, chegando ao valor máximo para esse caso de  $\sigma_{xy} = 45,74$  MPa. Nesse caso, fica evidente o processo de concentração das tensões nas extremidades do comprimento da formação da falha e propagação ao centro do maciço até uma determinada largura. As tensões nas direções dos eixos y e x obtiveram valores máximos de  $\sigma_{yy} = 244,59$  MPa e  $\sigma_{xx} = 45,78$  MPa, respectivamente, ambos em compressão e evidenciando a distribuição em

equilíbrio de tensões no maciço. A Figura 28 apresenta a distribuição das tensões através de representações do tipo preenchimento de contorno.

Os deslocamentos ao longo da largura do maciço são característicos de uma região que sofre ruptura, com região de transição bem definida. Outro ponto importante é o comportamento cisalhante, em que há extensão e compressão em relação a direção  $x$  (largura do maciço), nas regiões superior e inferior respectivamente. Em relação a deslocamento direcional, ou rejeito, em  $x$  e  $y$  foram acentuados nas extremidades chegando a valores máximos para esse caso de aproximadamente 0,103 m e 0,155 m respectivamente, e valor total de 0,184 m. A Figura 29 apresenta a distribuição dos deslocamentos, com variação expressiva na área central.

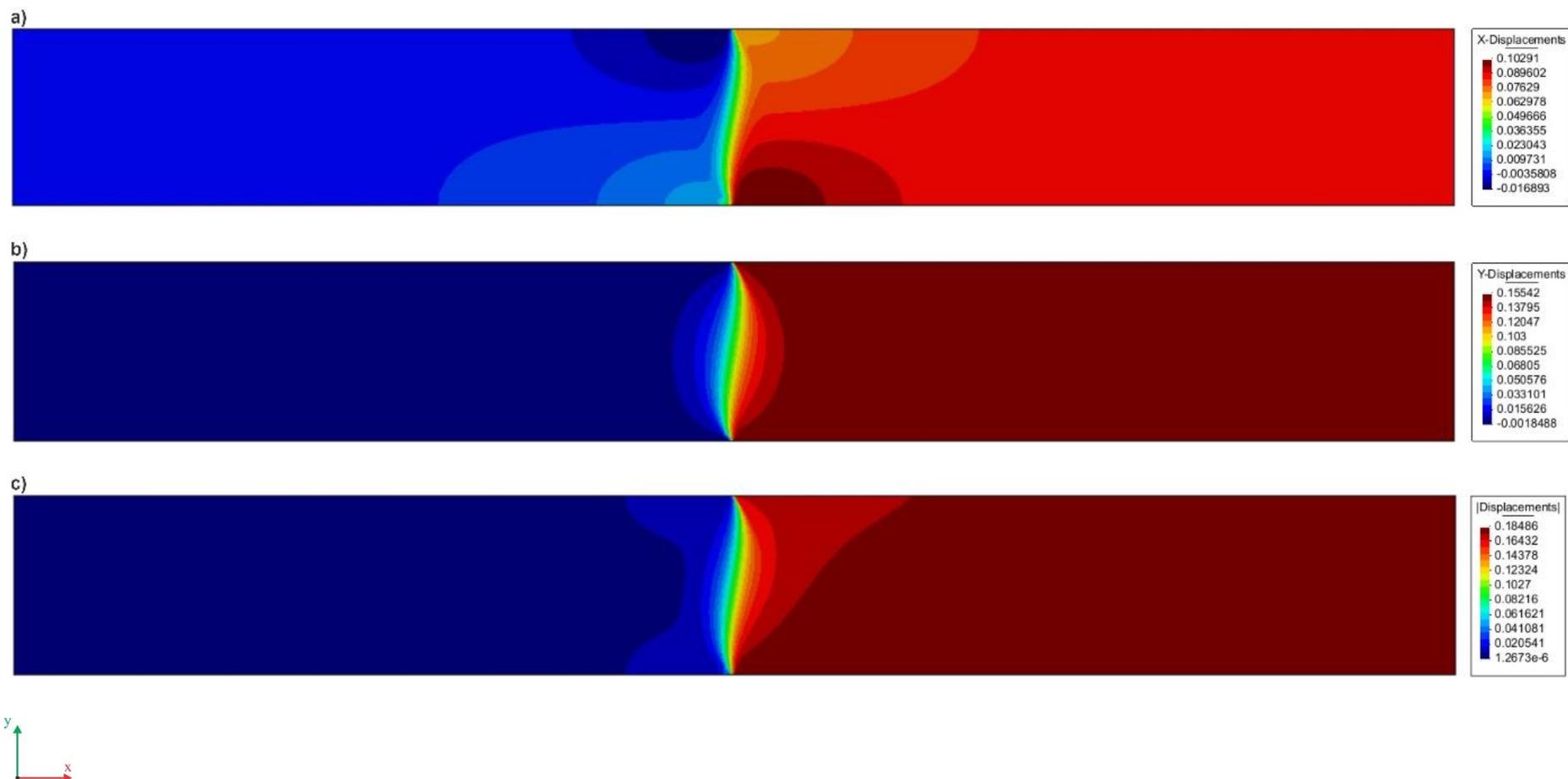
O comportamento à tração, cujo sinal das tensões é positivo, resultante do processo cisalhante pode ser verificado pelas tensões principais máximas e mínimas na Figura 30. Seguindo as análises de tensões internas principais a Figura 31 apresenta o conjunto destas representadas por vetores de compressão e tração, em azul e vermelho respectivamente. No detalhe destacado pela Figura 31 b) é possível verificar o aspecto romboidal das tensões que é característico da formação de falhas transcorrentes, um dos estágios do processo formador, amplamente discutido na literatura (*e.g.* ZALÁN, 1986; SYLVESTER, 1988). Nos detalhes das Figuras 31 c) e d), próximo a região central do maciço superior e inferior respectivamente, é possível identificar os vetores das tensões de acordo com a intensidades das mesmas e com fator de redução de 0,02 com o intuito de facilitar a observação de ocorrência e direção.

Figura 28 – Distribuição das tensões em MPa em regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa: a) tensões cisalhantes; b) tensões na direção do eixo x; c) tensões na direção do eixo y.



Fonte: O Autor (2020).

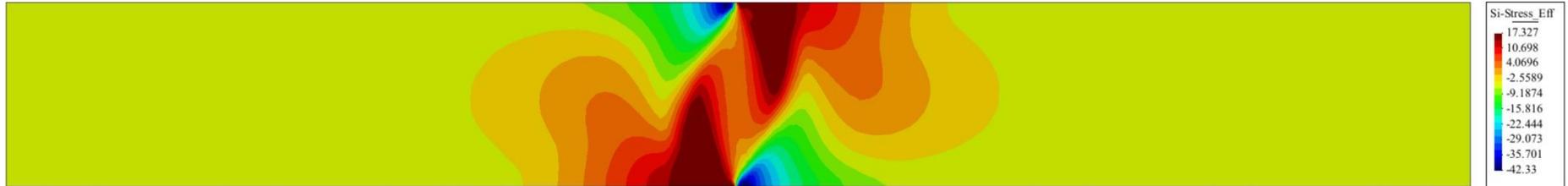
Figura 29 – Deslocamentos em metros no regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa: a) deslocamento na direção do eixo x; b) deslocamentos na direção do eixo y; c) deslocamentos totais.



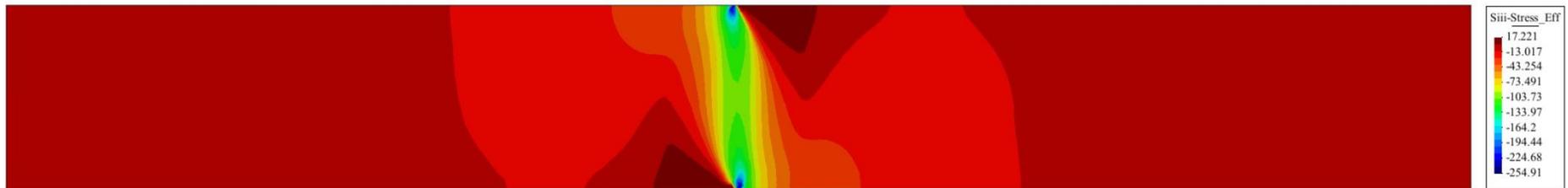
Fonte: O Autor (2020).

Figura 30 – Componentes das tensões principais máximas e mínimas, considerando a conversão de positivo para tensões à tração e negativo à compressão: a) tensão principal mínima; b) tensão principal máxima.

a)

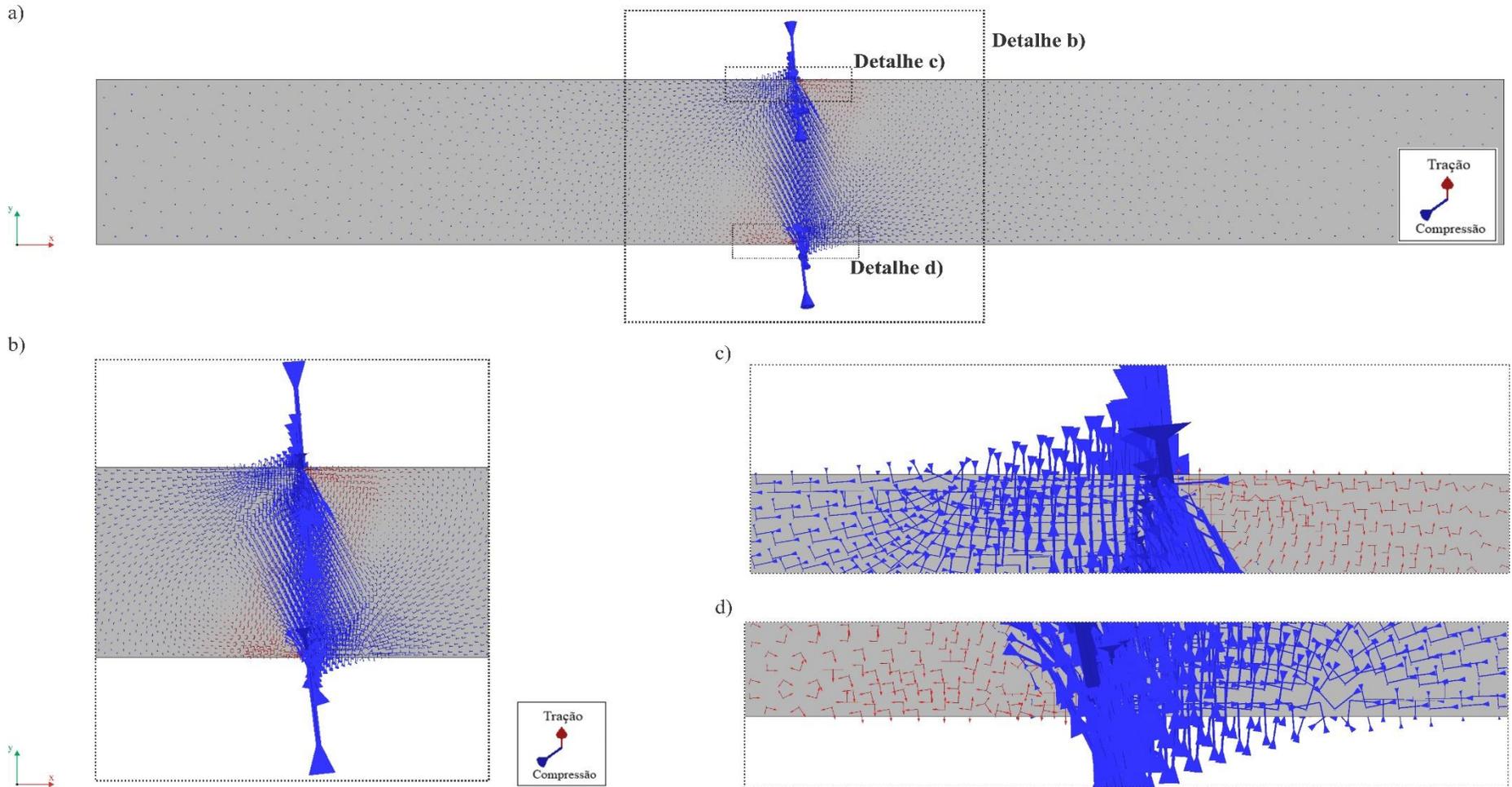


b)



Fonte: O Autor (2020).

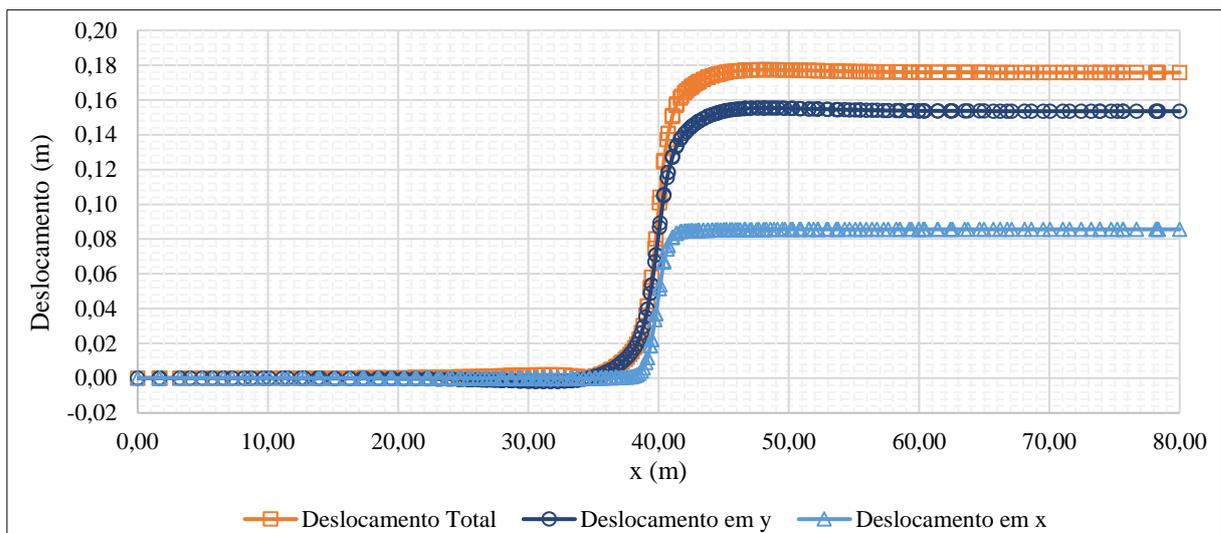
Figura 31 – Representação vetorial das tensões principais no maciço no regime transcorrente, em que as setas em azul indicam compressão e as setas em vermelho tração, o tamanho das setas proporcional a intensidade e com fator de visualização de 0,02: a) maciço por completo para; b) detalhe da região central do maciço enfatizando o aspecto romboidal das tensões; c) e d) detalhes nas regiões superior e inferior respectivamente para identificação dos vetores de tração e compressão, direção e intensidade.



Fonte: O Autor (2020).

O Gráfico 3 apresenta a distribuição dos deslocamentos em função largura do maciço. Fica definido uma região de transição e duas porções distintas, uma com grandes deslocamentos e outra fixa, essa distinção é análogo a movimentação de estruturas rúpteis, corroborando com o entendimento de uma zona plástica intermediária, com variação de deslocamentos, entre duas porções com características cinemáticas distintas.

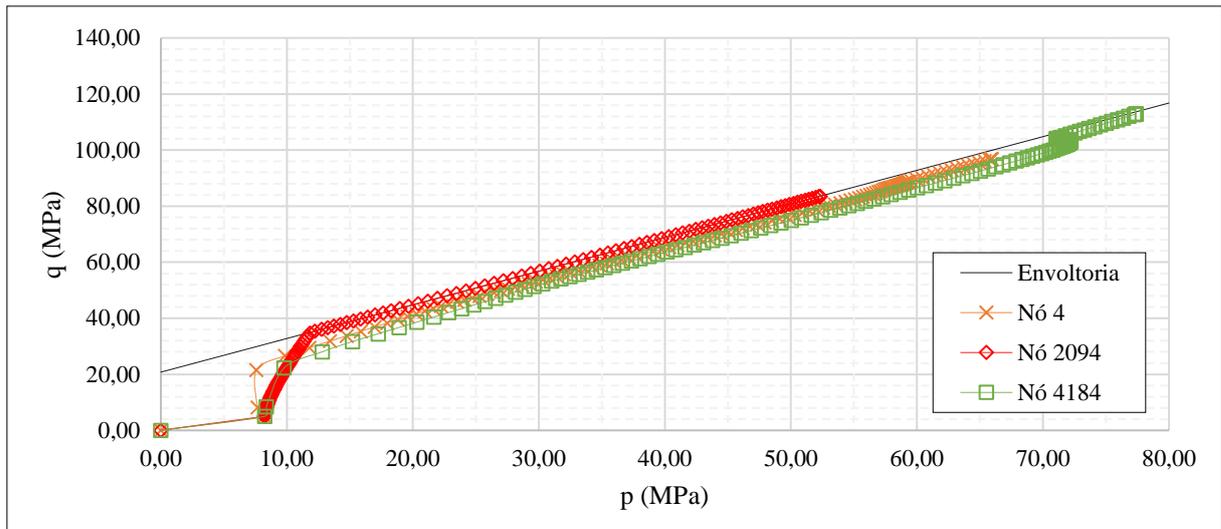
Gráfico 3 – Relação do deslocamento com relação a largura do maciço na transcorrência para tensão confinante de 10 MPa.



Fonte: O Autor (2020).

Para a análise do processo de plastificação foram analisados três nós com posição relacionada a transição da condição de contorno, os nós 4, 2041 e 4184 em que através do gráfico  $p \ x \ q$  é possível verificar que em nenhum momento a superfície de fluência foi ultrapassada, estando no campo das tensões admissíveis de Drucker-Prager, e a região submetida a tração na região de extremidade superior, elemento 4184, alcançando níveis tensionais para as invariantes de tensões superiores que os demais.

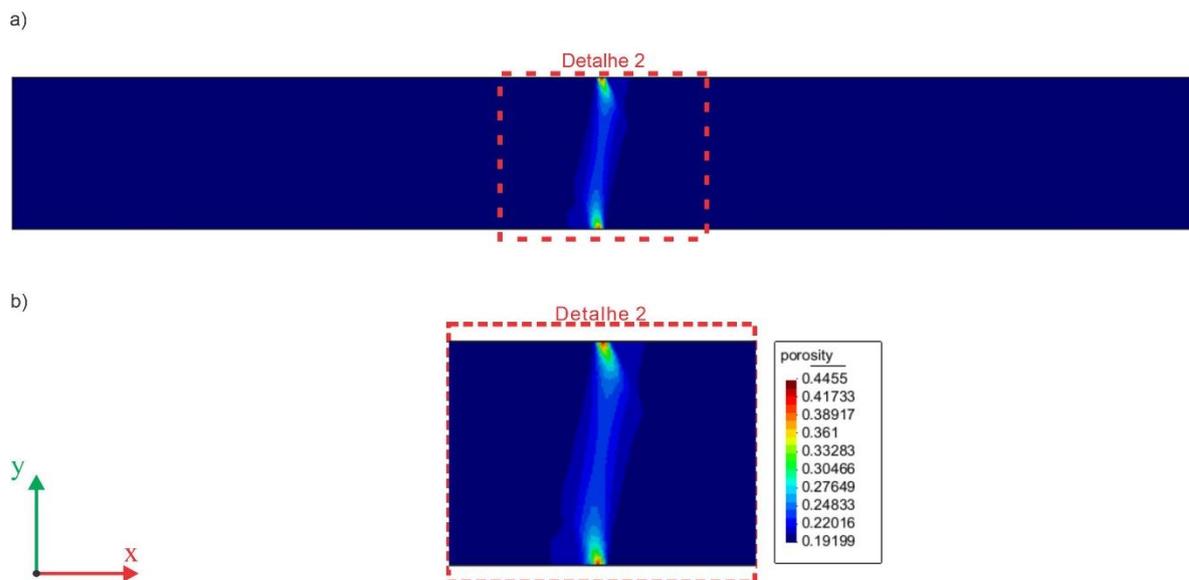
Gráfico 4 – Envoltória de Drucker-Prager e elementos na região central e extremidades.



Fonte: O Autor (2020).

A porosidade da rocha é um importante parâmetro que apresenta alteração durante o processo cisalhante e de formação da falha. Neste caso, houve um incremento da porosidade, sobretudo nas extremidades do comprimento da falha na região central com a mudança das condições de contorno. Na Figura 32 o comportamento da porosidade é análogo ao da plasticidade, com valores máximos nas extremidades e propagando o aumento para o meio do maciço.

Figura 32 – Distribuição da porosidade: a) maciço inteiro; b) detalhe 2.



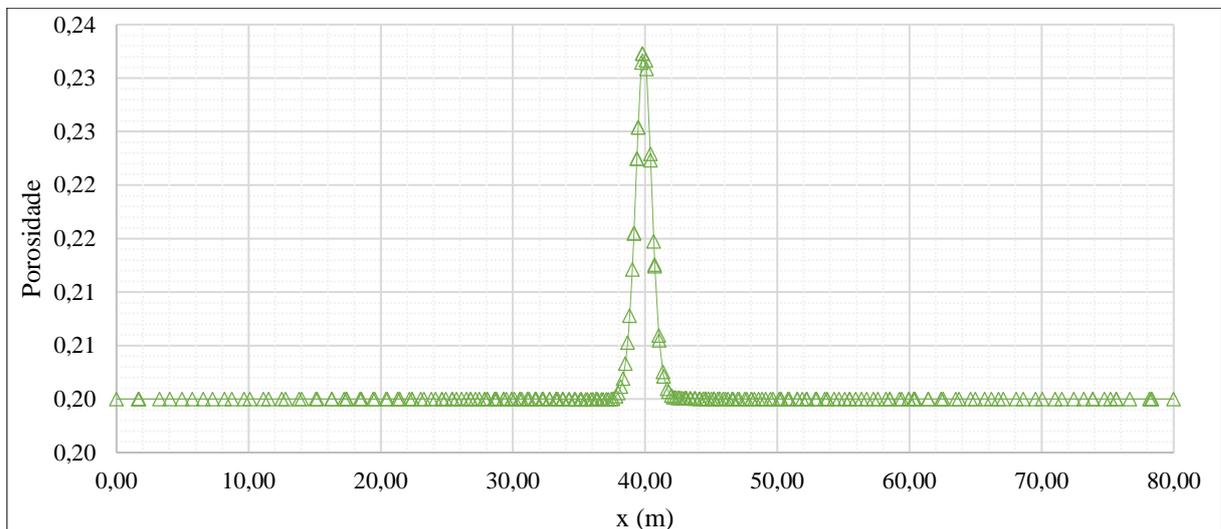
Fonte: O Autor (2020).

Esse comportamento corrobora com a degradação do material no processo de cisalhamento, provocando ganho de permeabilidade e influenciando no comportamento

hidráulico do maciço. A análise da porosidade em rochas sedimentares no estudo das estruturas internas das zonas de falha, corrobora diretamente na análise na reologia da rocha do maciço e na formação e estas formações com aumento da porosidade, relatando nesse caso zonas a ocorrência de fraturas do modo I e micro falhas (WIBBERLEY; YIELDING; DI TORO, 2008).

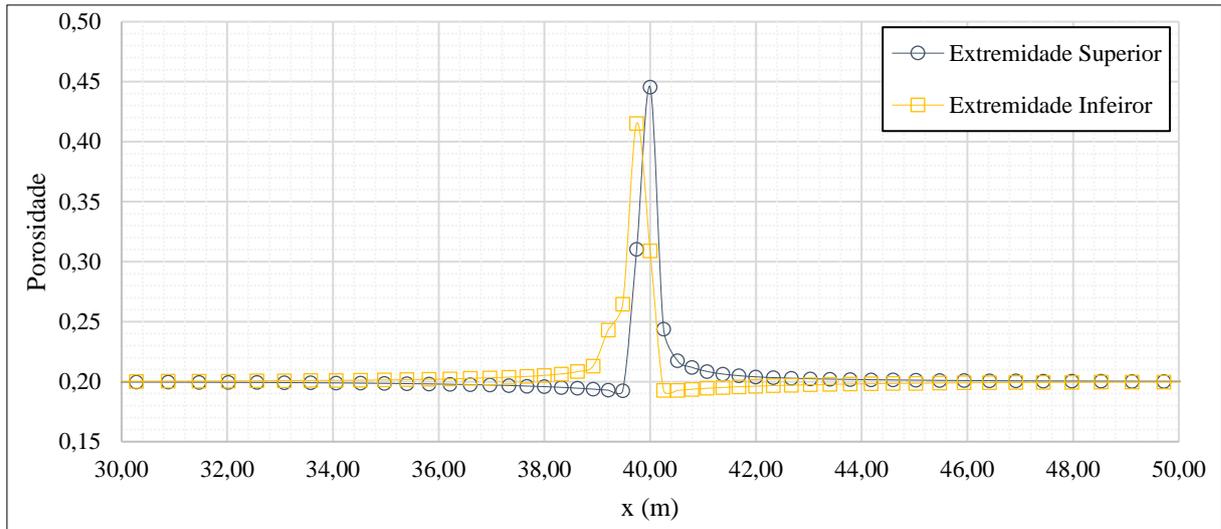
Nos Gráficos 5 e 6 fica nítido o salto da porosidade na região central, principalmente nas extremidades, esse comportamento é resultante o uso da plasticidade associada, logo ângulo de dilatância foi superestimando igual ao ângulo de atrito, proporcionado grande variação volumétrica. No Gráfico 6 limitou-se a projeção do gráfico entre 30 e 50 m visto que é a região que há mudança na porosidade.

Gráfico 5 – Porosidade na linha central de análise no meio do maciço no regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa.



Fonte: O Autor (2020).

Gráfico 6 – Distribuição da porosidade nas extremidades do comprimento no regime transcorrente para tensão confinante de 10 MPa.



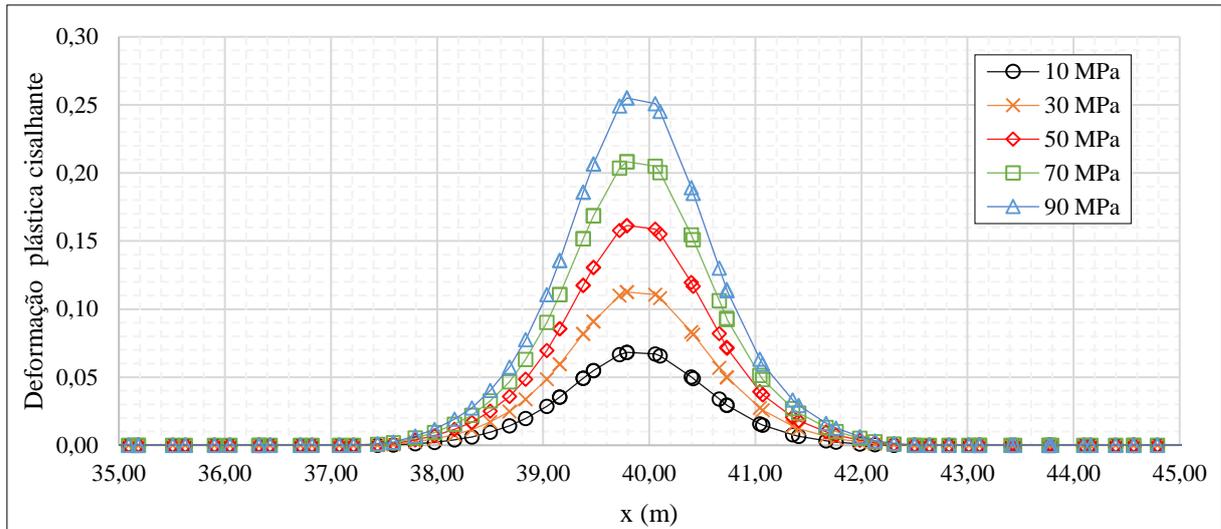
Fonte: O Autor (2020).

### 5.1.1 Influência da Tensão Confinante

Nesta seção será apresentado o comparativo quanto a variação de tensão confinante utilizando os mesmos parâmetros e geometria da seção anterior 5.1. A mudança da tensão confinante ocorreu na etapa inicial em que o modelo foi submetido a uma condição litostática, vide a Figura 23, variando nos valores de 10 MPa, 30 MPa, 50 MPa, 70 MPa e 90 MPa, em consonância à profundidades cuja característica do comportamento plástico é válida conforme apresentado na revisão bibliográfica. Com o intuito de facilitar a visualização dos gráficos e direcionar os resultados apenas onde há mudanças relevantes, alguns gráficos em relação à largura do maciço apresentaram faixa limitada de 35 m até 45 m, em que há variações nos resultados, como visto na seção anterior.

A deformação plástica cisalhante na região central do maciço variou de acordo com a mudança da tensão confinante. O Gráfico 7 apresenta a deformação plástica cisalhante ao longo do meio do maciço, com ênfase na região entre 35 e 45 m, possibilitando observar a variação da espessura da zona de dano formada em decorrência da plastificação, que aumentou com a tensão confinante. Portanto, a variação da deformação vai de 0,068 para tensão confinante de 10 MPa até um valor de 0,255 para tensão de 90 MPa. A ocorrência dessa maior plastificação decorre da ocorrência de deslocamentos maiores nos casos em que tensões confinantes são maiores e, justamente nesses casos, a tração imposta pela condição de contorno superior e do processo cisalhante é melhor resistida, visto que há um processo de descompressão nessas áreas.

Gráfico 7 – Deformações plásticas cisalhante no meio do maciço variando a tensão confinante no regime transcorrente.



Fonte: O Autor (2020).

A Tabela 2 apresenta resumidamente a variação da tensão confinante, as deformações máximas para cada caso e a espessura da zona de dano, variante de 4,110 m à 4,410 m, para valores de tensão confinante de 10 MPa e 90 MPa, respectivamente. Além disso, apresenta a variação da porosidade em decorrência do incremento da tensão confinante e conseqüente maior deslocamento do maciço.

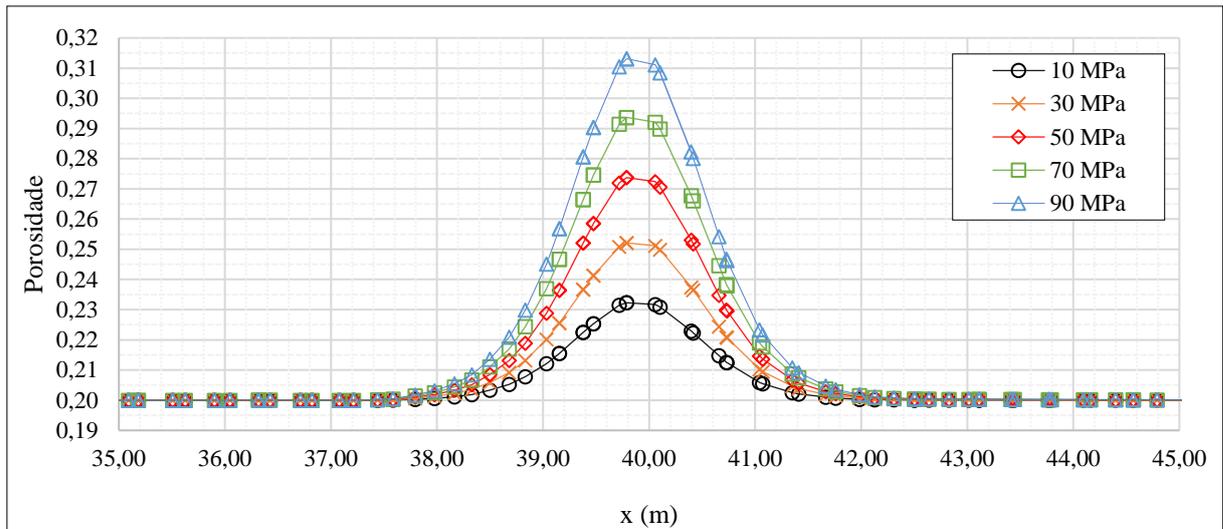
Tabela 2 – Variação da tensão confinante, deformação máxima e largura da zona de plastificação no regime transcorrente.

<b>Tensão Confinante</b>	<b>Deformação Máxima</b>	<b>Porosidade Máxima</b>	<b>Largura da Zona de Plastificação</b>
<b>10 MPa</b>	0,068	0,232	4,110 m
<b>30 MPa</b>	0,113	0,252	4,150 m
<b>50 MPa</b>	0,161	0,274	4,360 m
<b>70 MPa</b>	0,208	0,294	4,400 m
<b>90 MPa</b>	0,255	0,313	4,410 m

Fonte: O Autor (2020).

O Gráfico 8 apresenta a distribuição da porosidade em função da largura, em metros, para a região com comprimento de falha de 5 m (meio), aumentando proporcionalmente com a tensão confinante e ampliando a zona de aumento da porosidade, ou seja, a largura que há variação de porosidade aumenta com a tensão confinante.

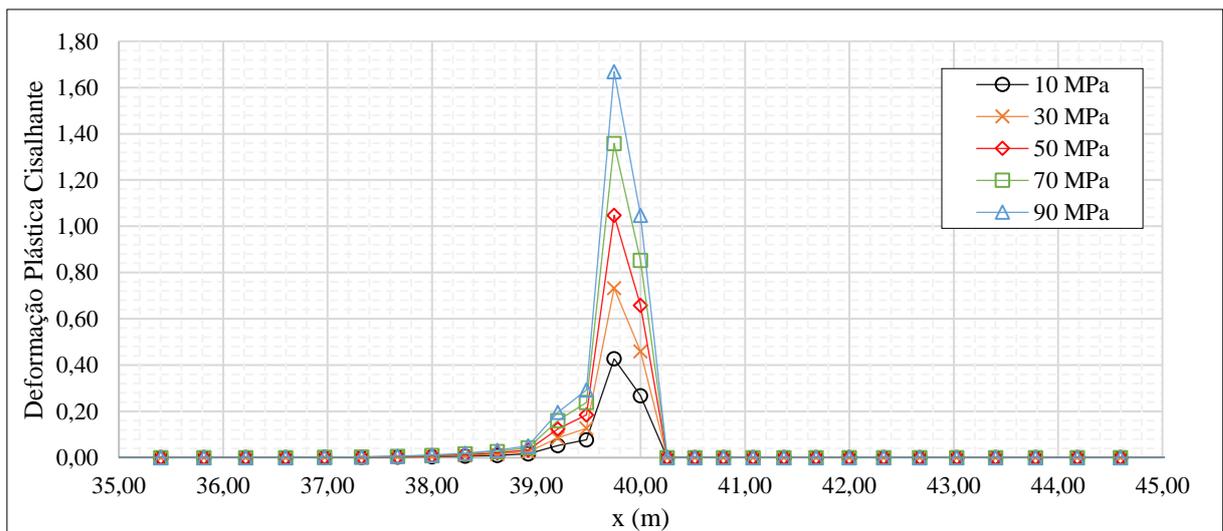
Gráfico 8 – Variação da porosidade no regime transcorrente com incremento da tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

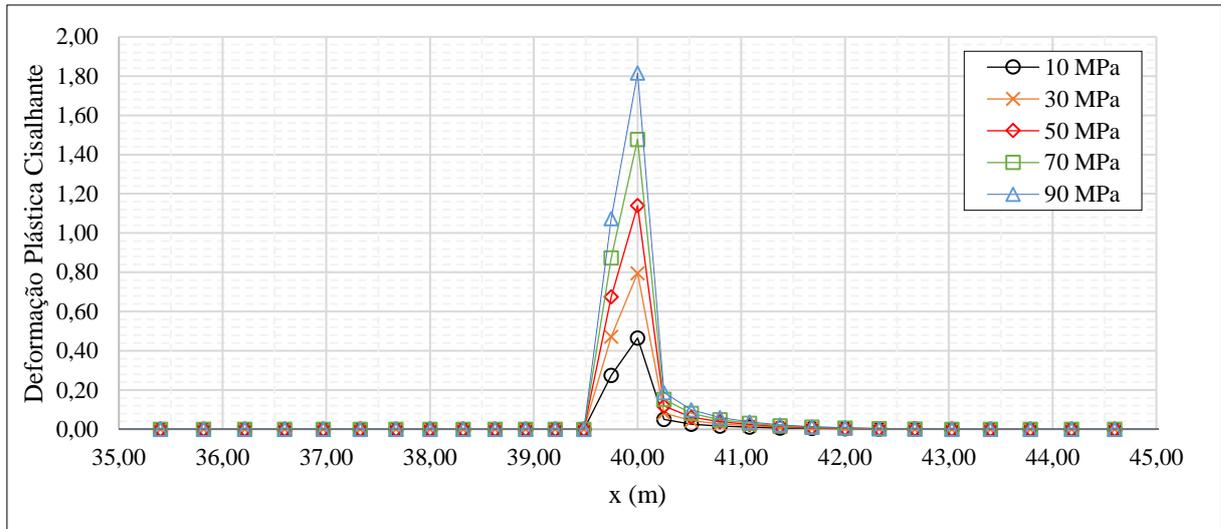
Nas extremidades as deformações plásticas apresentaram um pico na mudança da condição de contorno maior à medida que a tensão confinante aumentou, com largura da zona de plastificação quase três vezes menor que na região central. Os Gráficos 9 e 10 esquematizam a distribuição da deformação na extremidade inferior e superior, respectivamente, com ênfase na região central do maciço onde há variação deste parâmetro.

Gráfico 9 – Deformação plástica cisalhante no regime transcorrente na extremidade inferior variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

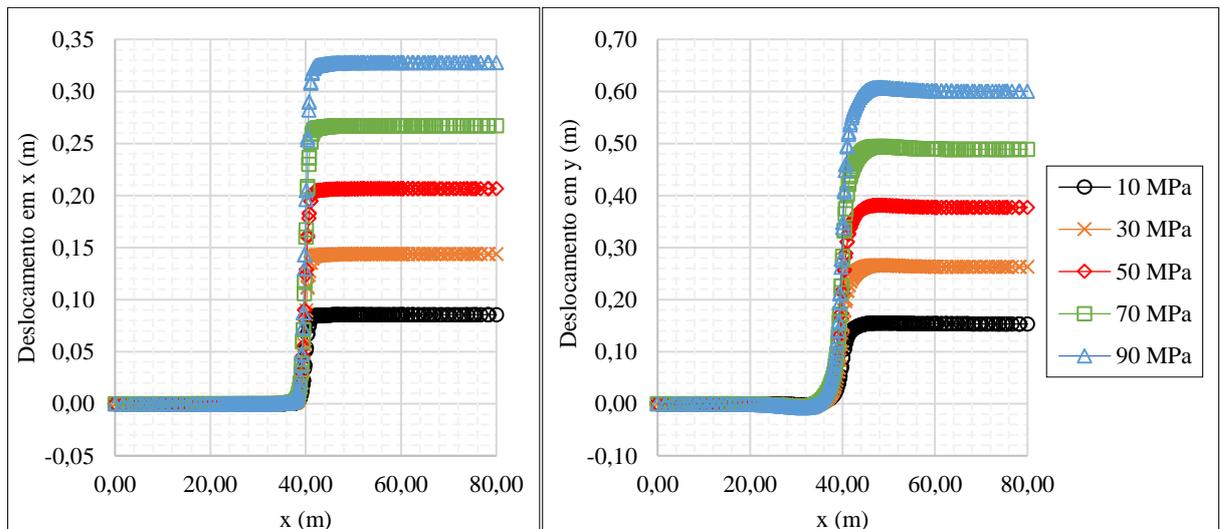
Gráfico 10 – Deformação plástica cisalhante no regime transcorrente na extremidade superior variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

Os deslocamentos no maciço aumentaram com o incremento da tensão confinante, já que com o incremento de tensão confinante o material apresenta maior resistência, logo deformando mais e deslocando mais até a ruptura. O Gráfico 11 apresenta os deslocamentos em  $x$  e  $y$  para cada caso, em que fica nítido o aumento do deslocamento com o aumento de tensão confinante, a permanência da região de transição, contudo para tensões maiores há o indicativo de formação de um pico de deslocamento próximo a região de transição e depois diminui para o restante do maciço à esquerda.

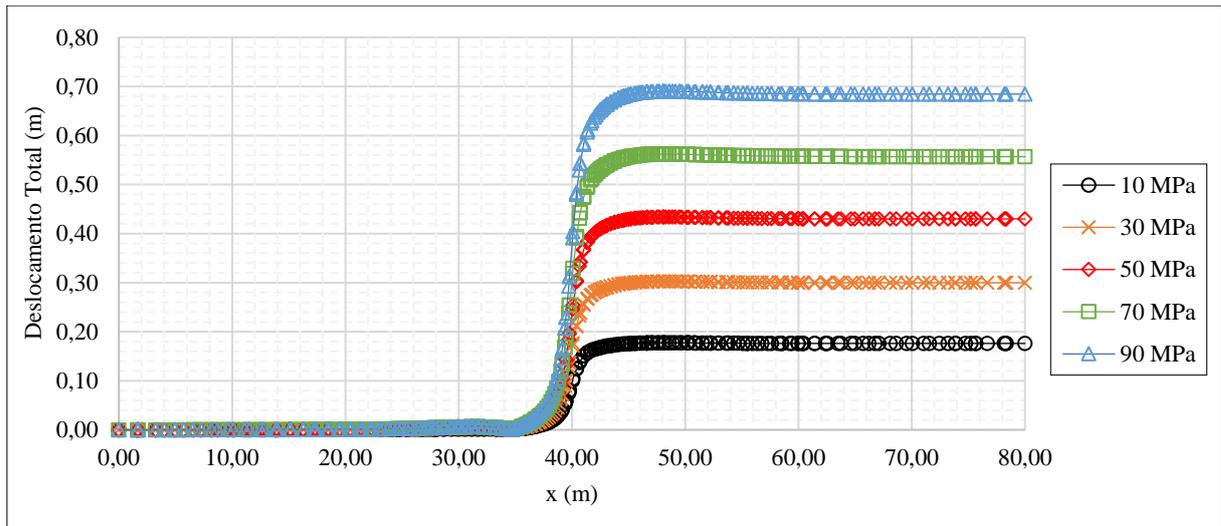
Gráfico 11 – Deslocamentos em  $x$  e  $y$  em relação a largura do maciço no regime transcorrente.



Fonte: O Autor (2020).

O deslocamento total para cada caso aumentou, Gráfico 12, vide justificativa anterior, e apresentou região de transição dos deslocamentos maior à medida que a tensão confinante aumentou, por conta do comportamento cisalhante e variação volumétrica maior para cada caso, visto plasticidade associada e maiores deformações com o aumento da tensão confinante.

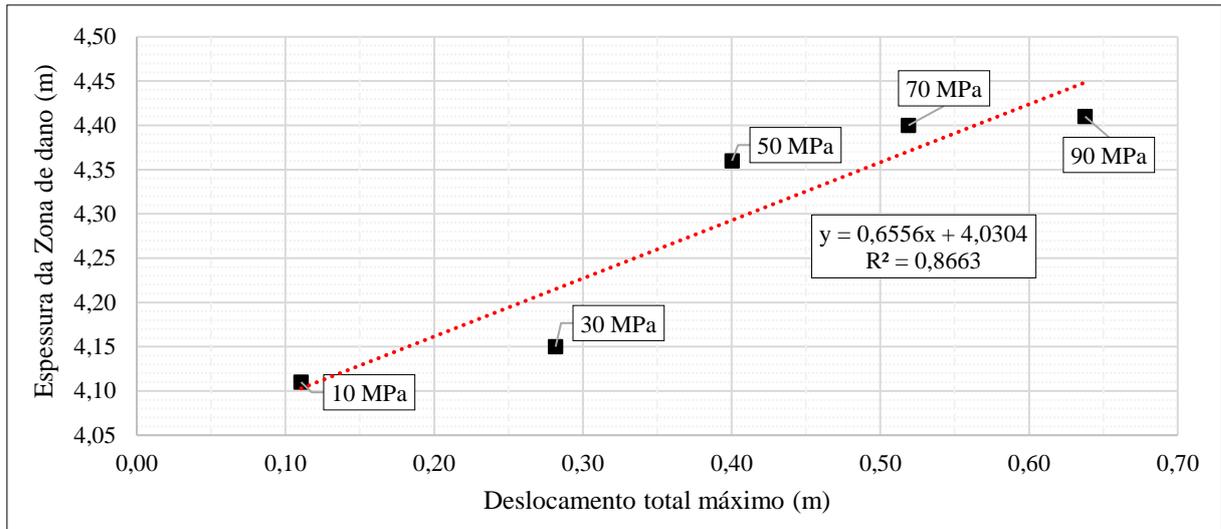
Gráfico 12 – Deslocamentos total em relação a largura do maciço no regime transcorrente variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

Utilizando os dados da Tabela 2 e do Gráfico 12, é possível estabelecer um gráfico do deslocamento total em função da largura da zona de plastificação, para a base de dados de cada tensão confinante aplicada, Gráfico 13. É possível observar a nítida relação de crescimento da zona de dano com o aumento do deslocamento total resultante do incremento da tensão confinante, com coeficiente de correlação,  $R^2 = 0,9386$ . Portanto, é possível relacionar ao aumento ou diminuição da espessura da zona de dano no regime transcorrente à variação da tensão confinante, vide a justificativa anterior das tensões internas de tração e compressão que dominam o regime cisalhante do problema.

Gráfico 13 – Relação da espessura da zona de dano com o deslocamento total máximo no regime transcorrente para diversas tensões confinantes.



Fonte: O Autor (2020).

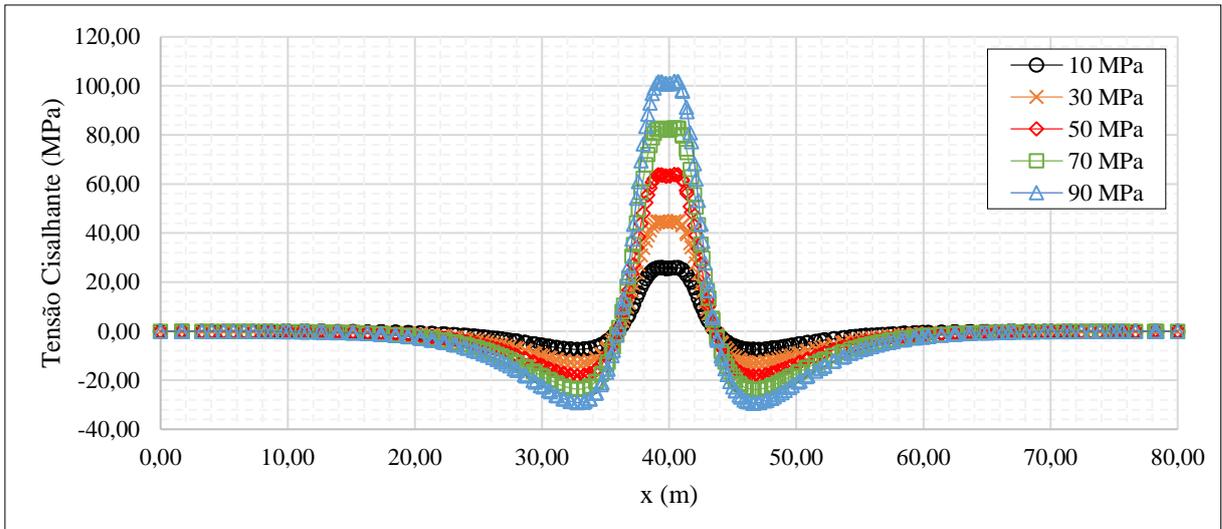
Por fim, o Gráfico 14 apresenta a distribuição das tensões cisalhantes ao longo da largura do maciço, com influência e variação expressiva máxima próxima aos 40 m centrais e com de tensão confinante de 90 MPa, em que a diferença dos valores máximos e mínimos aumentam com o acréscimo da tensão confinante e não há diferença acentuada na largura da região com efeito da tensão cisalhante diferente de zero, evidenciado no Gráfico 15, detalhe do Gráfico 14. Vale ressaltar que a zona de plastificação está contida na região cisalhante positiva do problema e que há uma diferença expressiva nos valores máximos com o incremento da tensão confinante, o que é esperado visto que com esse aumento provoca um ganho de resistência. A Tabela 3 resume as tensões cisalhantes máximas e mínima.

Tabela 3 – Tensões cisalhantes máximas e mínima no regime transcorrente variando a tensão confinante.

Tensão Confinante	Tensão Cisalhante	
	Mín.	Máx.
10 MPa	-7,50 MPa	25,92 MPa
20 MPa	-12,96 MPa	44,87 MPa
30 MPa	-18,43 MPa	63,87 MPa
40 MPa	-23,89 MPa	82,84 MPa
50 MPa	-29,35 MPa	101,81 MPa

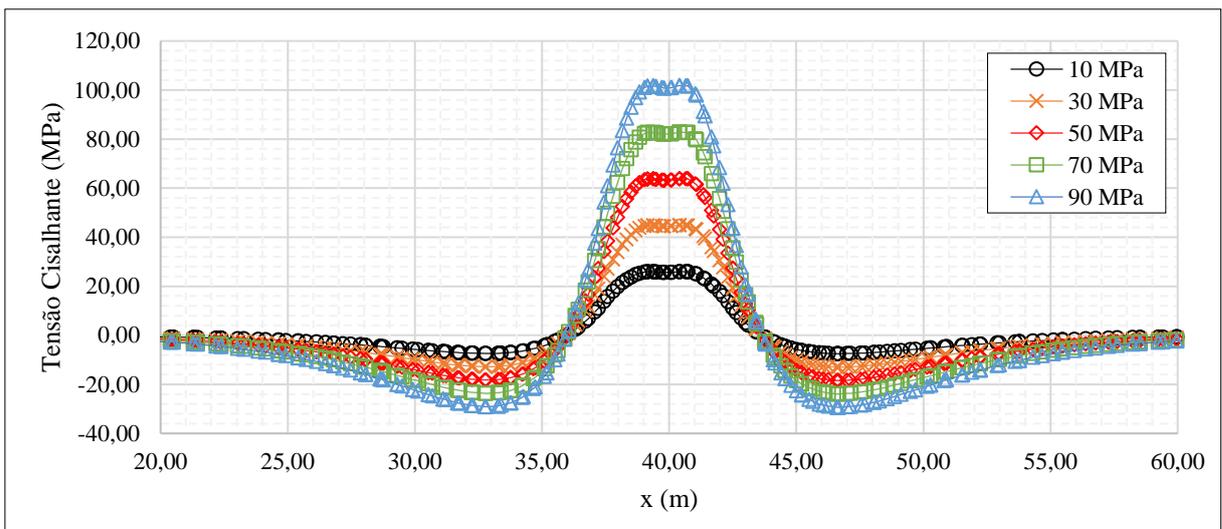
Fonte: O Autor (2020).

Gráfico 14 – Distribuição da tensão cisalhante em função da largura do maciço no regime transcorrente variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

Gráfico 15 – Detalhe do Gráfico 14 limitando o eixo horizontal entre 20 e 60 metros.



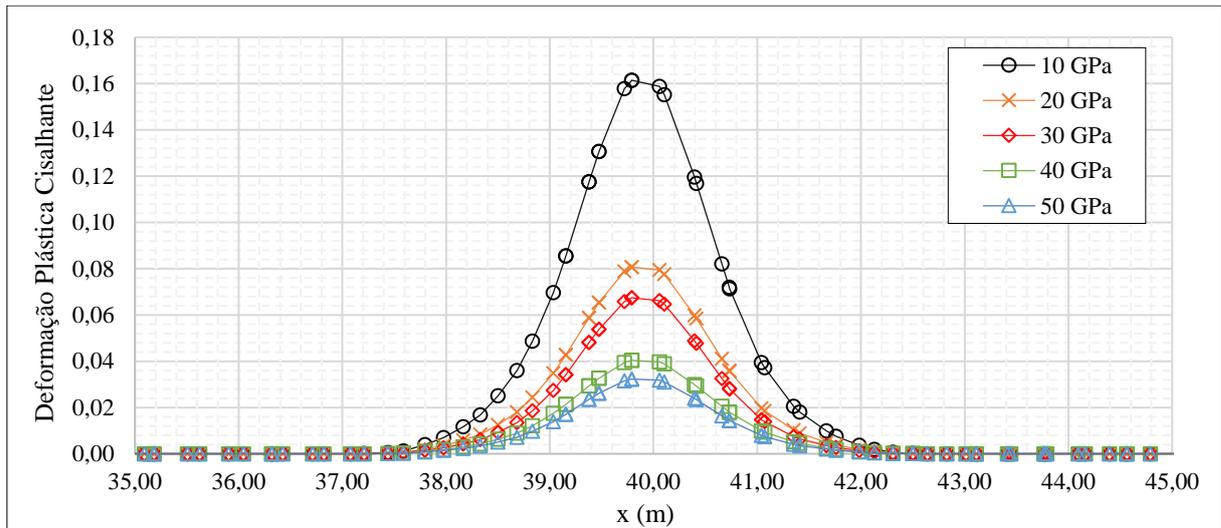
Fonte: O Autor (2020).

### 5.1.2 Rigidez da Rocha no Processo Cisalhante

A variação dos parâmetros físicos e elásticos da rocha faz-se necessário para o melhor entendimento da evolução tectônica de zonas de falha. Por exemplo, a análise da variação do módulo de elasticidade do material, diretamente associado a elasticidade e à rigidez do mesmo, de 10 GPa até 50 GPa para uma mesma tensão confinante de 50 MPa. Seguindo o mesmo fio de análises, o Gráfico 16 apresenta a deformação plástica cisalhante na linha central da largura do maciço, comprimento de 5 m, e limitado neste caso entre 35 e 45 m para facilitar a visualização da região com variação. Fica evidente que à medida que o módulo de elasticidade é aumentado

o material tende a se deformar menos para mesma região, visto que o material estará mais rígido com o aumento do módulo de elasticidade, com diminuição mais acentuada de 10 GPa para 20 GPa em que os valores máximos da deformação diminuem praticamente pela metade, 0,161 e 0,081 respectivamente.

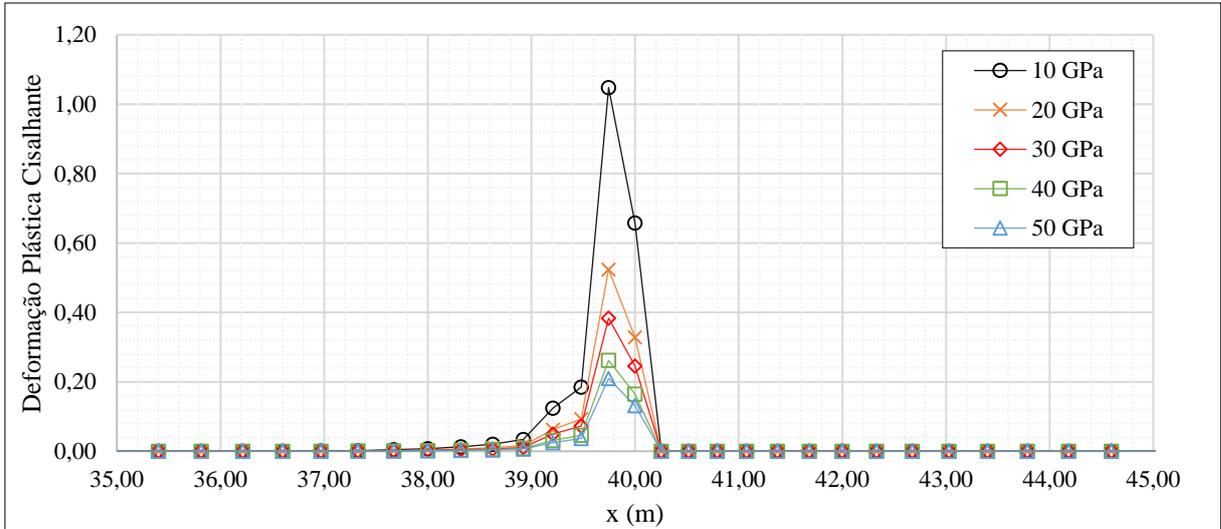
Gráfico 16 – Distribuição da deformação plástica cisalhante na região central do maciço variando o módulo de elasticidade no regime transcorrente.



Fonte: O Autor (2020).

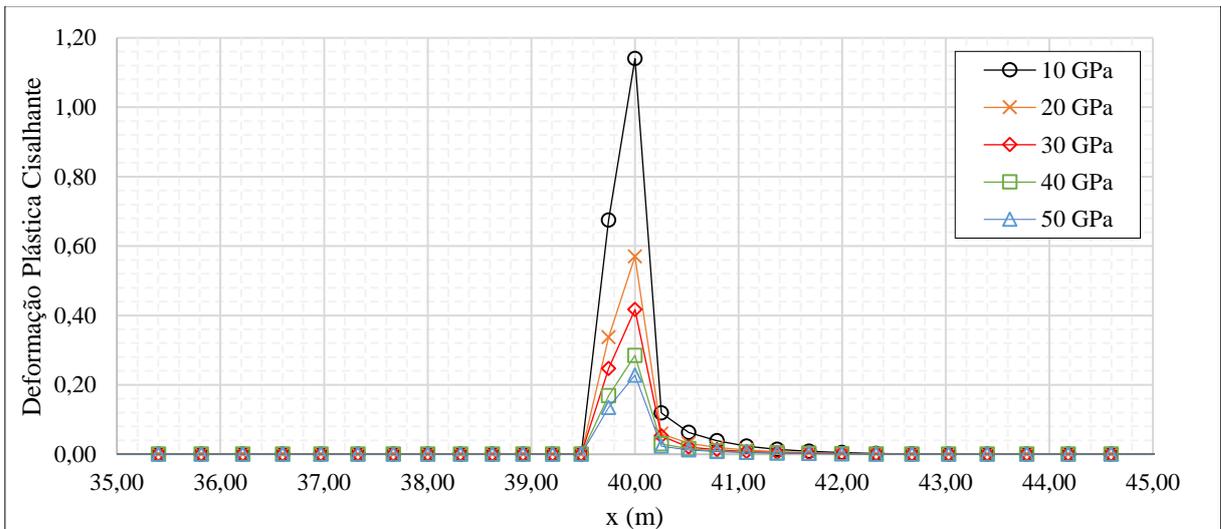
Foi observado que a variação no módulo de elasticidade não influenciou na largura da zona de plastificação do maciço, visto que a região de início e término da zona manteve-se a mesma com a diferença apenas na intensidade da deformação, permanecendo para todos os casos entre 4,36 m e 4,42 m. Ademais nas extremidades inferior e superior houve a diminuição do pico máximo de deformação a medida que houve aumento da rigidez do material, conforme apresentado no Gráfico 17 para a extremidade inferior e no Gráfico 18 para a extremidade superior.

Gráfico 17 – Distribuição da deformação plástica cisalhante na extremidade inferior do comprimento no regime transcorrente variando o módulo de rigidez.



Fonte: O Autor (2020).

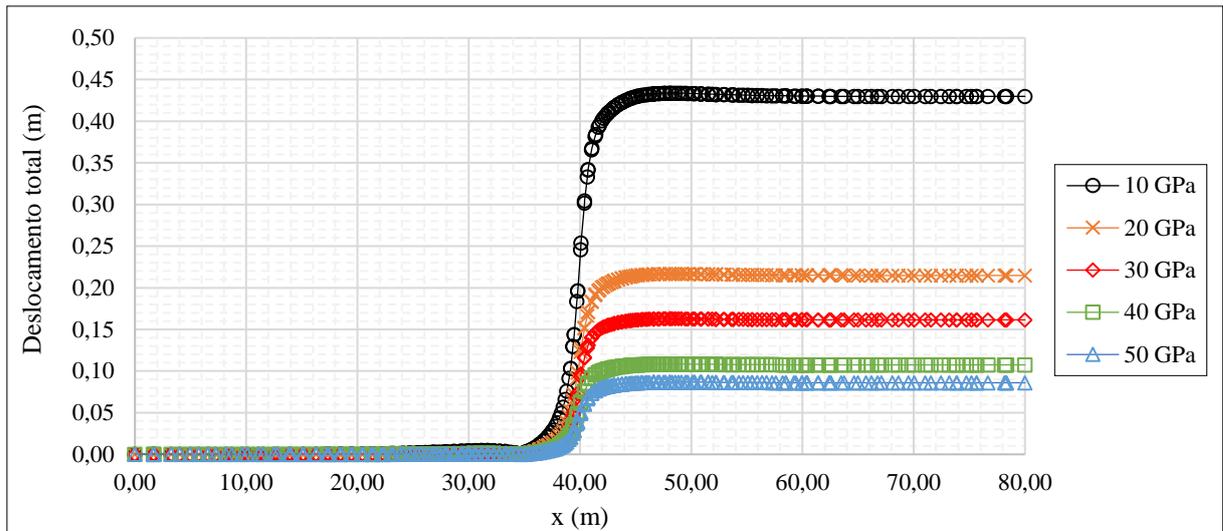
Gráfico 18 – Distribuição da deformação plástica cisalhante na extremidade superior no regime transcorrente variando o módulo de rigidez.



Fonte: O Autor (2020).

Os deslocamentos totais variaram de maneira inversa à variação da tensão confinante, com o aumento do módulo de Young e rigidez do material para cada caso a ruptura foi alcançada com menor deslocamento do maciço. Portanto, para valores menores de  $E$  o deslocamento total foi maior. O Gráfico 19 apresenta os deslocamentos totais para cada simulação, em que é possível verificar que o caso com módulo de elasticidade igual a 10 GPa apresentou valor consideravelmente superior aos demais, maior que o dobro do segundo caso 20 GPa, com valores máximos de 0,434 m e 0,217 m respectivamente.

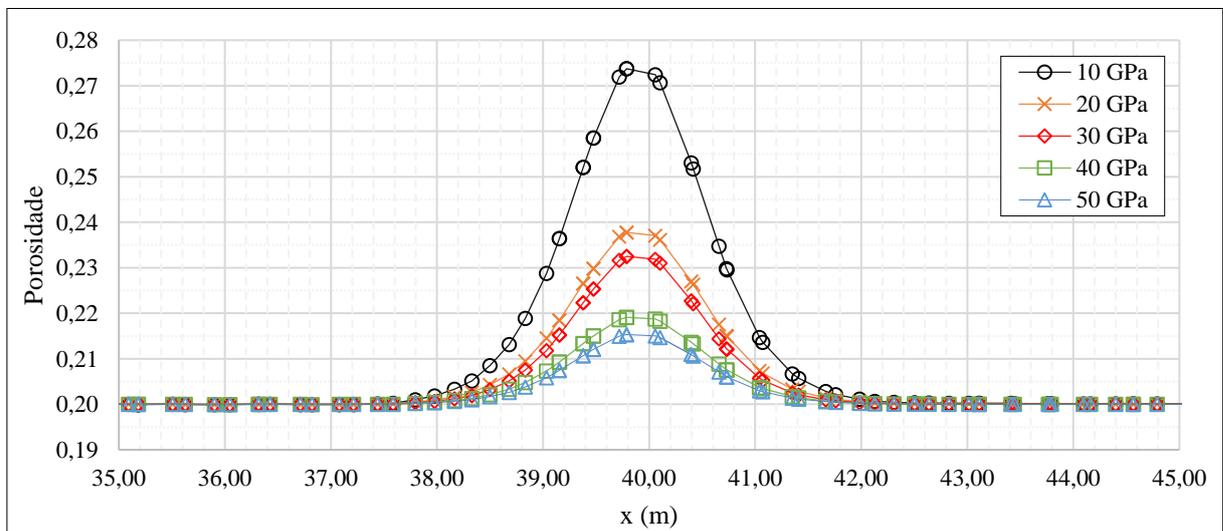
Gráfico 19 – Deslocamentos totais para a transcorrência para diferentes módulos de elasticidade.



Fonte: O Autor (2020).

A porosidade na linha central do maciço diminuiu com o aumento da rigidez, Gráfico 20. Ainda assim, apresentando pico máximo na região central e diminuindo para as extremidades da largura.

Gráfico 20 – Distribui porosidade para falha transcorrente para diferentes módulos de elasticidade.



Fonte: O Autor (2020).

As tensões cisalhantes pouco foram influenciadas com a mudança do módulo de Young, apresentando valores máximos e mínimos com pouca variação, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Cisalhamentos máximos e mínimos para falha transcorrente variando o módulo de elasticidade.

Módulo de Elasticidade	Tensão Cisalhante	
	Mín.	Máx.
10 GPa	-18,43 MPa	63,87 MPa
20 GPa	-18,43 MPa	63,87 MPa
30 GPa	-18,71 MPa	65,05 MPa
40 GPa	-18,43 MPa	63,87 MPa
50 GPa	-18,43 MPa	63,90 MPa

Fonte: O Autor (2020).

### 5.1.3 Formação de Falha em Zona de Transtensão

Esta seção apresenta as simulações da origem de falhas em regime transcorrente com associação de um deslocamento extensional, originando estruturas secundárias conforme descrito na seção 2.1.2. A Figura 33 apresenta um exemplo real deste tipo de formação, uma zona de transtensão em sua terminação no Ortognaisse do Complexo Caicó (RN), com cinemática dextral (sentido horário) que resulta na formação de estruturas secundárias do tipo rabo de cavalo.

Figura 33 – Zona de transtensão com cinemática dextral em rocha ortognaisse do Complexo Caicó (RN).

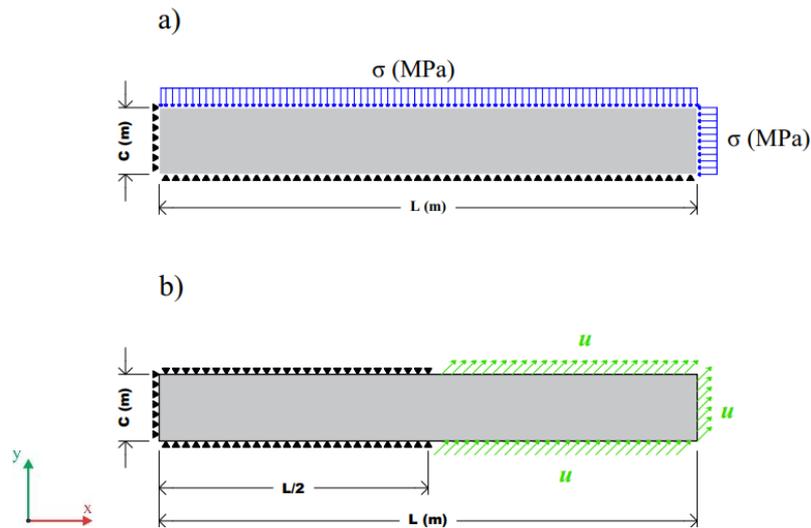


Fonte: Silva (2018).

A Figura 34 apresenta esquematicamente as condições de contorno do problema para os casos analisados, variando a tensão confinante  $\sigma$ , pela classificação de Anderson (1951) para

falhas oblíquas  $\sigma_h = \sigma_H = \sigma$ , e o deslocamento taxa máxima de 1 mm/min nas direções  $x$  e  $y$ , ambos positivos, perfazendo um deslocamento com ângulo de  $45^\circ$  com a horizontal. A geometria do maciço permaneceu inalterada,  $L=80$  m e  $C=10$  m.

Figura 34 – Condições de contorno da simulação da falha transcorrente com extensão: a) litostático; b) cisalhamento associado à extensão.

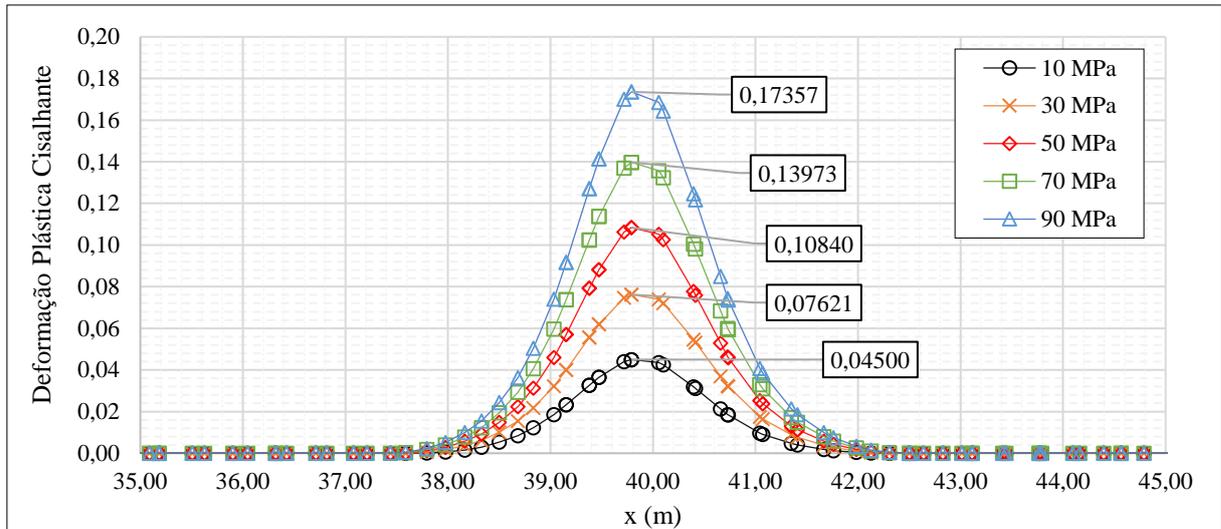


Fonte: O Autor (2020).

A malha do problema foi a mesma disposta Figura 24 composta por elementos 2201 nós e 4189 elementos triangulares, com tamanho mínimo dos elementos de 25 cm a região central. Bem como os parâmetros do material que compõe o maciço que permaneceram idênticos as análises anteriores e dispostos na Tabela 1.

As deformações plásticas no maciço, na linha central de análises, apresentaram comportamento de pico e espessura da zona de dano variando com a alteração da tensão confinante, aumentando significativamente com este aumento. No Gráfico 21 fica nítido a variação com a tensão confinante, inclusive com os valores máximos para cada caso aumentando, em até 69 % como é o caso do máximo para 30 MPa em relação a 10 MPa.

Gráfico 21 – Deformações plásticas distribuídas no meio ao longo da largura do maciço em transtensão variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

Esse comportamento é decorrente principalmente por deformação a tração do material no regime cinemático imposto e nesse caso com esforços internos acentuados à tração, portanto nos casos com maior tensão confinante há uma decompressão por tração até a ruptura em si pelo processo cisalhante e tração interna, na Figura 36 em que fica nítido a distribuição das tensões principais mínimas e máximas respectivamente para o primeiro caso em que o maciço é submetido a uma tensão confinante de 10 MPa. Na Figura 36 a) fica evidente a predominância das tensões principais mínimas a existências de tensões tracionando o maciço na região central.

Nas representações vetoriais da tensões mínimas, Figura 36 a) e b), fica evidente o sentido dos vetores de tensão e a predominância destes na região central, visto que o tamanho está relacionado a intensidade e no caso aplicado um fator de escala de 0,1 para facilitar visualização. Esse aspecto de concentração de tensão a tração é amplamente estudado e apresenta característica análoga a formações do tipo *pull-apart*, e estruturas secundárias como fraturas do modo I.

Entretanto, para a tensão principal máxima é possível verificar grande concentração e intensidade de tensões à compressão e pontos específicos próximo da região da mudança da condição de contorno apresentando tração, para o mesmo fator de escala utilizado anteriormente 0,1 nas Figuras 37 a) e b). Além disso, percebe-se a mesma característica de concentração de tensões com geometria rômbrica, correspondendo a etapa de processo formador de falhas transcorrentes com outro movimento formador associado

Figura 35 – Distribuição das tensões principais máximas e mínimas: a) distribuição da tensão principal mínima; b) detalhe 1; c) distribuição da tensão principal máxima; d)

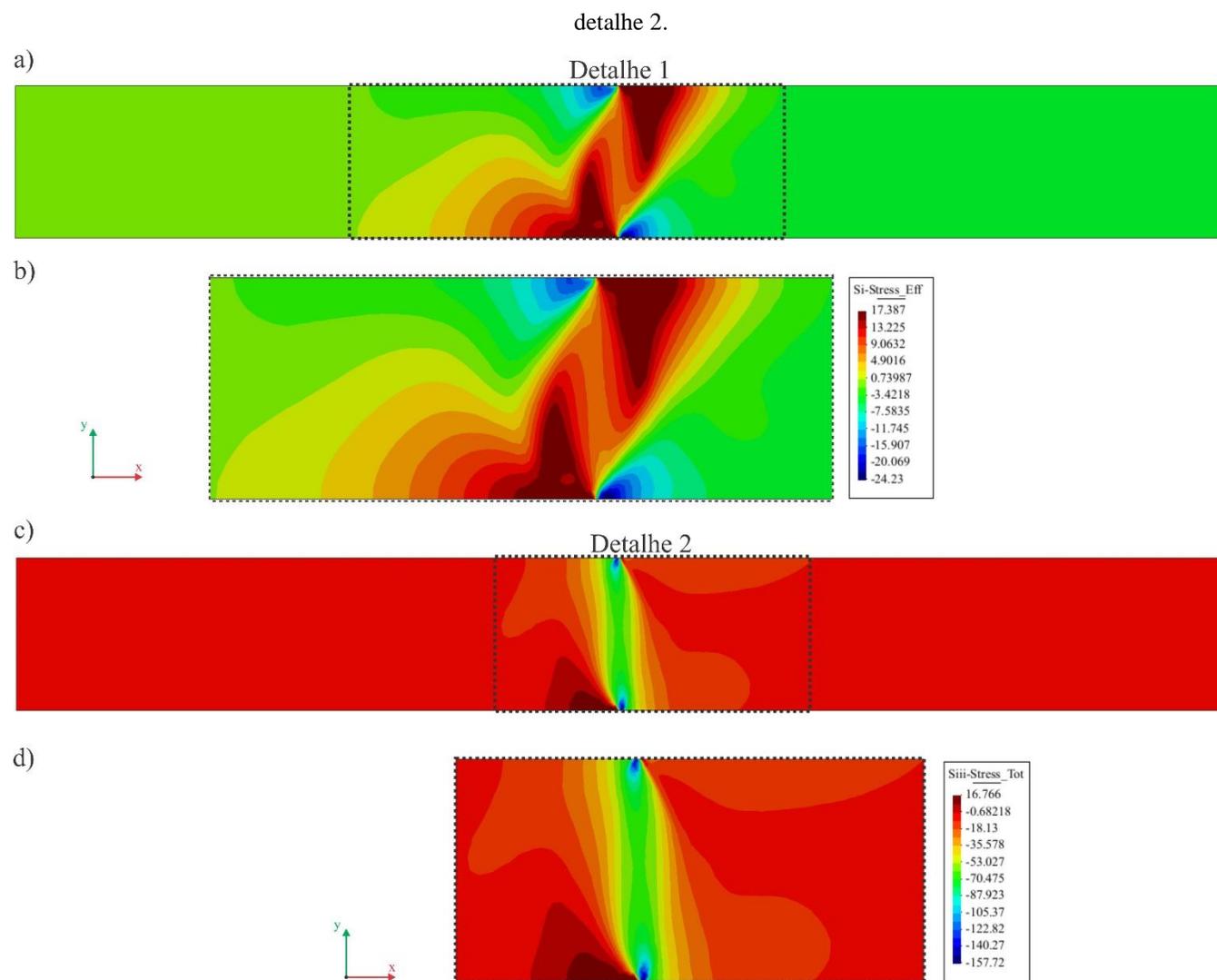
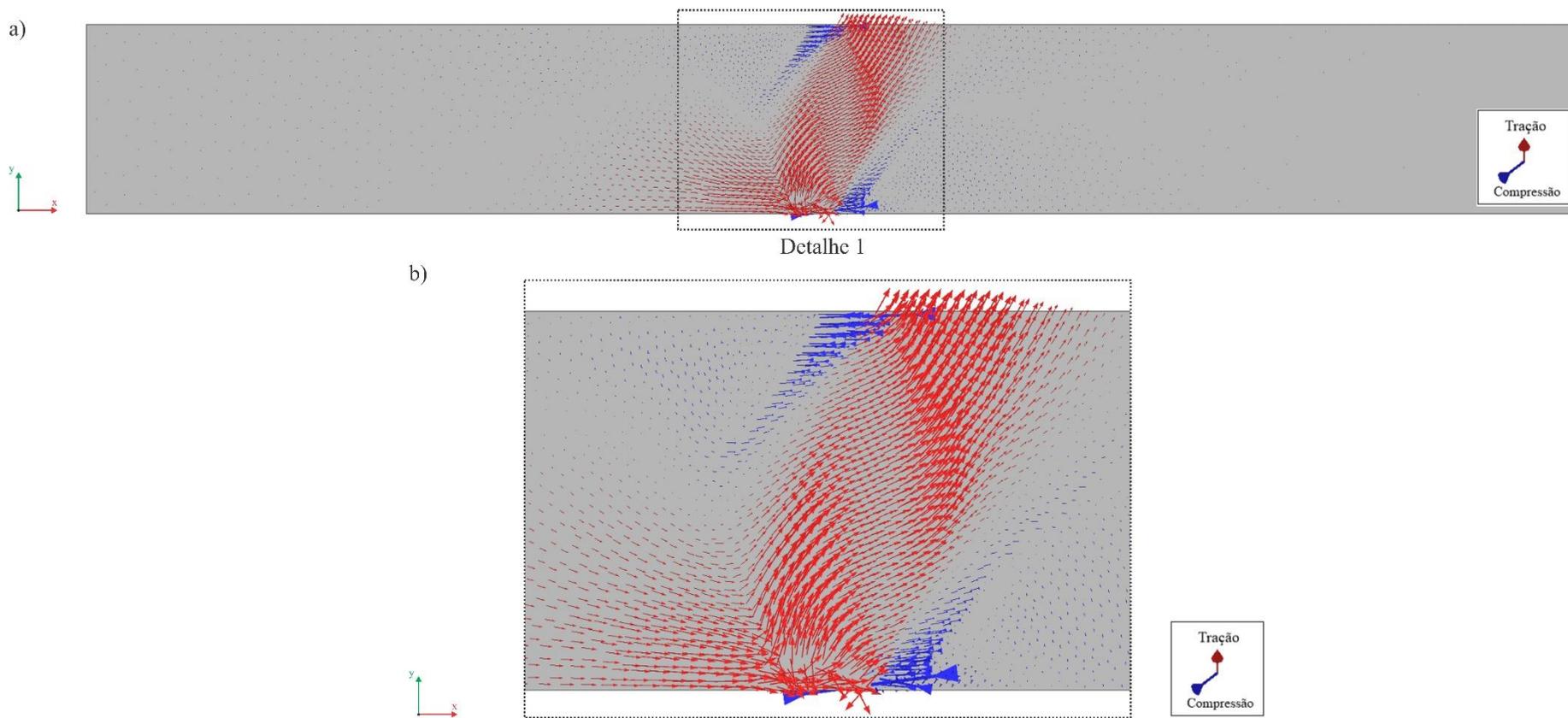
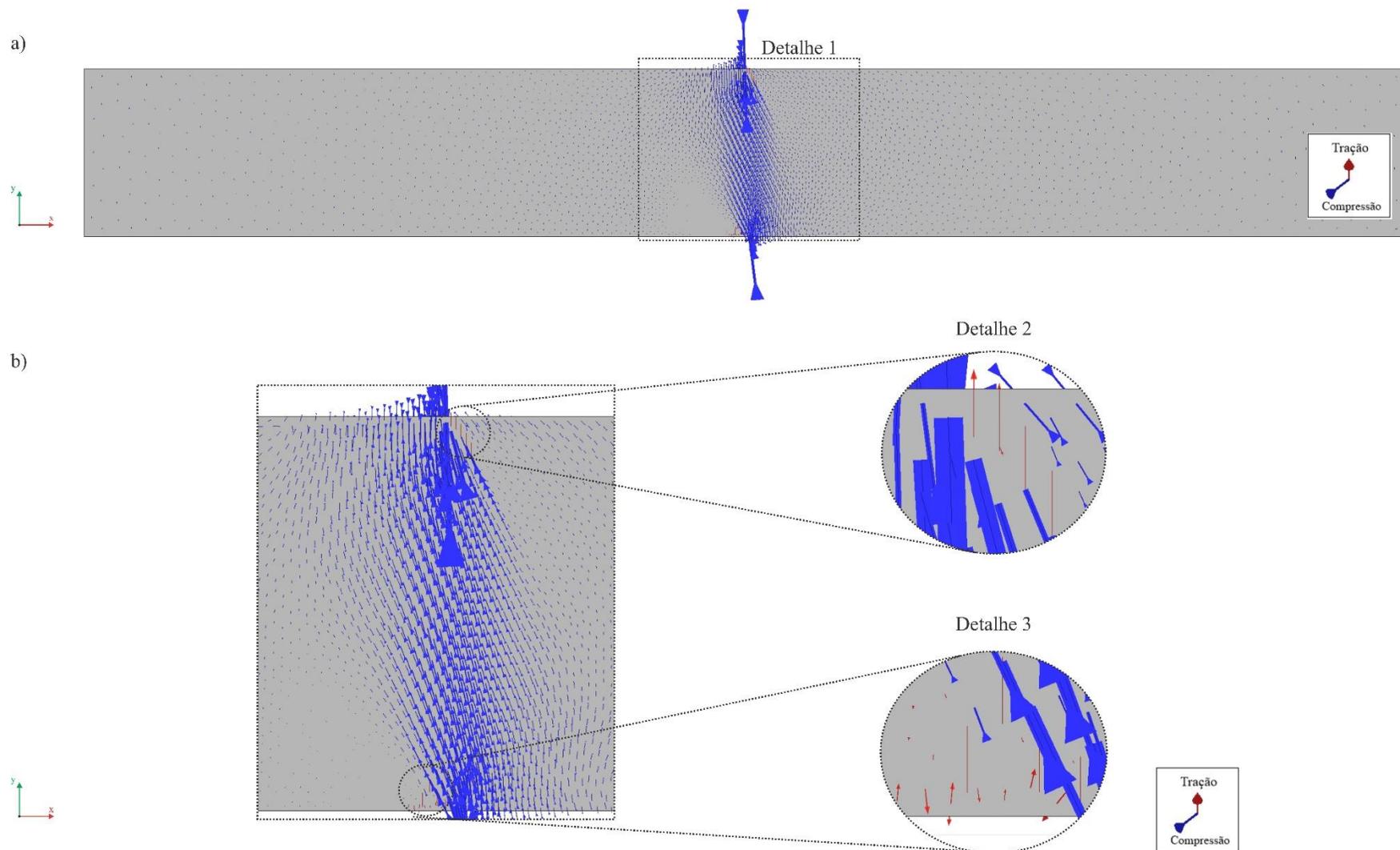


Figura 36 – Representação vetorial das tensões principais mínimas com fator de apresentação de 0,1 e representação das tensões tracionando em vermelho e compressão em azul: a) maciço completo; b) detalhe 1.



Fonte: O Autor (2020)

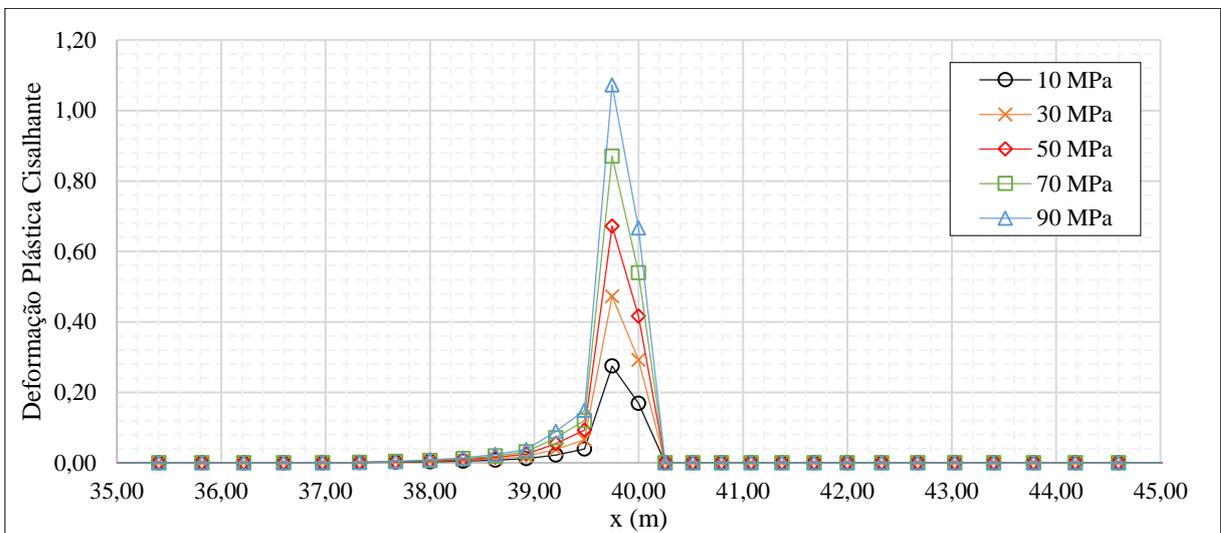
Figura 37 – Representação vetorial das tensões principais máximas com fator de apresentação de 0,1 e representação das tensões tracionando em vermelho e compressão em azul: a) maciço completo; b) detalhe 1.



Fonte: O Autor (2020).

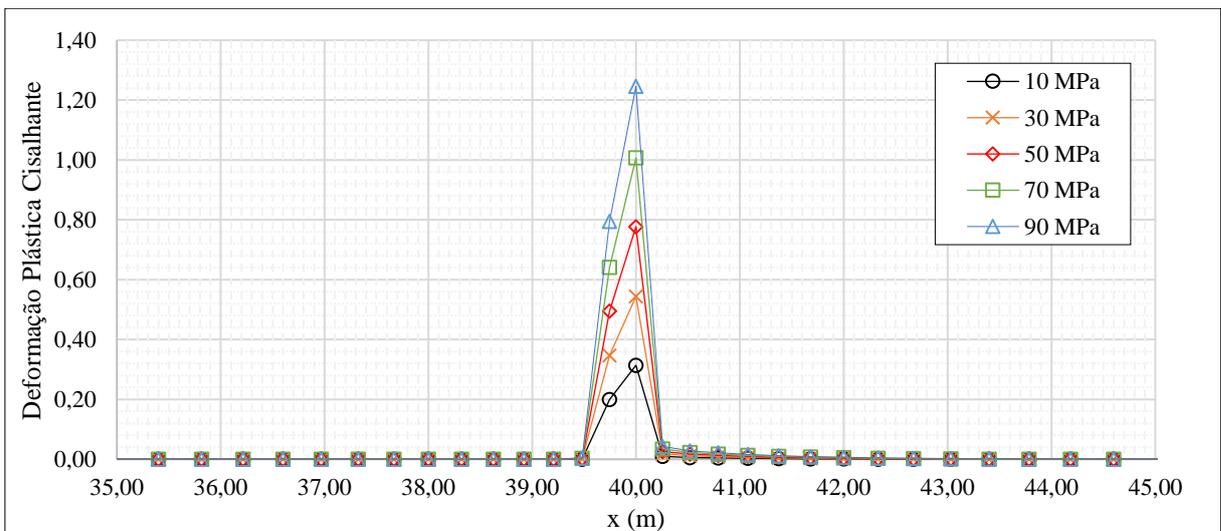
A deformação para nas linhas de análise das extremidades, superior e inferior, apresentaram comportamento semelhante a transcorrência simples, consistindo de um espreadimento à esquerda do maciço, região fixa na direção do eixo y, na parte inferior e na região superior apenas um pico característico formado com máximo em 40 metros, limitando-se apenas à porção fixa em y do maciço, diferente do que ocorre com a transcorrência simples que há o espalhamento para a direita. Os Gráficos 22 e 23 apresentam o comportamento descrito com ênfase na região central onde ocorre a variação das deformações, linha inferior e superior respectivamente.

Gráfico 22 – Deformações plásticas na extremidade superior em transtensão variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

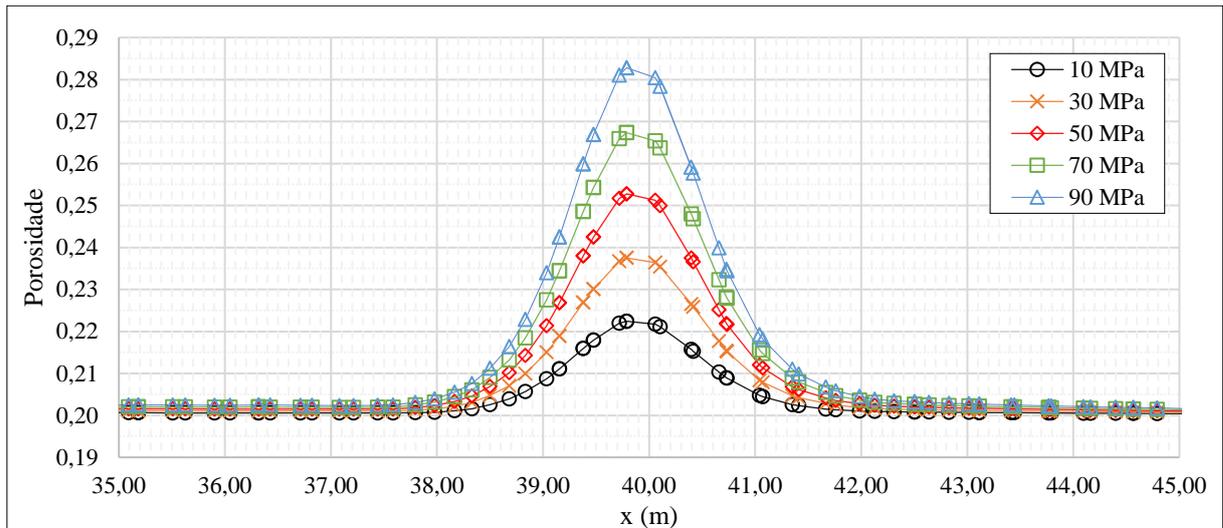
Gráfico 23 – Deformações plásticas na extremidade inferior em transtensão variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

A porosidade na linha central do maciço aumentou com o incremento da tensão confinante, da mesma forma que para a transcorrência, no entanto neste caso houve aumento da porosidade ao longo do maciço justamente pelos deslocamentos em  $x$  provocado pela extensão, com valores máximos maiores à medida que a tensão confinante foi aumentada. O Gráfico 24 apresenta a variação da porosidade com a mudança da tensão confinante.

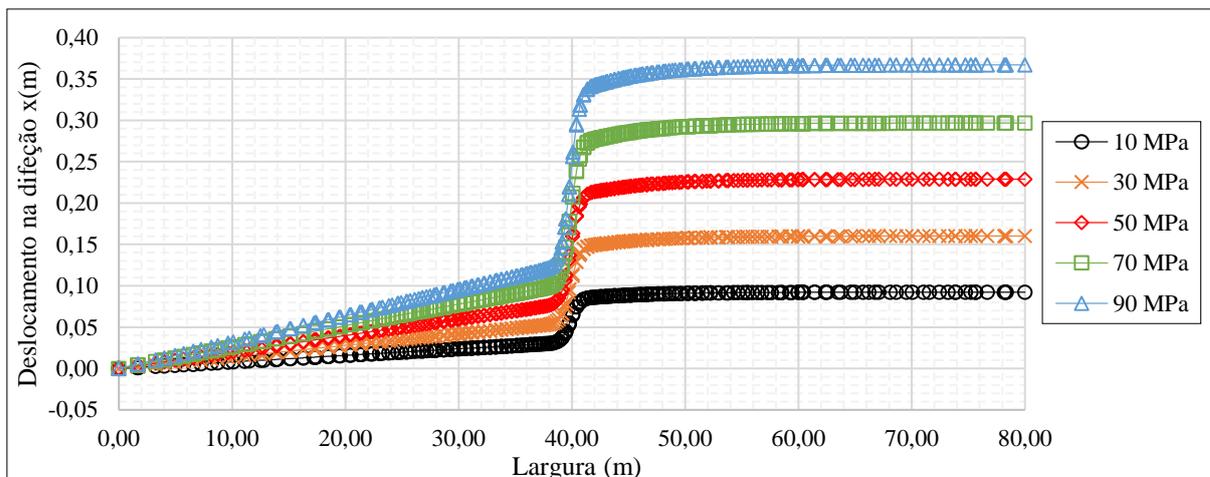
Gráfico 24 – Porosidade no meio do maciço em transtensão variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

Neste caso de simulação com extensão é possível verificar um aumento quase linear dos deslocamentos em  $x$  da condição de contorno à esquerda, fixa nessa direção, até uma região de transição na parte central do maciço em que há um salto nesses deslocamentos entre os blocos em movimento nas duas direções e em uma apenas. O comportamento descrito fica evidente no Gráfico 25.

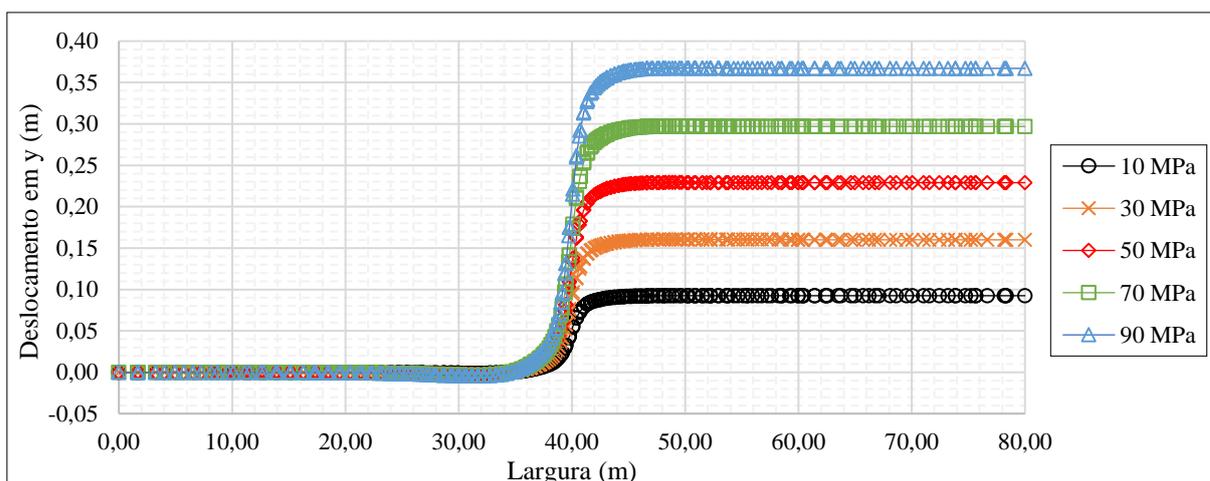
Gráfico 25 – Deslocamentos na direção  $x$  ao longo da largura do maciço no meio em transtensão variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

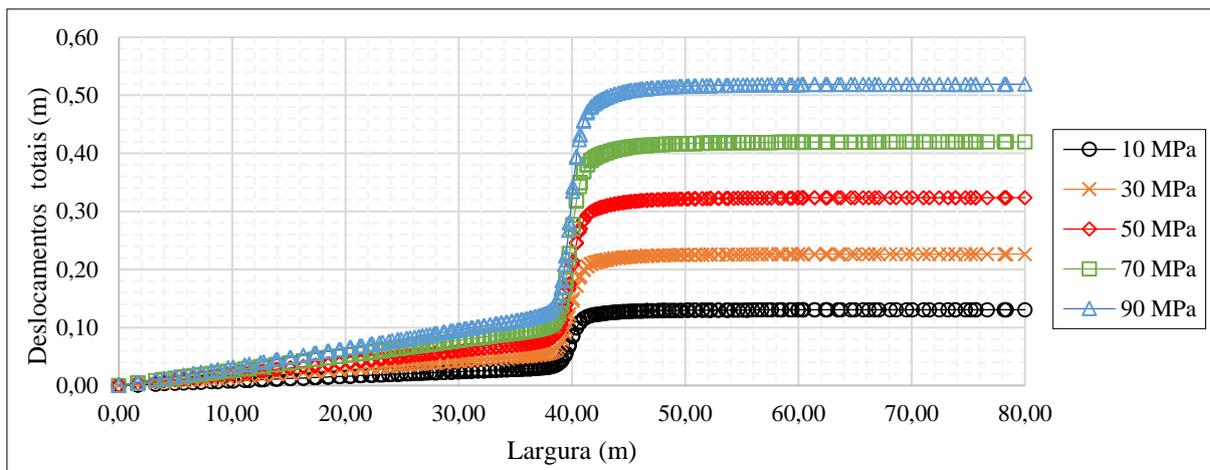
Os deslocamentos na direção  $y$  comportaram-se de maneira análoga ao regime transcorrente, com um bloco estritamente parada nessa direção, uma região de transição em que se iniciam os deslocamentos nessa direção e outra parte que foi deslocada na mesma quantidade de metros nesse sentido. O Gráfico 26 apresenta os deslocamentos na direção do eixo  $x$ , bem como o Gráfico 27 os deslocamentos totais decorrentes do processo extensional.

Gráfico 26 – Deslocamento na direção  $y$  ao longo do maciço no meio em transtensão variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

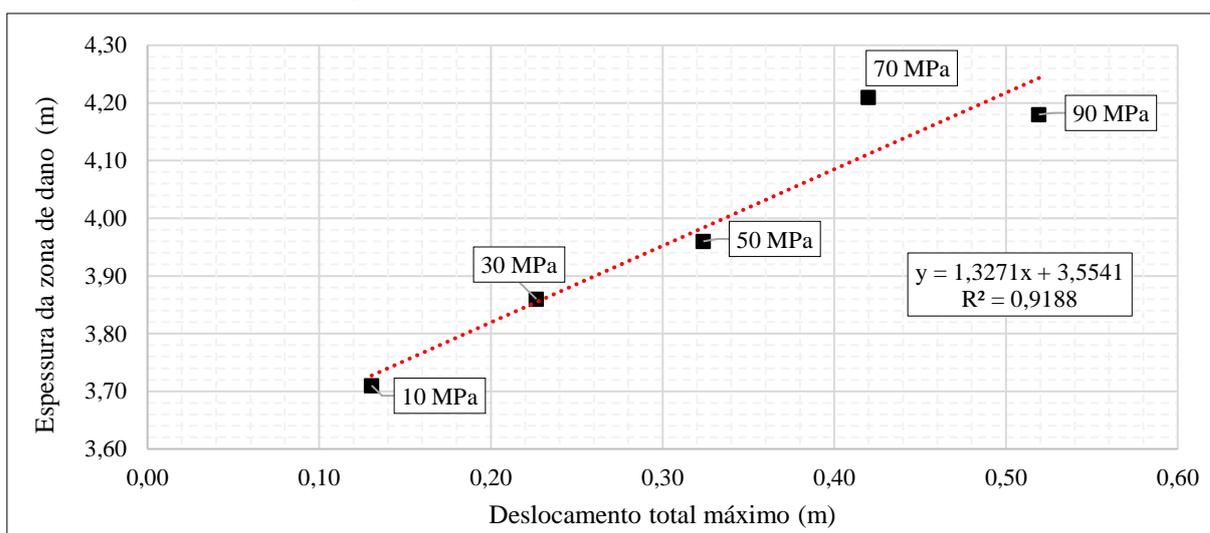
Gráfico 27 – Deslocamento total ao longo do meio do maciço em relação a largura em transtensão variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

Utilizando as larguras da zona de dano para cada tensão confinante e os deslocamentos totais, é possível relacionar esses dados através do Gráfico 28. É possível verificar que uma linha de tendência linear com  $R^2 = 0,9188$  a variação da espessura da zona de dano dependendo do deslocamento total, bem como fica implícito que essa última variável sofre influência definitiva da tensão confinante à qual o sólido está submetido.

Gráfico 28 – Relação espessura da zona de dano em metros com deslocamento máximo do maciço na região superior em transtensão variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

As tensões cisalhantes concentraram-se majoritariamente no bloco que não movimentava em relação ao eixo y, e estabiliza no bloco que se movimenta, oscilando apenas do pico no meio do maciço diminuindo a zero na linha central do restante desta região. Assim, a região

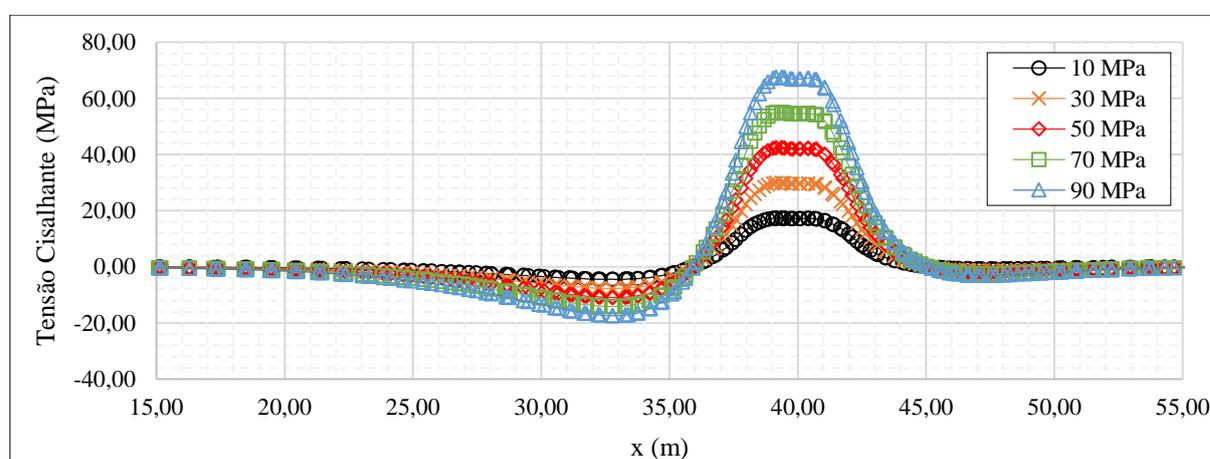
característica de zona de dano por conta das deformações plásticas se concentrou na porção positiva da variação da tensão cisalhante do Gráfico 29. No entanto o bloco está fixo em  $y$  e apresenta uma área com tensão cisalhante em sentido oposto que caracteriza uma região adjacente não plastificada fora do regime litostático com variação das tensões cisalhantes. A Tabela 5 apresenta os valores máximos e mínimos para tensão cisalhante em cada caso, com tensões confinantes distintas, evidenciando que há maior incremento da tensão cisalhante máxima na região central à medida que o a tensão confinante aumentou, justamente por conta do ganho de resistência esperada para esse aumento do estado tensional.

Tabela 5 – Cisalhamentos máximos e mínimos para transtensão com variação da tensão confinante

Tensão Confinante	Tensão Cisalhante	
	Mín.	Máx.
10 MPa	-4,47 MPa	17,33 MPa
30 MPa	-7,68 MPa	29,85 MPa
50 MPa	-10,91 MPa	42,41 MPa
70 MPa	-14,14 MPa	54,95 MPa
90 MPa	-17,39 MPa	67,56 MPa

Fonte: O Autor (2020).

Gráfico 29 – Distribuição da tensão cisalhante no meio do maciço em transtensão variando a tensão confinante.

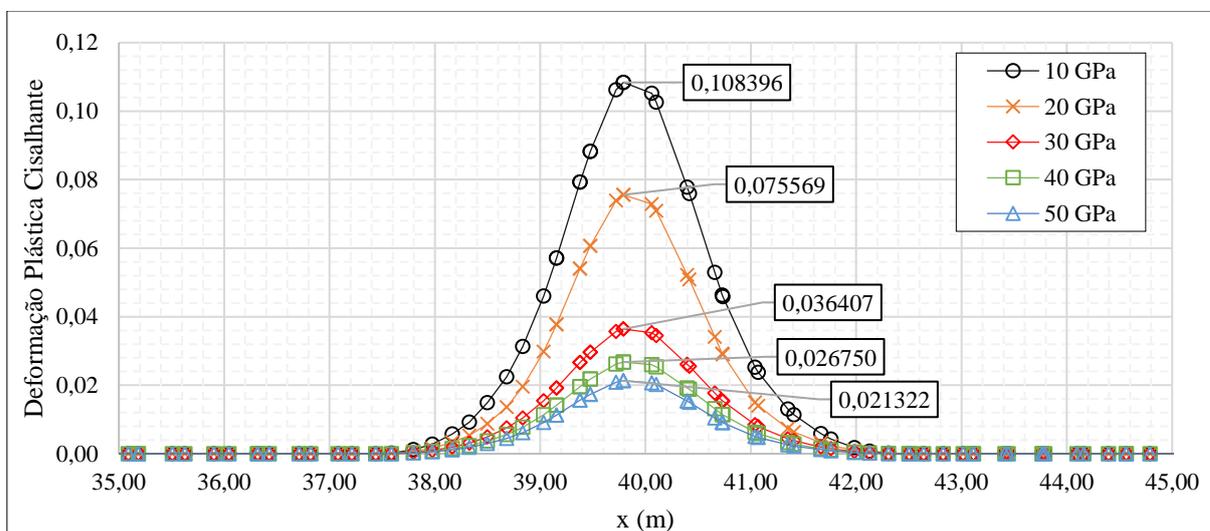


Fonte: O Autor (2020).

Outra avaliação realizada versa a respeito da influência de um dos parâmetros do material no processo de falhamento transcorrente com extensão. Desta forma, aplicando a mesma tensão confinante de 50 MPa variou-se o módulo de elasticidade de 10 GPa até 50 GPa. O aumento da rigidez do material influenciou expressivamente nos valores máximos da deformação plástica cisalhante no meio do maciço, como por exemplo para o caso com 50 GPa a deformação máxima de aproximadamente 0,02, se comparado com o caso em transcorrência

reduziu pela metade o valor máximo, visto que a extensão influenciou diretamente nesse processo de ruptura. O Gráfico 30 apresenta a distribuição das deformações plásticas ao longo do maciço na linha central, apresentando pouca diferença na espessura da zona de dano variando de 3,90 m à 4,20 m, no entanto sem qualquer relação com a variação da rigidez nesse caso. Outro ponto que merece destaque é a separação das curvas para 10 e 20 GPa das demais, tornando notório que apesar de influência no valor máximo da plastificação, quanto mais rígido menor o valor, não é possível estabelecer uma relação coerente do incremento do módulo de elasticidade com essa redução.

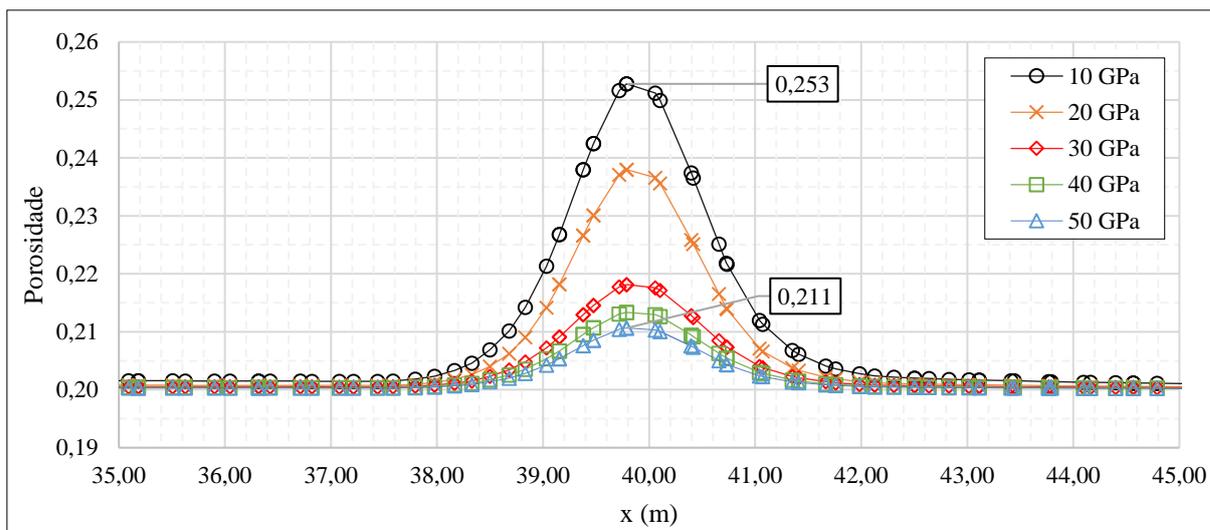
Gráfico 30 – Deformação plástica cisalhante no meio do maciço em transtensão para diferentes módulos de Young do material.



Fonte: O Autor (2020).

A porosidade variou de 0,211 até 0,253 para módulo de elasticidade de 50 GPa e 10 GPa, respectivamente. Logo, a influência na porosidade está intimamente ligada ao uso de plasticidade associada com ângulo de dilatância igual ao ângulo de atrito e as deformações volumétricas geradas. O Gráfico 31 apresenta a região com variação da porosidade mais expressiva, no meio do maciço próximo a região central.

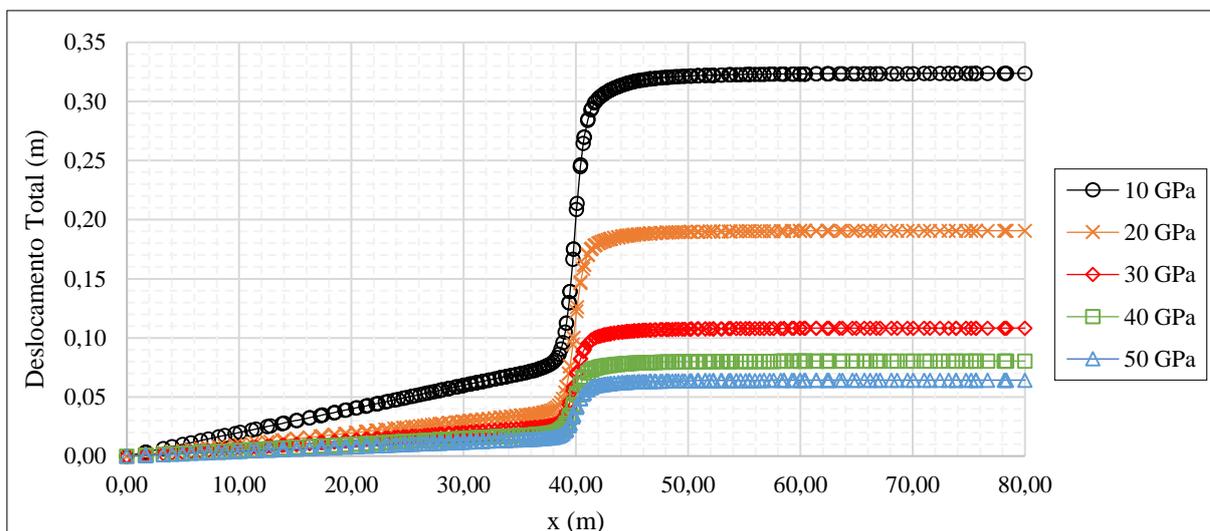
Gráfico 31 – Porosidade para linha central para o maciço em transtensão variando o módulo de elasticidade.



Fonte: O Autor (2020).

Os deslocamentos foram maiores para os maciços simulados com módulos de elasticidade menores, bem como variou poucos centímetros para valores a partir de 30 GPa. O deslocamento total máximo de 0,324 m da porção à direita do maciço nesse caso específico é consideravelmente menor que os casos em transcorrência, o que corrobora com o comportamento mecânico da rocha a tração, menos resistente se comparado a compressão.

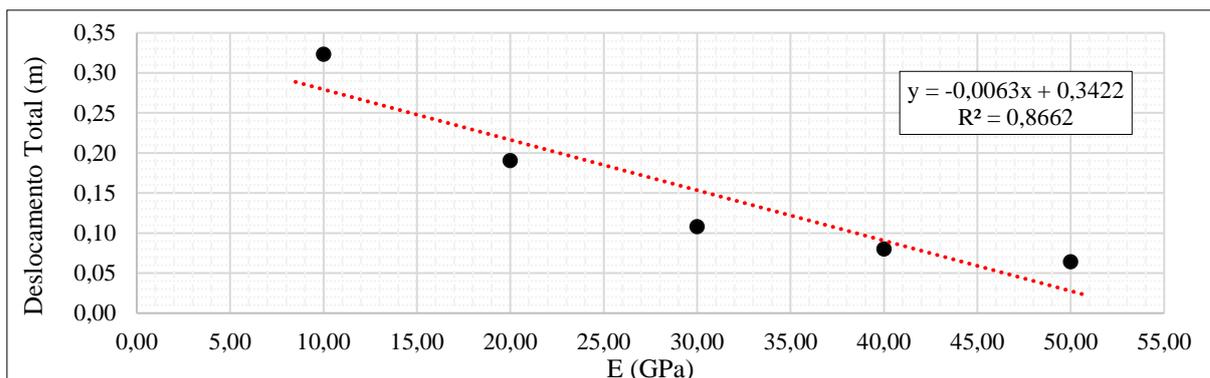
Gráfico 32 – Deslocamento total para o maciço em transtensão variando o módulo de elasticidade.



Fonte: O Autor (2020).

Apesar de não apresentar expressiva variação da espessura da zona de dano em decorrência da variação do módulo de elasticidade, é possível relacionar esse parâmetro diretamente com os deslocamentos totais do maciço, que diminuem a medida que o material é mais rígido, conforme apresentado no Gráfico 33.

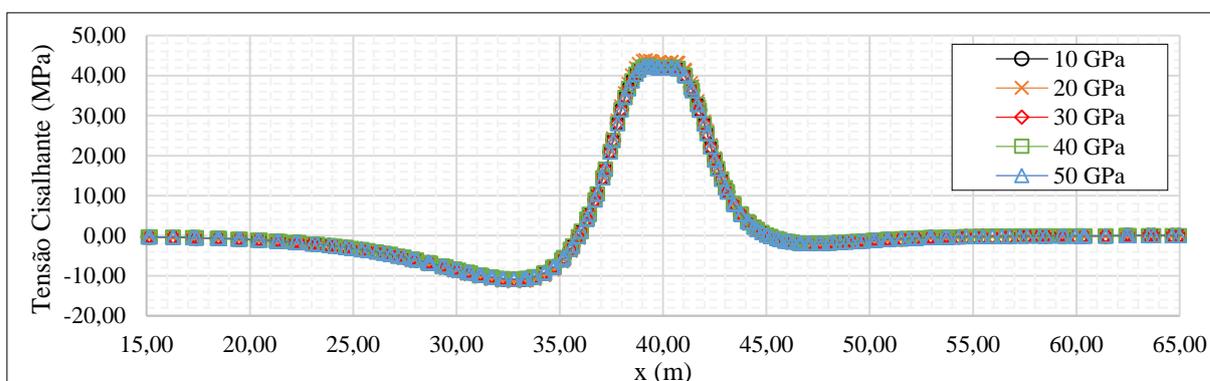
Gráfico 33 – Variação do rejeito em função da variação do módulo de elasticidade para maciço em transtensão.



Fonte: O Autor (2020).

A distribuição das tensões cisalhantes no maciço não apresenta grande diferença em relação a mudança do módulo de elasticidade, que implica em dizer que as tensões cisalhantes não sofrem influência expressiva da variação desse parâmetro. Logo, a nível de tensões a cinemática do movimento e a tensão confinante apresentam importância preponderante na formação e intensidade de partes cisalhantes, Gráfico 34.

Gráfico 34 – Distribuição da tensão cisalhante na linha central para o maciço em transtensão variando o módulo de elasticidade.



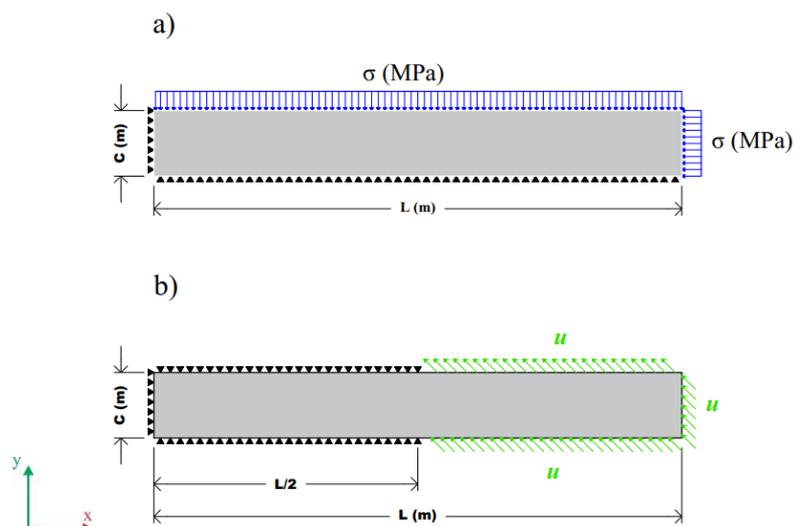
Fonte: O Autor (2020).

#### 5.1.4 Formação de Falha em Zona de Transpressão

A última campanha de simulações realizadas para o regime transcorrente consistiu do processo de transcorrência associada a um processo de compressão durante a formação das falhas. Neste caso, utilizou-se da mesma taxa de deslocamento máximo de 1 mm/min nas direções  $x$  e  $y$ , perfazendo um deslocamento com ângulo de  $135^\circ$  com a horizontal, sentido anti-horário. A geometria do maciço permaneceu inalterada,  $L=80$  m e  $C=10$  m. Nesse caso específico compressional as simulações não foram interrompidas por ruptura, indo até o tempo limite e performando deslocamento de um metro nas direções do deslocamento, totalizando

1,413 m de deslocamento total, por conta da grande resistência mecânica das rochas à compressão e a utilização de plasticidade perfeita no modelo constitutivo. Os parâmetros do material mantiveram-se inalterados conforme apresentado na Tabela 1. A Figura 38 apresenta as condições de contorno básica para as duas etapas, variando a tensão confinante  $\sigma$ , pela classificação de Anderson (1951) para falhas oblíquas  $\sigma_h = \sigma_H = \sigma$  como compressão litostática, e transpressão.

Figura 38 – Condições de contorno da simulação da falha transcorrente com compressão: a) litostático; b) cisalhamento associado à compressão.



Fonte: O Autor (2020).

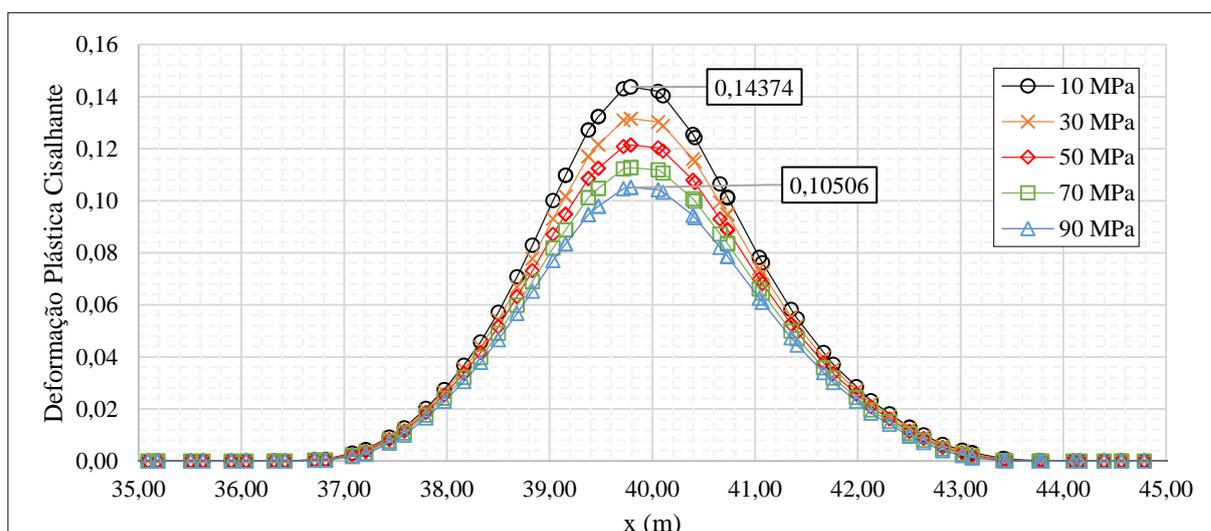
A primeira análise realizada consistiu na variação da tensão confinante na etapa inicial e verificação da influência da dessa condição de contorno na maciço. Primeiramente, avaliando as deformações plásticas é possível verificar que a espessura da zona de dano na parte central variou pouco com a mudança da tensão confinante, menos de dez centímetros diferença entre o caso de maior e menor largura, Gráfico 35.

O valor máximo da deformação plástica cisalhante na região central diminuiu à medida que a tensão confinante foi incrementada, comportamento diferente das análises anteriores visto que a tensão confinante confere maior resistência ao material. Contudo, nesse caso, como o processo cinemático de impor um deslocamento que comprime o maciço faz com que as tensões de confinamento continuem aumentando, não apresentando expressivas tensões internas em tração como nos casos anteriores. Portanto, nesse caso específico as deformações plásticas provocadas por compressão sofreram influência da tensão confinante justamente pelo incremento de resistência, menor possibilidade se deformar e estas são causadas precisamente por tensões de compressão.

Nas Figuras 39 e 40 estão as representações vetoriais das tensões principais mínimas e máximas, respectivamente, com tamanho das setas fixos e sem relação com a intensidade nesses casos, visto que para este caso compressional os valores das tensões à compressão são significativamente maiores que à tração. Portanto, fica evidente que em ambas as tensões principais há esforços à tração, no primeiro caso nas tensões mínimas de maneira mais expressiva e tendendo ao sentido no eixo  $x$  contrário ao movimento e favorecendo a formação de um romboide dos esforços à compressão, e os vetores a tração indicariam a formação de estruturas secundarias no processo cisalhante. Na representação dos vetores das tensões máximas fica evidente que os esforços tracionando o maciço são poucos expressivos e estão presentes apenas na mudança de condição de contorno na região central. A Figura 40 c) apresenta a geometria das tensões principais máximas, com aspecto rômboico em característico de falhas transcorrentes, no entanto nesse caso com predomínio de cinemática em compressão no regime de tensões transpressionais, resultando em estruturas como antifratura e fraturas do modo II e a formação de uma zona dúctil do maciço.

Outro ponto relevante é que as deformações máximas apresentaram valores inferiores se comparados a transcorrência e transtensão, já que para o presente caso o deslocamento total para todos os casos foi igual e muito maior que os demais casos, ou seja, enquanto que para transpressão a uma tensão confinante 90 MPa ocorreu uma deformação plástica cisalhante máxima de 0,105 para um deslocamento total de 1,413 m, na transcorrência deformação de 0,174 para um deslocamento total 0,519 m e na transtensão deformação de 0,255 e deslocamento 0,690 m.

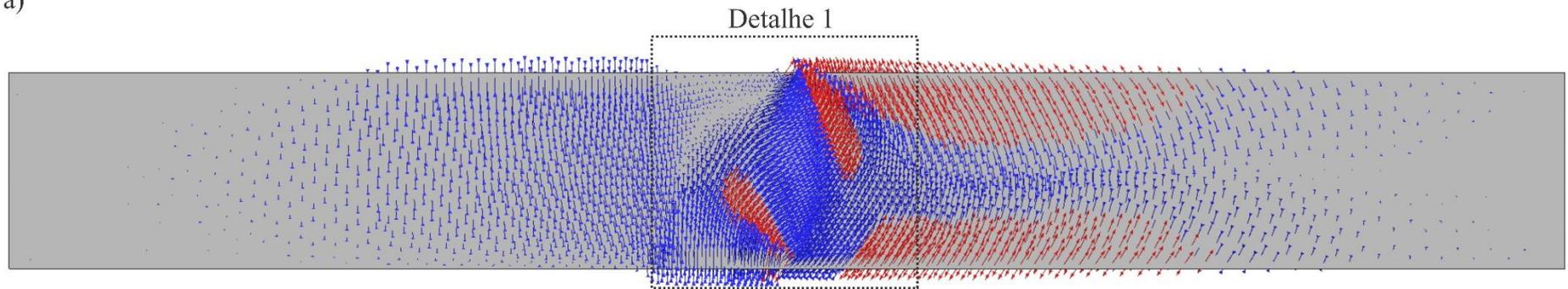
Gráfico 35 – Variação da deformação plástica cisalhante para linha central do maciço em transpressão variando a tensão confinante.



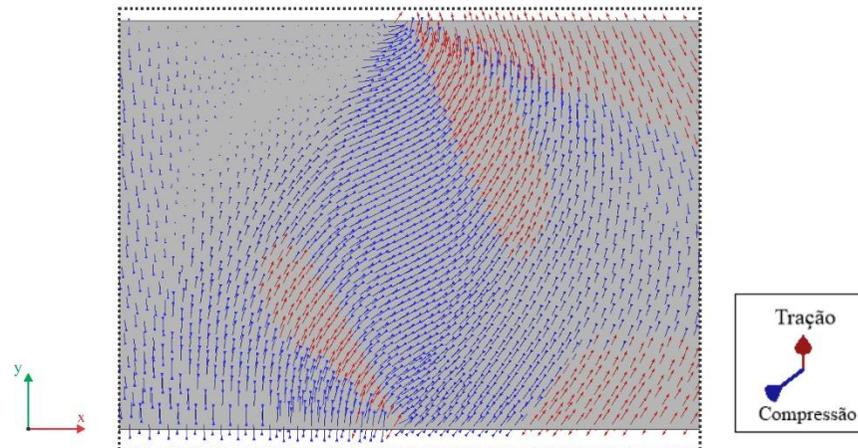
Fonte: O Autor (2020).

Figura 39 – Representação vetorial da tensão principal mínima, em que o tamanho das setas está fixo, logo não indica intensidade, na cor azul compressão e vermelho para tração: a) maciço completo; b) detalhe 1 com ênfase na região central.

a)

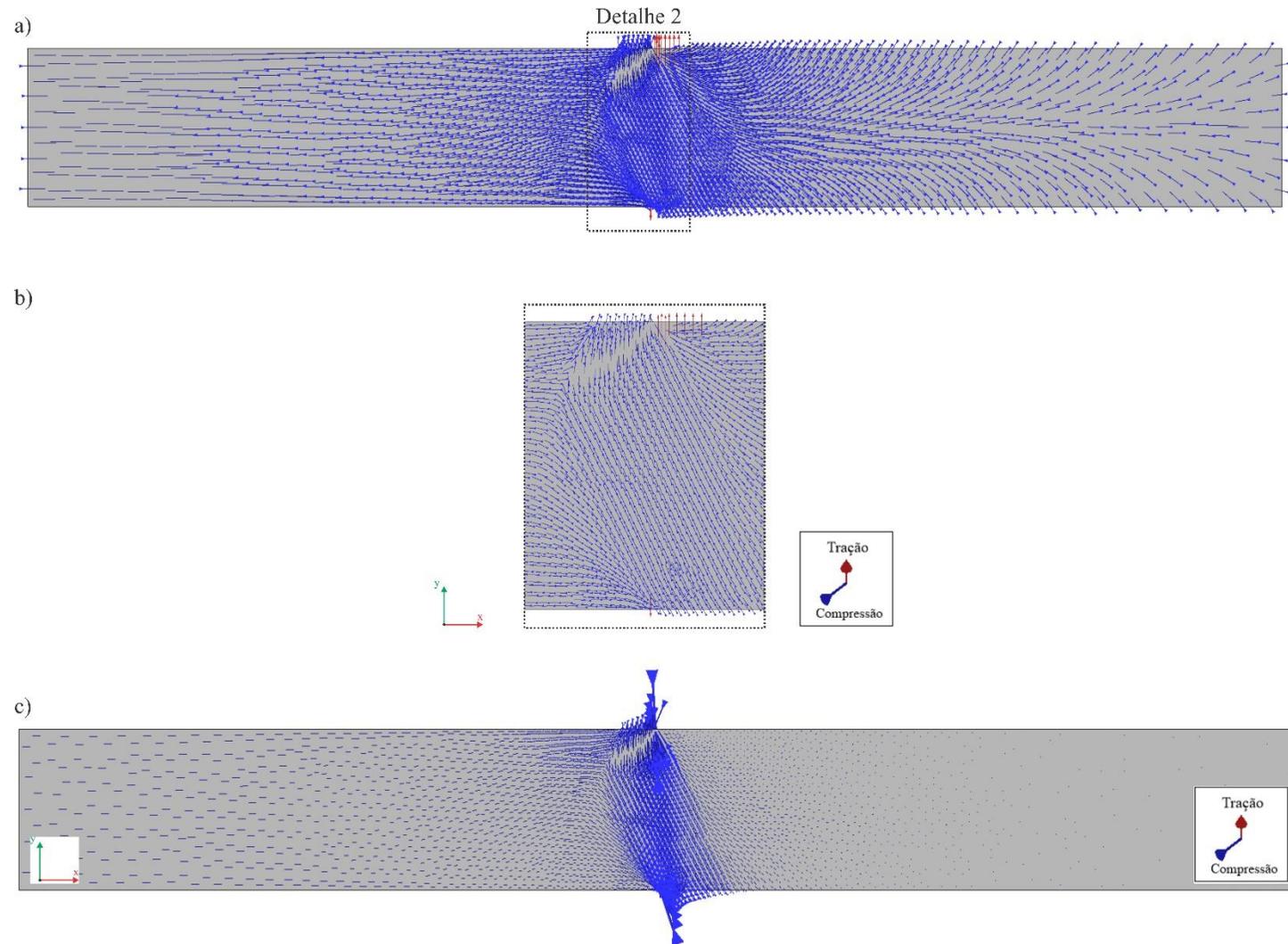


b)



Fonte: O Autor (2020).

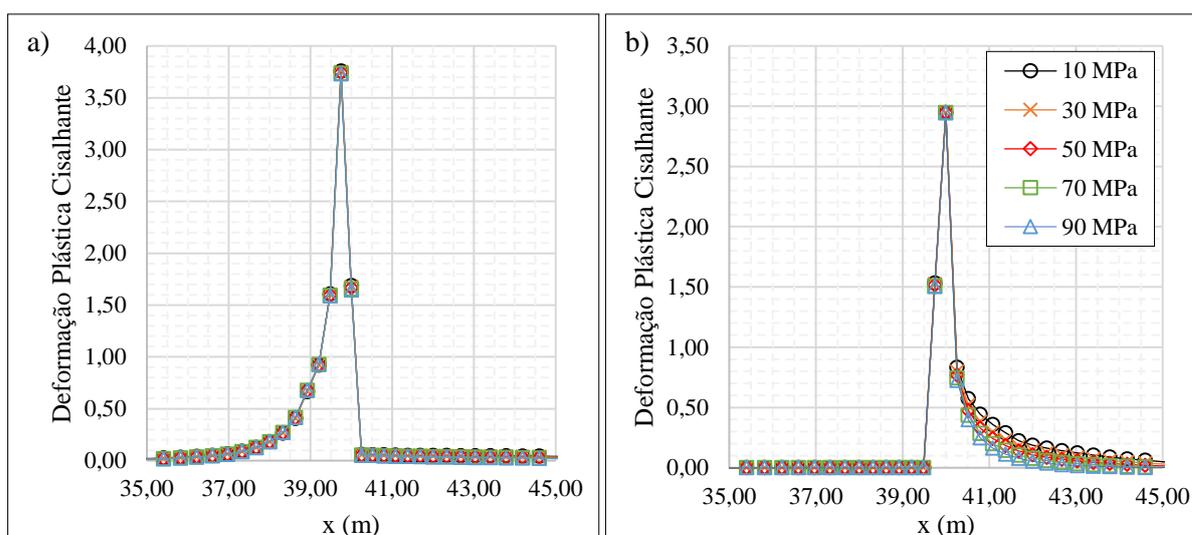
Figura 40 – Representação vetorial da tensão principal máxima, em que o tamanho das setas está fixo, logo não indica intensidade, na cor azul compressão e vermelho para tração: a) maciço completo; b) detalhe 2 com ênfase na região central



Fonte: O Autor (2020).

As deformações plásticas na extremidade inferior, neste caso de compressão, não variaram de intensidade e valor máximo com a mudança da tensão confinante inicial, apenas com comportamento distinto para o lado cuja condição de contorno é fixa em  $y$  e em relação a parte em que há deslocamento nesse sentido. Portanto, para a extremidade inferior há maior concentração de deslocamentos na direção de  $x$  que resulta no pico de deformações aproximadamente nos 39 m da largura do maciço (comprimido), com região de transição das deformações bem definida antes e diminuição abrupta pós pico. Vale ressaltar que na região superior a variação na tensão confinante influenciou de maneira menos expressiva na região de transição pós pico, diminuindo a deformação plástica cisalhante com o aumento da tensão confinante e tornando a diferença do valor máximo e à distâncias próximas, após os 40 m de largura, ainda maior. Os Gráficos 36 a) e b) ilustram os comportamentos descritos com ênfase na região central onde ocorre variações expressivas.

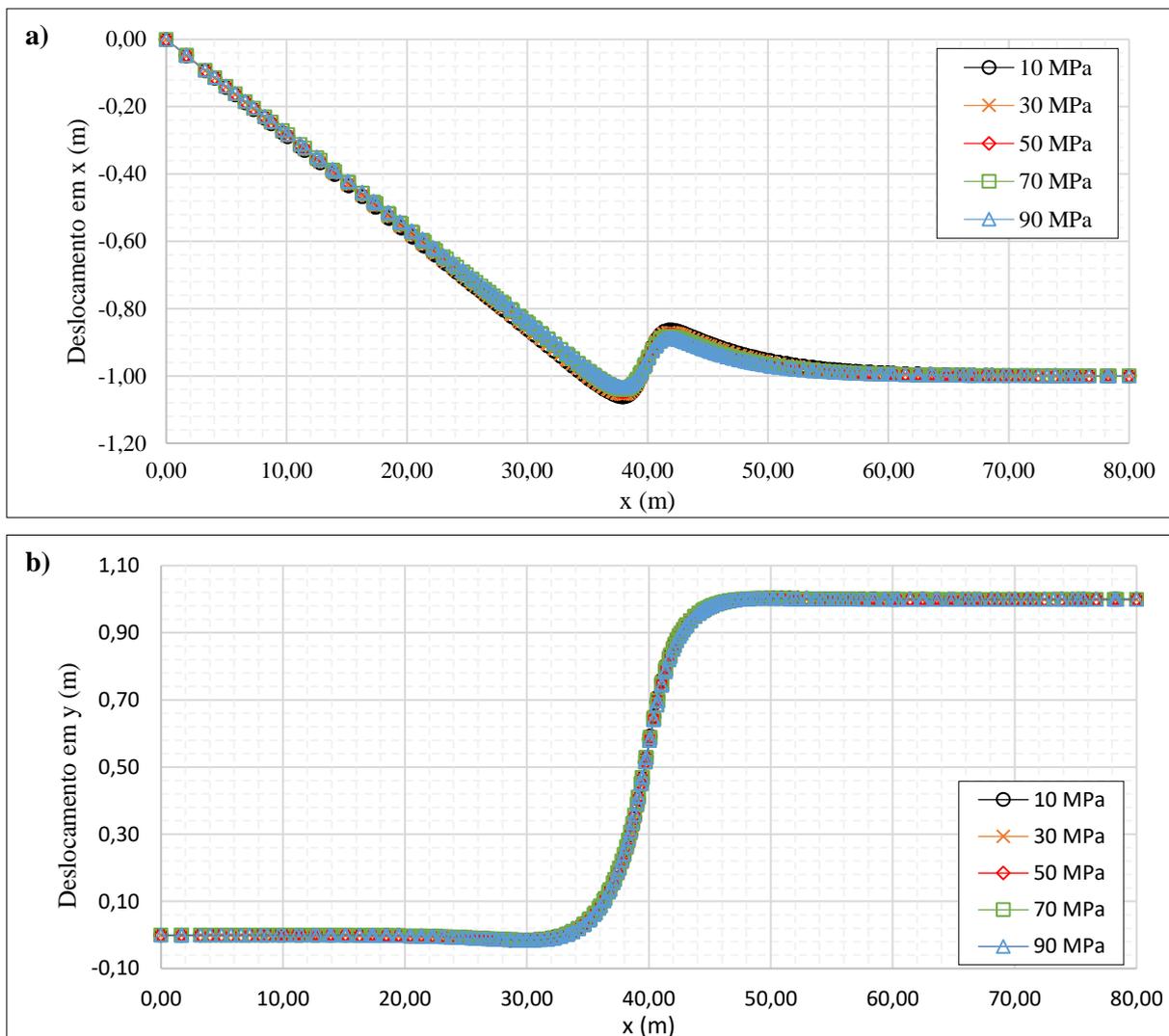
Gráfico 36 – Deformação plástica cisalhante nas extremidades no maciço em transpressão variando a tensão confinante: a) inferior; b) superior.



Fonte: O Autor (2020).

Os deslocamentos nos eixos  $x$  e  $y$  foram máximos em 1 metros pela imposição do deslocamento das condições de contorno. No entanto, para o caso dos deslocamentos no eixo  $x$  há uma região de transição e variação na região central do maciço que implica na influência do processo cisalhante nesses deslocamentos. Portanto, os Gráficos 37 a) e b) apresentam os deslocamentos nos eixos  $x$  e  $y$ , em metros na linha central do maciço, em que ressalta-se o comportamento de transição na região central para os dois casos em que não há influência expressiva da tensão confinantes nos valores máximos, nem mesmo no comportamento dos deslocamentos ao longo da largura do maciço, de 0 à 80 metros.

Gráfico 37 – Deslocamentos em relação a largura do maciço: a) deslocamentos no eixo x em metros; b) deslocamentos no eixo y em metros.



Fonte: O Autor (2020).

A porosidade na linha central em função da largura apresentou comportamento distinto para a região por conta das condições de contorno em relação ao eixo y. Por conta do regime de compressão e o impedimento de movimento da condição de contorno à direita ( $x=0$ ), a parte do maciço que apresenta restrição no deslocamento em y foi comprimido e resultou numa diminuição da porosidade de 0,200 até aproximadamente 0,170. No entanto, no intervalo entre 37,00 m e 43,00 m há uma grande variação da porosidade, dos valores mínimos nos extremos e um pico com valor máximo superior a porosidade inicial na região central e correspondendo a mudança da condição de contorno, seguido de uma zona de transição do segundo pico inferior de 0,184 até 0,200. Essa região com grande variação da porosidade corresponde a região em que há concentração das deformações plásticas no maciço, da mesma forma que o aumento da

porosidade em relação ao valor inicial na região central coincide com o máximo de deformações plásticas.

É possível identificar que mesmo a compressão diminuindo consideravelmente a porosidade em grande parte do maciço, como esperado para o regime compressional em uma rocha sedimentar com grande porosidade. No entanto, há a influência da dilatância da rocha na região central, com incremento das deformações principalmente pela componente da variação volumétrica que varia de acordo com esse parâmetro, resultante do cisalhamento, indicando um processo de degradação do material por cisalhamento como ocorre no núcleo das falhas. Mas, há uma um pico mínimo que antecede essa região com diminuição da porosidade até um mínimo que é uma característica recorrente ao aparecimento de bandas de deformação e antifratura em processos formadores de falhas transcorrentes no regime compressional em rochas sedimentares com valores de porosidade acima de 15% (FOSSEN *et al.*, 2018). Os Gráficos 38 a) e b) apresentam detalhadamente o comportamento da porosidade em relação a largura na região central, evidenciando o comportamento mínimo e máximo, como também a influência da tensão confinante no parâmetro, quanto maior a tensão confinante menor a variação da porosidade ao longo da largura do maciço na linha central.

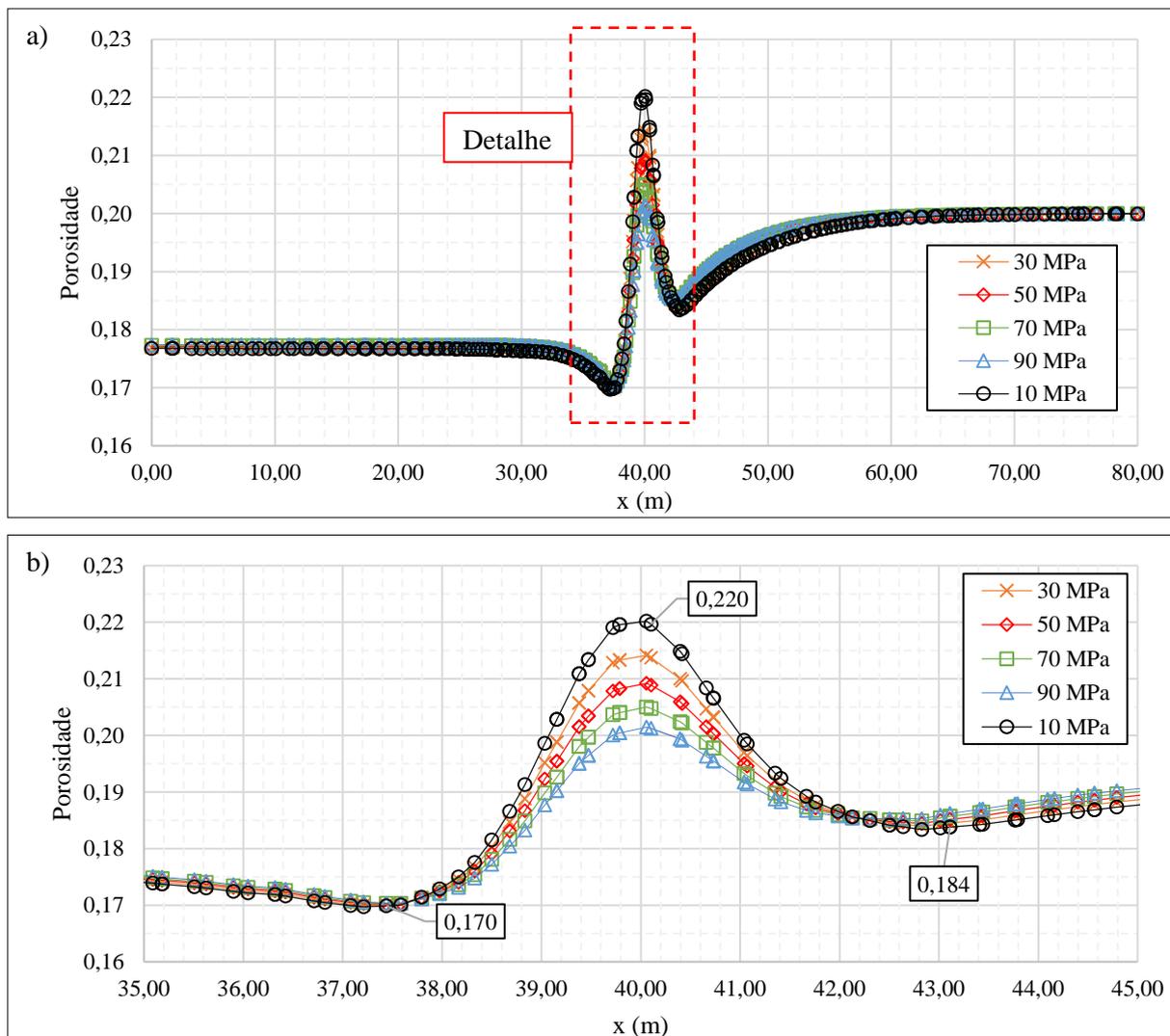
A Tabela 6 apresenta os valores máximos e mínimos da porosidade para cada tensão confinante imposta, evidenciando que pouco influenciou no valor mínimo. Em contrapartida, à medida que houve o incremento da tensão confinante o valor máximo diminuiu, em acordo com o comportamento da deformação plástica cisalhante que diminuiu à medida que houve o aumento da tensão confinante.

Tabela 6 – Porosidade máxima e mínima para o maciço em transpressão variando a tensão confinante.

Tensão confinante	Porosidade	
	Mín.	Máx.
<b>10 MPa</b>	0,1697	0,2202
<b>30 MPa</b>	0,1700	0,2141
<b>50 MPa</b>	0,1702	0,2092
<b>70 MPa</b>	0,1703	0,2050
<b>90 MPa</b>	0,1703	0,2014

Fonte: O Autor (2020).

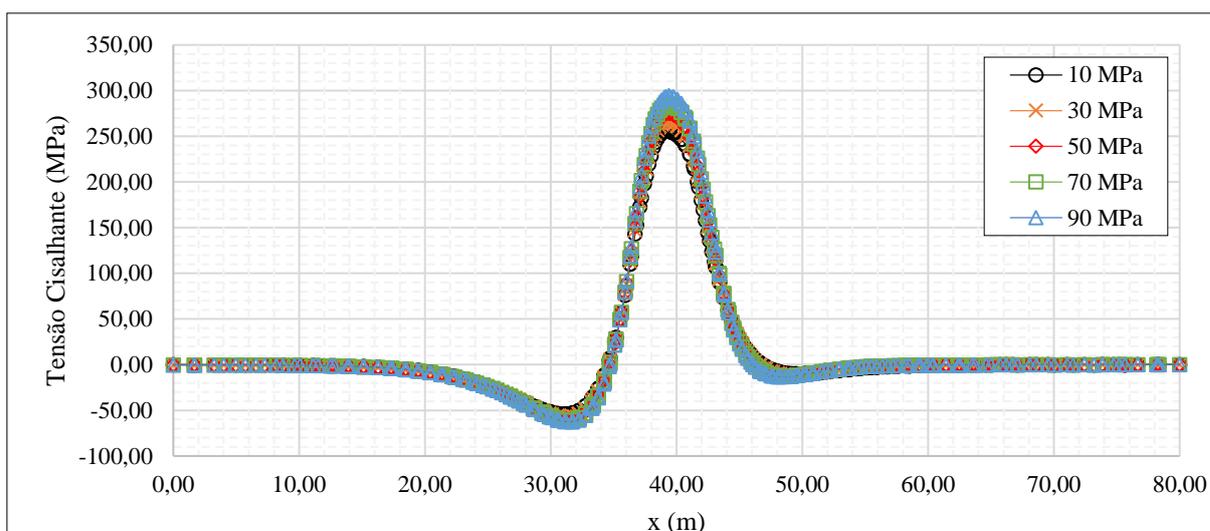
Gráfico 38 – Distribuição da porosidade na linha central do maciço em transpressão variando a tensão confinante: a) largura completa do maciço; b) detalhe para região central de 35 à 45 m.



Fonte: O Autor (2020).

As tensões cisalhantes na linha central em função da largura do maciço apresentaram comportamento similar, mesmo variando em cada simulação a tensão confinante, Gráfico 39. Houve um incremento dos valores máximos de acordo com o aumento da tensão confinante cerca de 3% de uma simulação para outra, ou seja, para um incremento de 20 MPa na tensão confinante a tensão cisalhante máxima aumentou em relação à anterior entre 3 e 4%. As tensões cisalhantes mínimas, representativo máximo em sentido oposto, aumentaram em módulo com o aumento da tensão confinante, no entanto o percentual de crescimento em relação à anterior foi diminuindo. A Tabela 7 apresenta os valores máximos e mínimos das tensões cisalhantes, bem como o percentual de aumento relativo para cada caso com a variação de tensão confinante.

Gráfico 39 – Distribuição da tensão cisalhante em transpressão variando a tensão confinante.



Fonte: O Autor (2020).

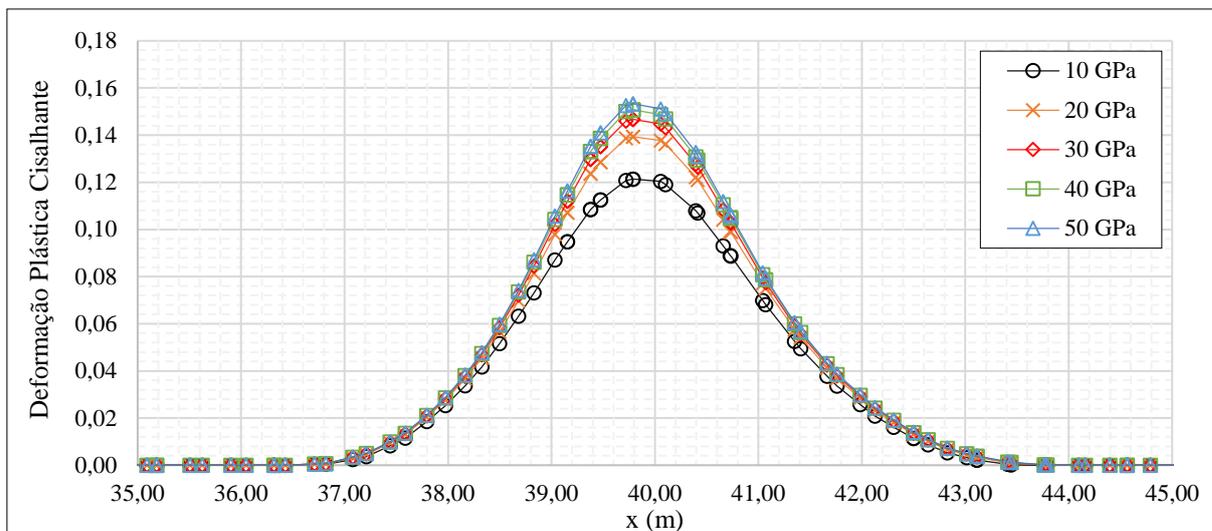
Tabela 7 – Tensão cisalhante máxima e mínima para maciço em transpressão variando a tensão confinante.

Tensão confinante	Tensão cisalhante			
	Mín.	Aumento relativo do valor mínimo	Máx.	Aumento relativo do valor máximo
10 MPa	-53,81 MPa	-	255,91 MPa	-
30 MPa	-56,97 MPa	5,87%	265,94 MPa	3,92%
50 MPa	-59,10 MPa	3,74%	275,64 MPa	3,65%
70 MPa	-60,76 MPa	2,81%	285,11 MPa	3,44%
90 MPa	-62,25 MPa	2,45%	294,35 MPa	3,24%

Fonte: O Autor (2020).

Complementando as análises em transpressão, foram simulados para uma mesma tensão confinante de 50 MPa casos com diferentes módulos de elasticidade, de 10 à 50 GPa, e mantidas as condições de contorno. As deformações plásticas variaram de intensidade máxima para cada caso permanecendo os valores entre 0,12 e 0,16. A largura da plastificação para essa linha central de análise não apresentou variações significativas em função do módulo de elasticidade do material em transpressão. O Gráfico 40 apresenta a distribuição das deformações plásticas ao longo da largura do maciço e a influência na mudança do módulo de elasticidade.

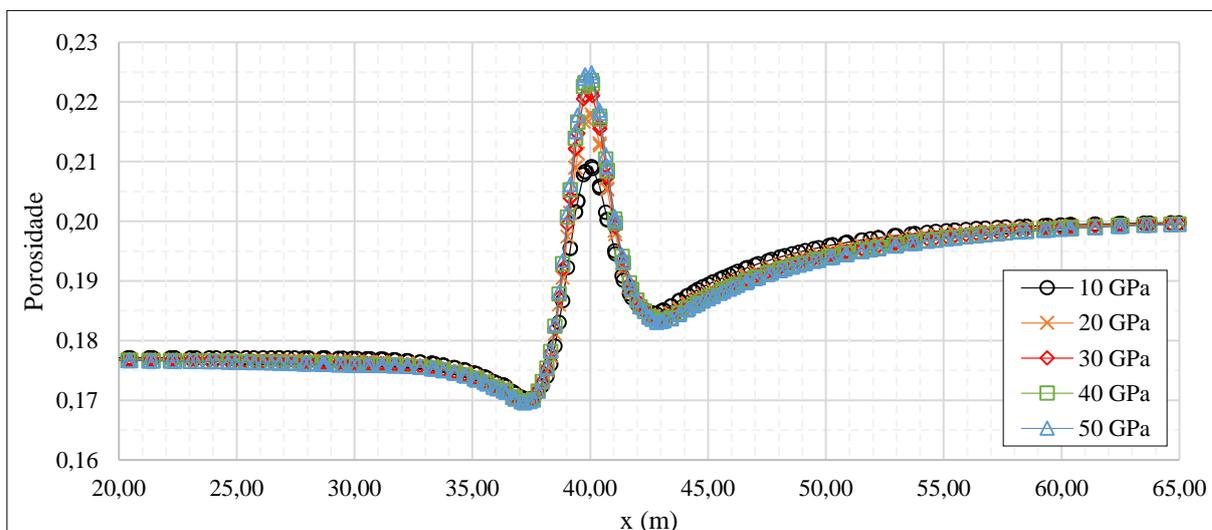
Gráfico 40 – Deformação plástica cisalhante na linha central para maciço em transpressão variando a módulo de elasticidade.



Fonte: O Autor (2020).

A porosidade no maciço variou de maneira análoga aos casos com variação da tensão confinante, nesse caso as curvas foram coincidentes em posição e em intensidade em grande parte do maciço exceto nos máximos que variou de maneira mais expressiva apenas do caso com 20 GPa em relação à simulação com 10 GPa, um aumento de aproximadamente 4 %. Portanto, a variação do módulo de elasticidade pouco influenciou na variação da porosidade a não ser entre 10 e 20 GPa. O Gráfico 41 e a Tabela 8 ilustram e apresentam o comportamento descrito, bem como os valores máximos e mínimos para cada simulação.

Gráfico 41 – Distribuição da porosidade na linha central para maciço em transpressão variando a módulo de elasticidade.



Fonte: O Autor (2020).

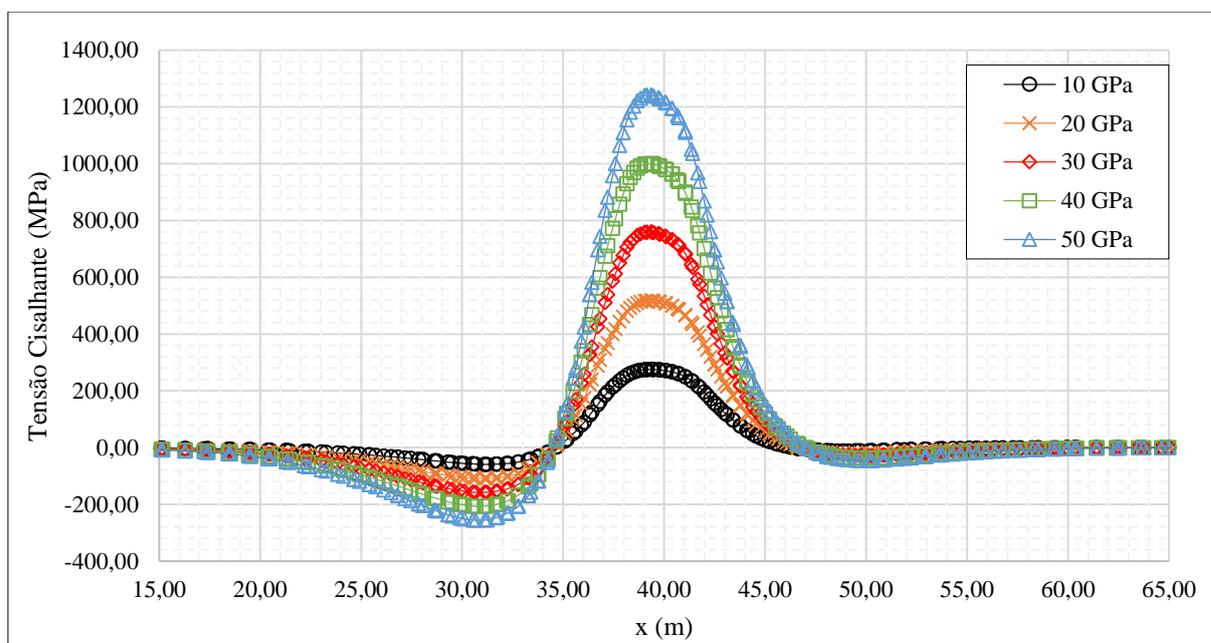
Tabela 8 – Variação da porosidade para maciço em transpressão variando a módulo de elasticidade.

Módulo de Elasticidade	Porosidade	
	Mín.	Máx.
10 GPa	0,1702	0,2092
20 GPa	0,1699	0,2179
30 GPa	0,1697	0,2216
40 GPa	0,1696	0,2236
50 GPa	0,1696	0,2249

Fonte: O Autor (2020).

Em contrapartida ao comportamento da porosidade, as tensões cisalhantes variaram expressivamente com o aumento do módulo de elasticidade do material. Como esse parâmetro está intrinsicamente ligado às deformações sofridas pelo material e a tensão aplicada, com o aumento houve um crescimento nas tensões cisalhantes, principalmente na região central do maciço, Gráfico 42. Por conta do processo de compressão pela imposição de deslocamento as tensões aumentaram consideravelmente durante todo o processo de cisalhamento ao qual o maciço foi exposto. Portanto, as tensões cisalhantes nos dois sentidos aumentaram com o incremento no módulo de elasticidade a valores máximos de 1231,246 MPa para um módulo de rigidez de 50 GPa.

Gráfico 42 – Variação da tensão cisalhante para transpressão variando o módulo de elasticidade.



Fonte: O Autor (2020).

Os deslocamentos nos eixos  $x$  e  $y$  variando o módulo de elasticidade apresentaram resultados análogos aos apresentados no Gráfico 37, visto que as simulações apresentaram mesma condição de contorno e deslocamento final.

## 5.2 FORMAÇÃO DE ZONA DE FALHA EM REGIME NORMAL

No segundo momento foram simulados casos associados à formação de zonas de falha em regime normal. Em que a tensão principal máxima corresponde a tensão vertical, classificação de Anderson (1951), em que o movimento da falha ocorre no sentido do mergulho do plano de falha, *hanging wall* desce em relação ao *footwall*. A Figura 41 apresenta um exemplo de ocorrência de duas falhas normais, com sentidos opostos da Formação Barreiras (SE) em arenito.

Figura 41 – Falhas normais com sentidos opostos, ângulo de mergulho semelhante. Arenito da Formação Barreiras (SE)

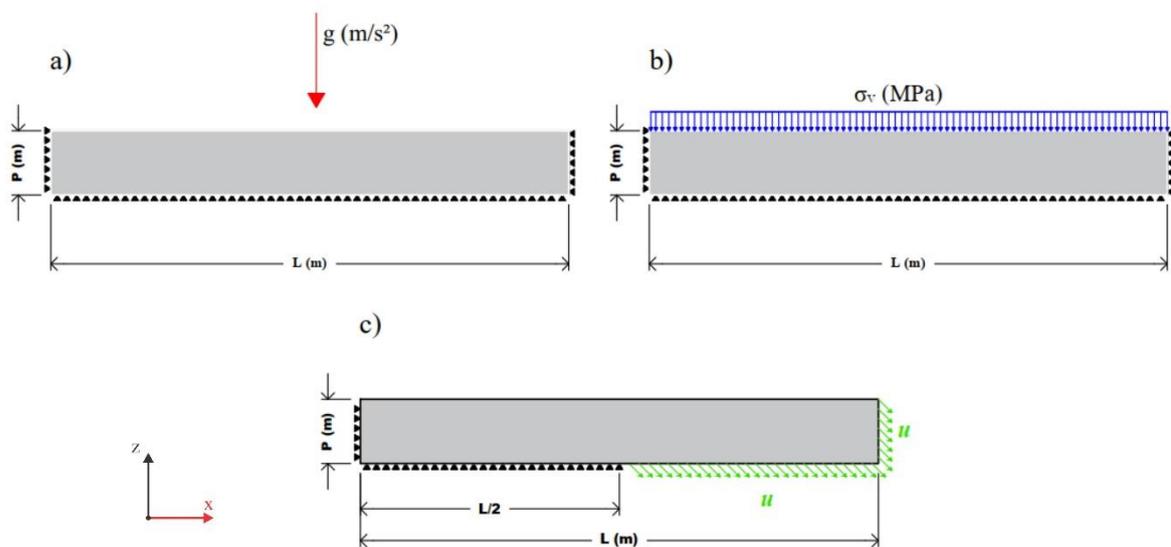


Fonte: Silva (2018).

Diferente do regime transcorrente que apresenta uma vista em planta do problema, nos casos em regime normal o problema bidimensional corresponde a uma seção de um maciço tridimensional em que a área da seção está no plano dos eixos  $x$  e  $z$ , e a profundidade  $z$  não será analisada. Portanto, a Figura 42 apresenta as condições de contorno das duas etapas das simulações, a primeira correspondente às tensões geostáticas do problema, no segundo a

imposição de tensão vertical ( $\sigma_V$ ), de acordo com a classificação andersoniana para falhas normais deve coincidir com a tensão principal máxima, que corresponde ao peso de camadas rochosas superiores e por fim, mantendo o estado de tensões impostos, a terceira etapa que consiste na imposição da condição cinemática para a formação em regime normal consistindo de um deslocamento equivalente (ANASTASOPOULOS *et al.*, 2007; CHILDS *et al.*, 2009).

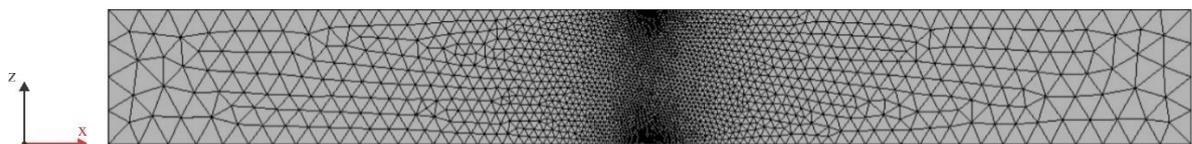
Figura 42 – Condições de contorno da formação de zona de falha em regime normal: a) geostático, cálculo das tensões provenientes do peso próprio do solo pela aceleração da gravidade ( $g$ ) em  $m/s^2$ ; b) aplicação de uma tensão vertical ( $\sigma_V$ ) em MPa; c) imposição dos deslocamentos ( $u$ ) em metros formando um ângulo de  $45^\circ$  com a horizontal.



Fonte: O Autor (2020).

A geometria do maciço consistiu de  $L=80$  m e  $P=10$  m. A taxa máxima de deslocamento imposta foi de 1 mm/min, baseado no estudo experimental em escala métrica de Xu *et al.* (2018). A malha foi discretizada com elementos 2421 nós e 4632 elementos triangulares, com tamanho mínimo dos elementos de 10 cm na região central, Figura 43. Os parâmetros do material correspondem a um arenito conforme apresentado na Tabela 1, com o acréscimo da densidade ( $\rho$ ) equivalente  $2.700$   $g/cm^3$ .

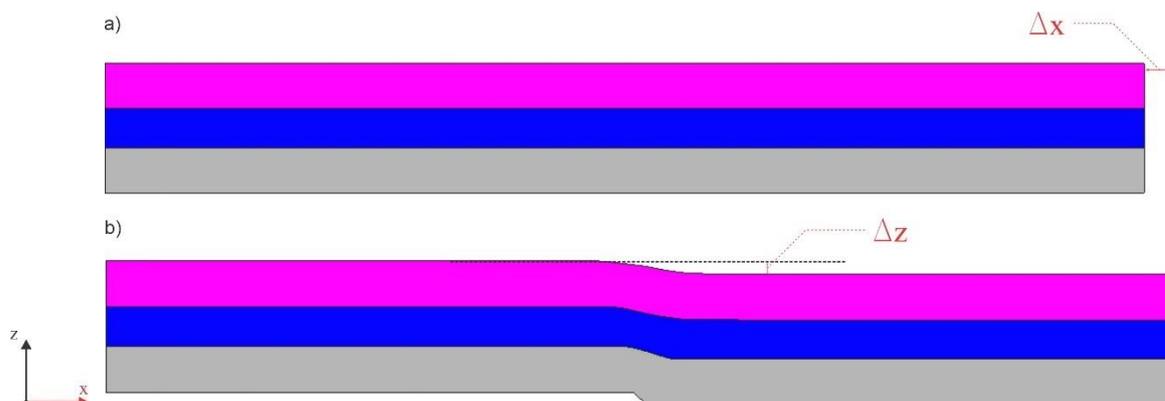
Figura 43 – Geometria do maciço utilizado nas simulações da formação de zona de falha em regime normal discretizado em elementos triangulares.



Fonte: O Autor (2020).

A Figura 44 apresenta o maciço com marcadores cinemáticos indeformado e, posteriormente, deformado e com deslocamentos máximo em  $x$  e  $z$  iguais à 1 m, em cada eixo, performando um deslocamento total de 1,417 m e ângulo de  $45^\circ$  com a horizontal.

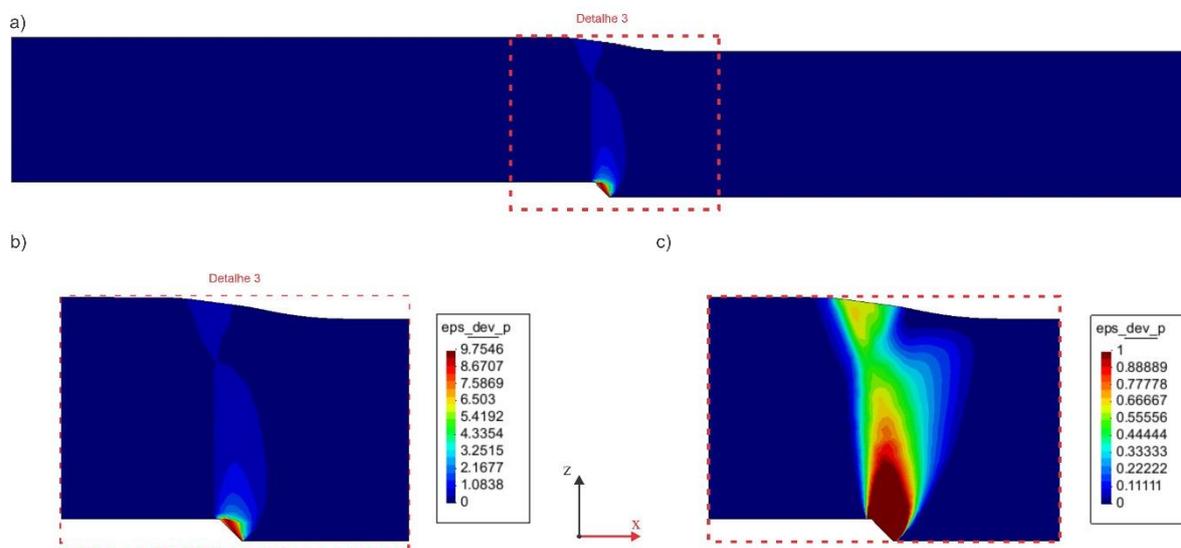
Figura 44 – Maciço com marcador cinemático e diferentes estágios de deformação: a) indeformado; b) maciço deformado em que  $\Delta x$  e  $\Delta z$  correspondem aos deslocamentos totais em metros.



Fonte: O Autor (2020).

No primeiro momento foi simulado o maciço com características descritas e submetido a uma tensão vertical de 10 MPa e deslocamentos totais de 1,417 m. Assim, analisando o comportamento das deformações plásticas é possível verificar o acúmulo de deformações plásticas na região central do maciço, principalmente na região inferior onde há a mudança de condição de contorno estática para movimento na direção  $z$ , propagando até a parte superior do maciço livre para os deslocamento em  $x$  e  $z$ , apenas submetida ao carregamento imposto pela tensão vertical. A Figura 45 apresenta o comportamento das deformações plásticas cisalhantes no maciço após submetido ao regime cinemático, implicando em maior concentração na região central inferior, caracterizando a degradação do material e formação de estruturas secundárias associadas a formação da falha, além de evidenciar o mergulho da falha à  $45^\circ$ , em acordo com a direção do movimento da parcela que se movimenta no problema.

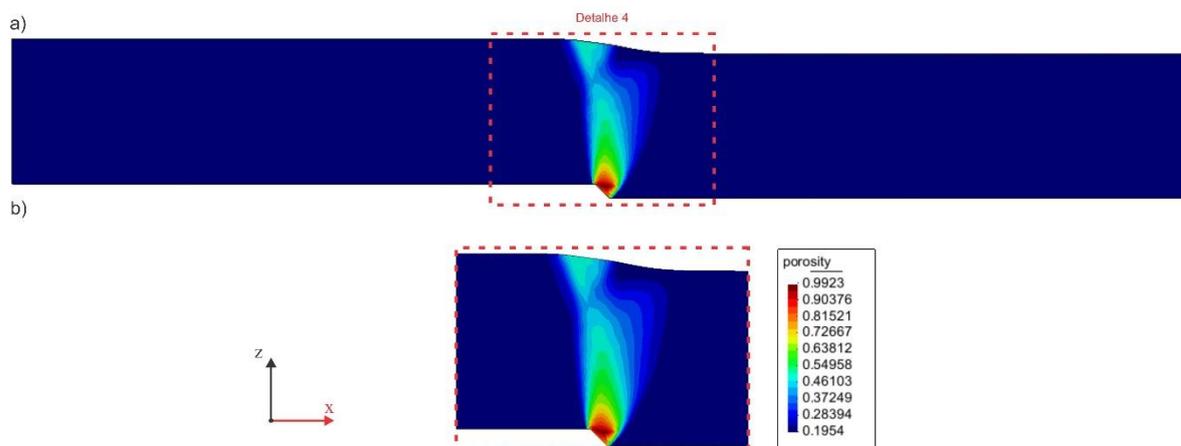
Figura 45 – Deformações plásticas no maciço ao final da simulação: a) representação das deformações plásticas no maciço como um todo; b) detalhe 3; c) detalhe 3 com ajuste na legenda limitando os valores maiores a um com mesma cor.



Fonte: O Autor (2020).

Acompanhando o comportamento das deformações plásticas, a porosidade apresentou comportamento similar com concentração da variação na região central iniciando na extremidade inferior até a parte superior com inclinação à esquerda. Similar aos casos da seção 5.1, aqui também foi utilizado plasticidade associada o que superestimou as deformações volumétricas pela consideração do ângulo de dilatação igual ao ângulo de atrito. A Figura 46 apresenta a distribuição da porosidade em todo maciço e com detalhe na região central onde ocorre o maior aumento da porosidade. Vale ressaltar, o valor máximo apresentado 0,9923 que indica que os elementos são compostos praticamente apenas por espaços vazios o que implicaria na degradação do material e formação de fraturas do modo I. Além disso, o incremento da porosidade associado ao incremento da deformação plástica cisalhante contempla o entendimento de falhas formadas em rochas sedimentares em que há a formação do núcleo de falha e estruturas de bandas de deformação aglomeradas, em que as bandas de cisalhamentos que podem ser formadas caracteriza a ocorrência de cataclase e o aumento da porosidade repercute diretamente no aumento da permeabilidade do maciço (FOSSSEN *et al.*, 2018).

Figura 46 – Variação da porosidade na formação de zona de dano em regime normal: a) porosidade no maciço; b) detalhe 4 na região central do maciço cuja aumento da porosidade é expressivo.

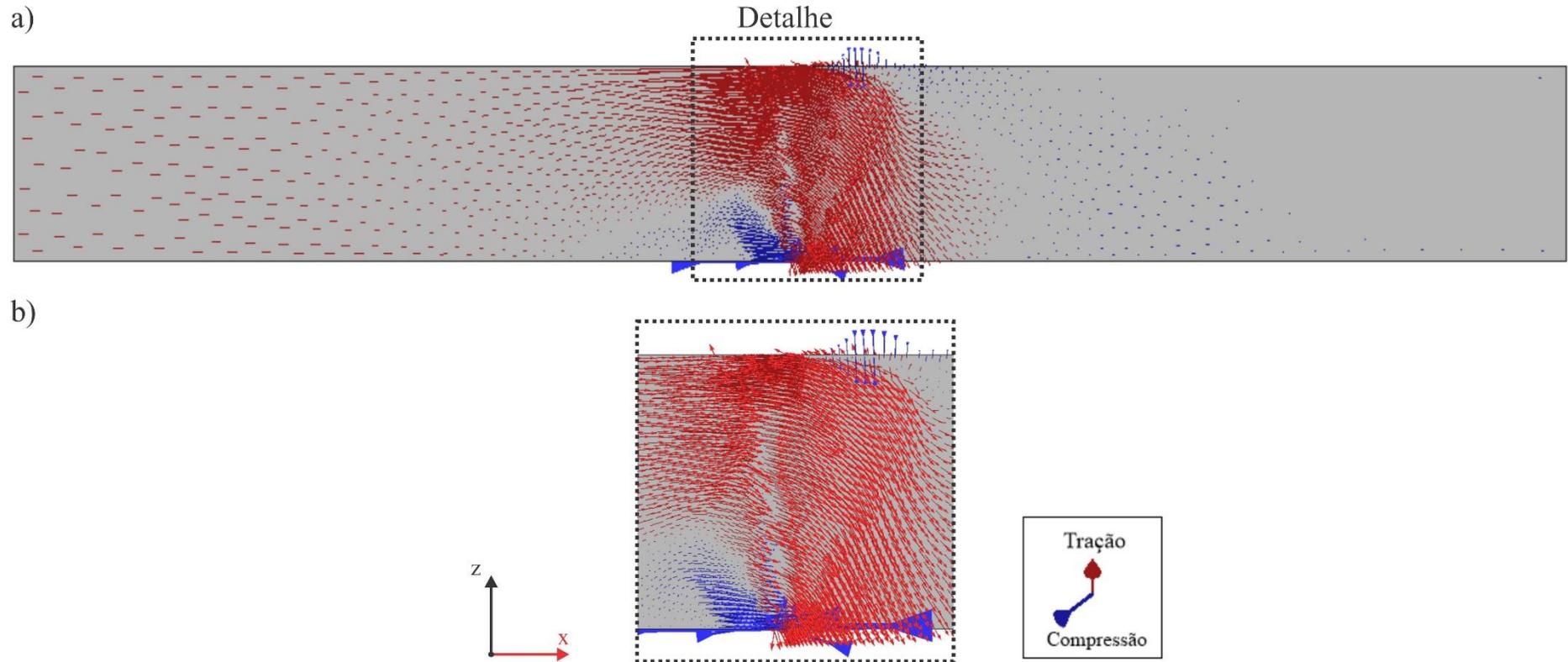


Fonte: O Autor (2020).

As tensões no maciço variaram em decorrência ao estado inicial de tensão vertical, em que as tensões em  $z$  são maiores que em  $x$  (proveniente da relação das tensões em  $z$  com o coeficiente de Poisson), e às condições de contorno impostas que tendem a tracionar o maciço. Nesse caso, para a manutenção da condição de equilíbrio do maciço as tensões internas são dispostas por tensões de compressão que contrapõe a tração causada pela condição de contorno. A Figura 47 ilustra a distribuição das tensões principais mínimas com tamanho em função da intensidade da tensão, fator de escala 0,1, com evidente concentração desses esforços a tração na região central na direção da cinemática formadora. Em contrapartida para as tensões máximas, Figura 48, evidenciam a predominância de esforços a compressão na região central do maciço, mesmo fator de escala que a figura anterior, e apresentando comportamento distinto do acumulo de tensões se comparados às formações no regime transcorrente e oblíquos, nesse caso com tração reduzida apenas próximo à mudança de condição de contorno.

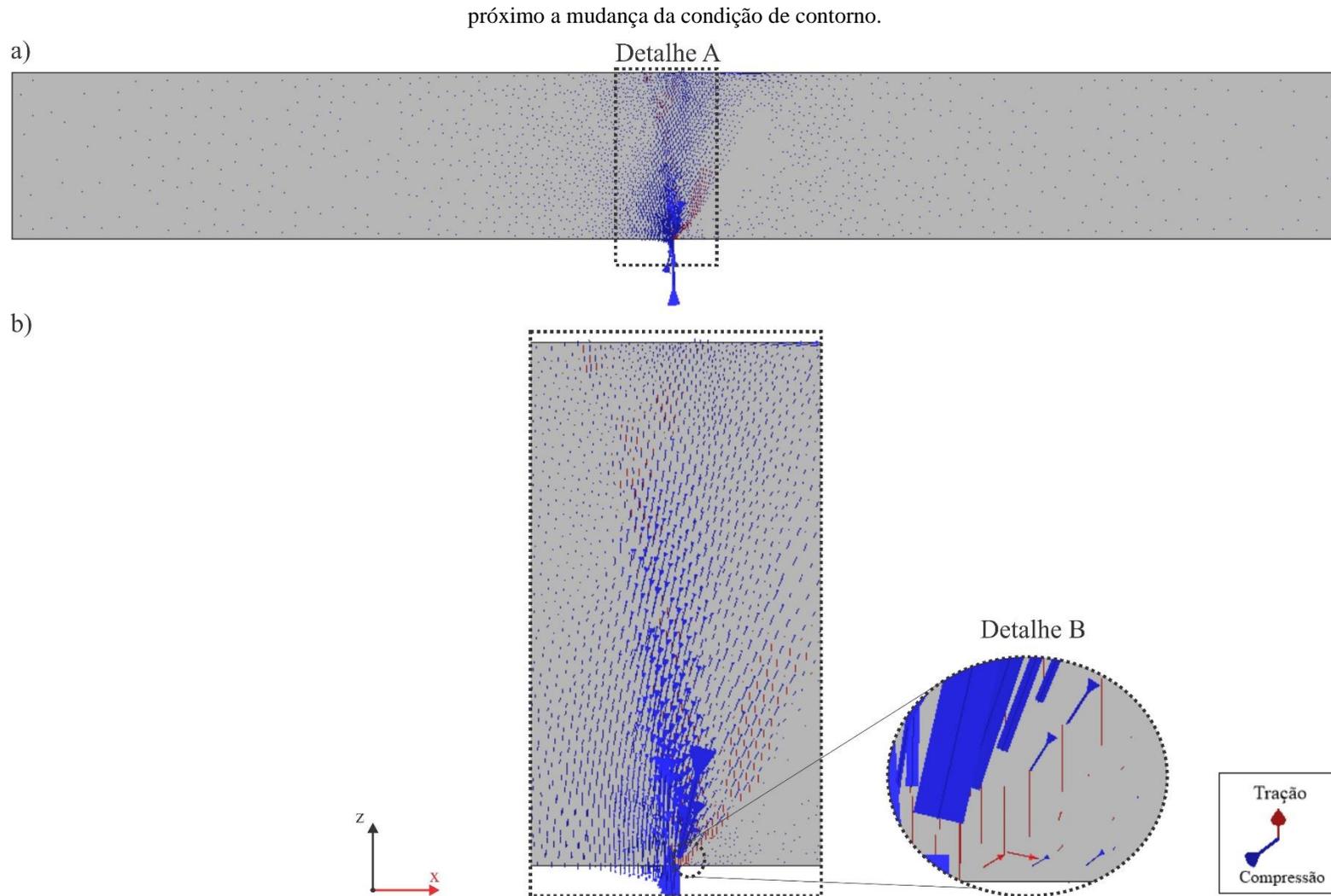
Ainda a respeito das tensões, os gráficos em contorno preenchido na Figura 49 apresenta as tensões principais mínimas e máximas para o caso com tensão vertical de 10 MPa em que fica evidente para os dois casos, a) e b), da imagem o esforço positivo em tração 17,22 MPa. Esse comportamento decorre da utilização da plasticidade perfeita e, neste caso, ao atingir a tensão máxima a tração permaneceu deformando. Outro ponto que merece destaque é que, conforme apresentado imagem anterior, na região central há transição entre tração e compressão.

Figura 47 – Representação das tensões principais mínimas para um fator de escala de 0,1 no maciço ao final da simulação para formação de zona de dano em regime normal, em que as setas em azul indicam compressão, em vermelho tração e o tamanho intensidade: a) maciço total; b) detalhe na central do maciço.



Fonte: O Autor (2020).

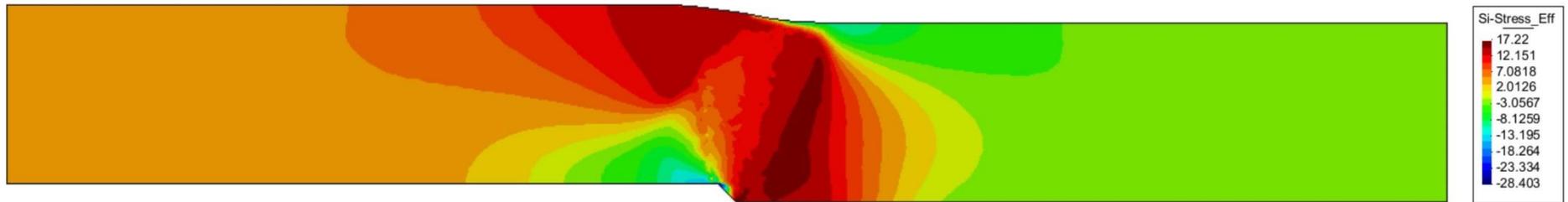
Figura 48 – Representação das tensões principais máximas para um fator de escala de 0,1 no maciço ao final da simulação para formação de zona de dano em regime normal, em que as setas em azul indicam compressão, em vermelho tração e o tamanho intensidade: a) maciço total; b) detalhe A na central do maciço, e detalhe B na região inferior



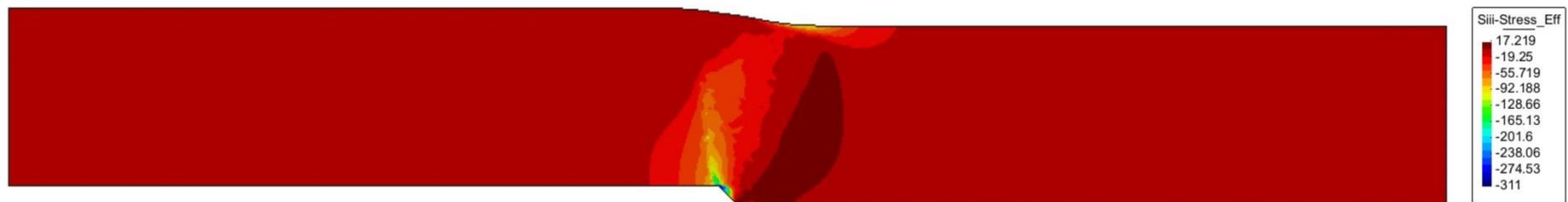
Fonte: O Autor (2020).

Figura 49 – Tensões principais da formação de zona de dano em regime normal: a) tensão principal menor em MPa; b) tensão principal maior em MPa.

a)



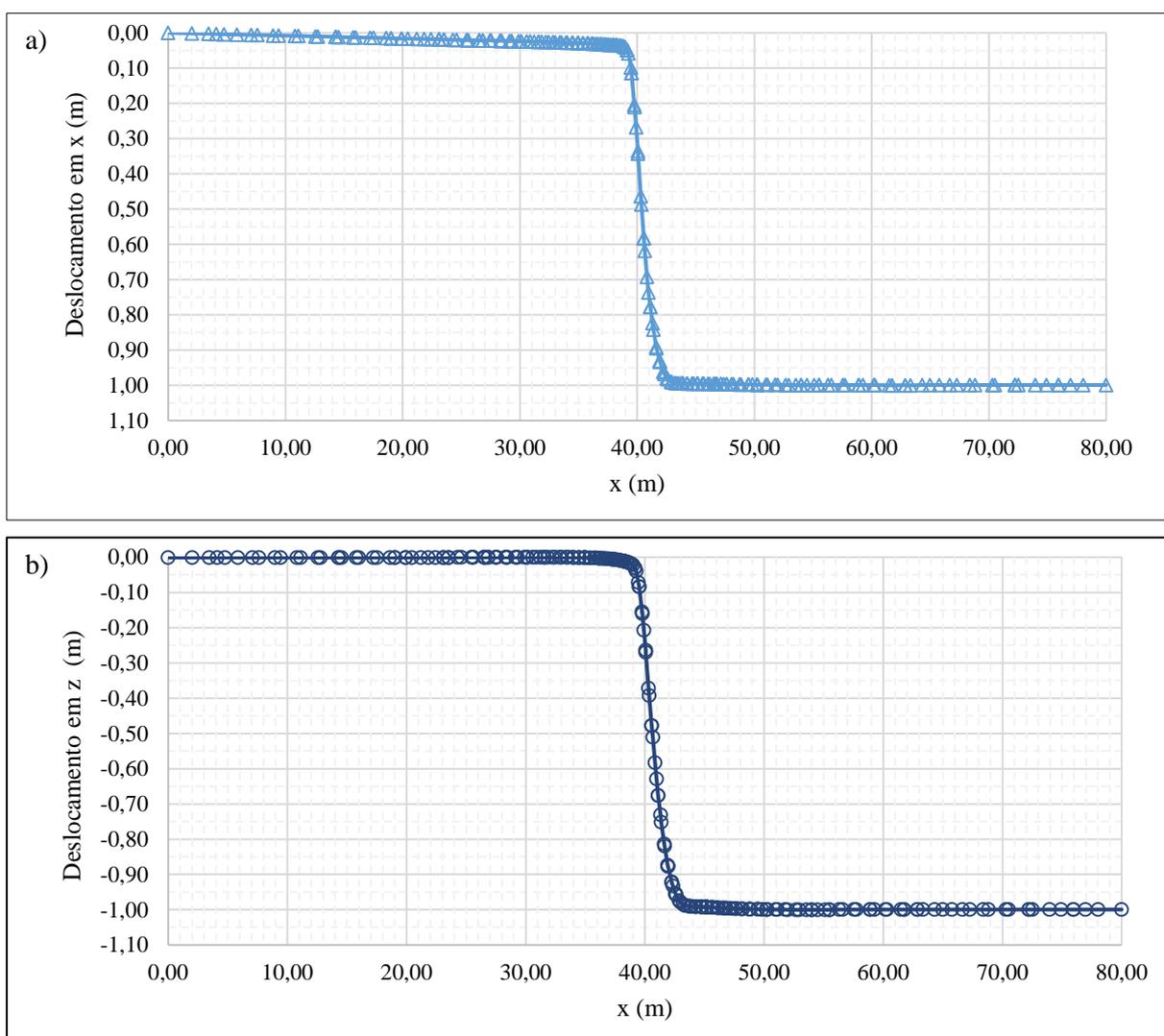
b)



Fonte: O Autor (2020).

Os Gráficos 43 a) e b) apresentam os deslocamentos nas direções dos eixos  $x$  e  $z$ , com valor máximo de 1 m para cada caso, na linha central em função da largura do maciço. A característica de distinção entre às partes que se desloca e permanece estático é análogo a movimentação de estruturas rúpteis, que remete nesse caso a falhas normais, cujos blocos apresentam comportamento de *footwall* e *hanging wall*. O comportamento descrito pode ser visualizado também na Figura 50, em que fica nítido a região de transição e o processo do aumento da largura da zona de transição da extremidade inferior até o a parte superior.

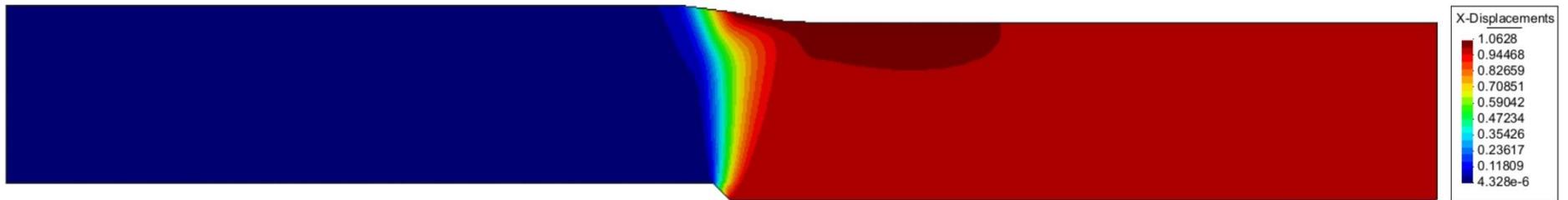
Gráfico 43 – Deslocamentos na formação de zona de dano em regime normal: a) deslocamentos em  $x$  em função da largura em metros; b) deslocamentos em  $y$  em função da largura em metros.



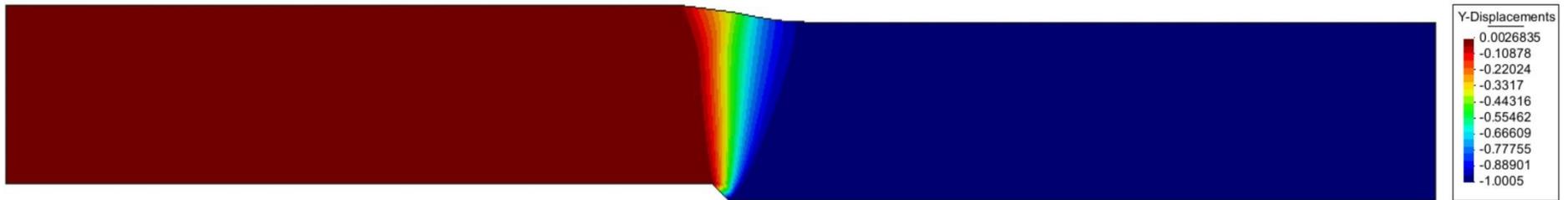
Fonte: O Autor (2020).

Figura 50 – Deslocamentos máximos no processo de formação de zona de dano em regime normal: a) deslocamentos na direção do eixo x em metros; b) deslocamentos na direção do eixo z em metros; c) deslocamentos equivalente em metros.

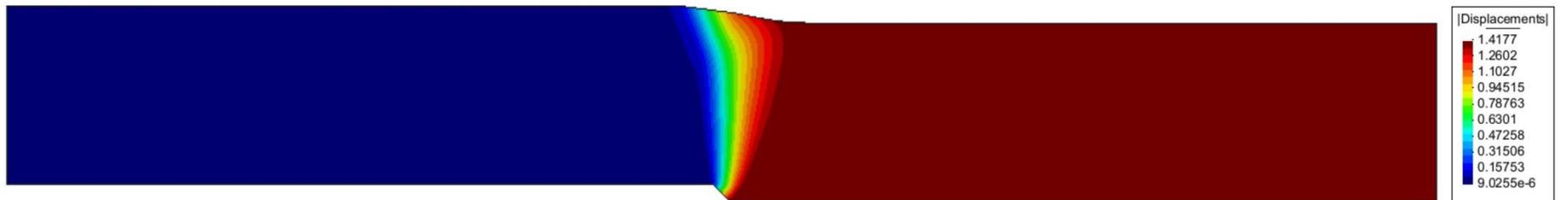
a)



b)



c)



Fonte: O Autor (2020).

### 5.2.1 Influência da Tensão Vertical

A tensão vertical aplicada sobre o maciço, após o a etapa de geostático, tem como função principal impor um estado tensional à seção do maciço em análise com o intuito de simular uma determinada profundidade, a depender do peso específico do material presente nas camadas superiores. Neste caso, foram simulados cinco casos com as mesmas condições de contorno para a formação de zona de dano em regime normal com a variação da tensão vertical para os seguintes valores: 10 MPa; 20 MPa; 30 MPa; 40 MPa e 50 MPa.

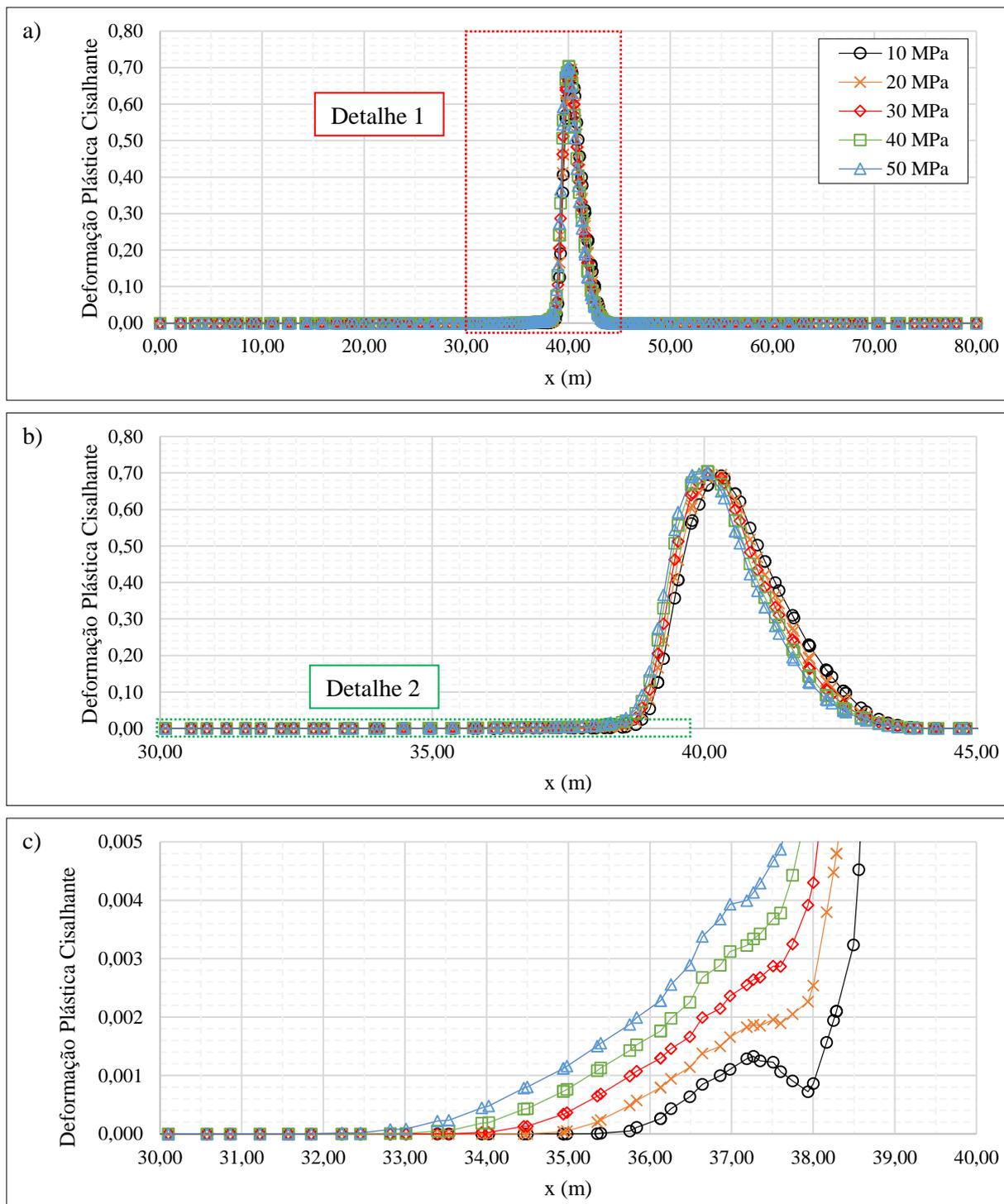
A primeira análise realizada consiste na avaliação das deformações plásticas com a variação das tensões uniaxiais. O Gráfico 44 a) apresenta as deformações plásticas em função da largura do maciço para as tensões uniaxiais prescritas. Fica evidente que os valores máximos não foram alterados por conta da mudança da tensão, permanecendo entre 0,69 e 0,71, Tabela 9. No primeiro detalhe, Gráfico 44 b), que restringe a largura do maciço entre 30 e 45 m, justamente por ser o intervalo com variações na deformação, percebe-se que com o aumento da tensão vertical houve um aumento da espessura da zona de dano (caracterizada pela plastificação) e que o pico máximo foi gradativamente deslocado para a esquerda. O detalhe 2, Gráfico 44 c), restringe o eixo das deformações para valores entre 0 e 0,005 para justificar o aumento da espessura da zona de dano e evidenciar a diferença para cada tensão aplicada no processo de propagação da plastificação no maciço.

Tabela 9 – Deformações máximas para cada tensão vertical aplicada na formação de zona de dano em regime normal.

<b>Tensão vertical</b>	<b>Deformação plástica cisalhante máxima</b>
<b>10 MPa</b>	0,6924
<b>20 MPa</b>	0,6950
<b>30 MPa</b>	0,7004
<b>40 MPa</b>	0,7046
<b>50 MPa</b>	0,7029

Fonte: O Autor (2020).

Gráfico 44 – Deformações plásticas para formação de zona de dano em regime normal na linha central em função da largura: a) para todo o maciço; b) detalhe 1; c) detalhe 2.

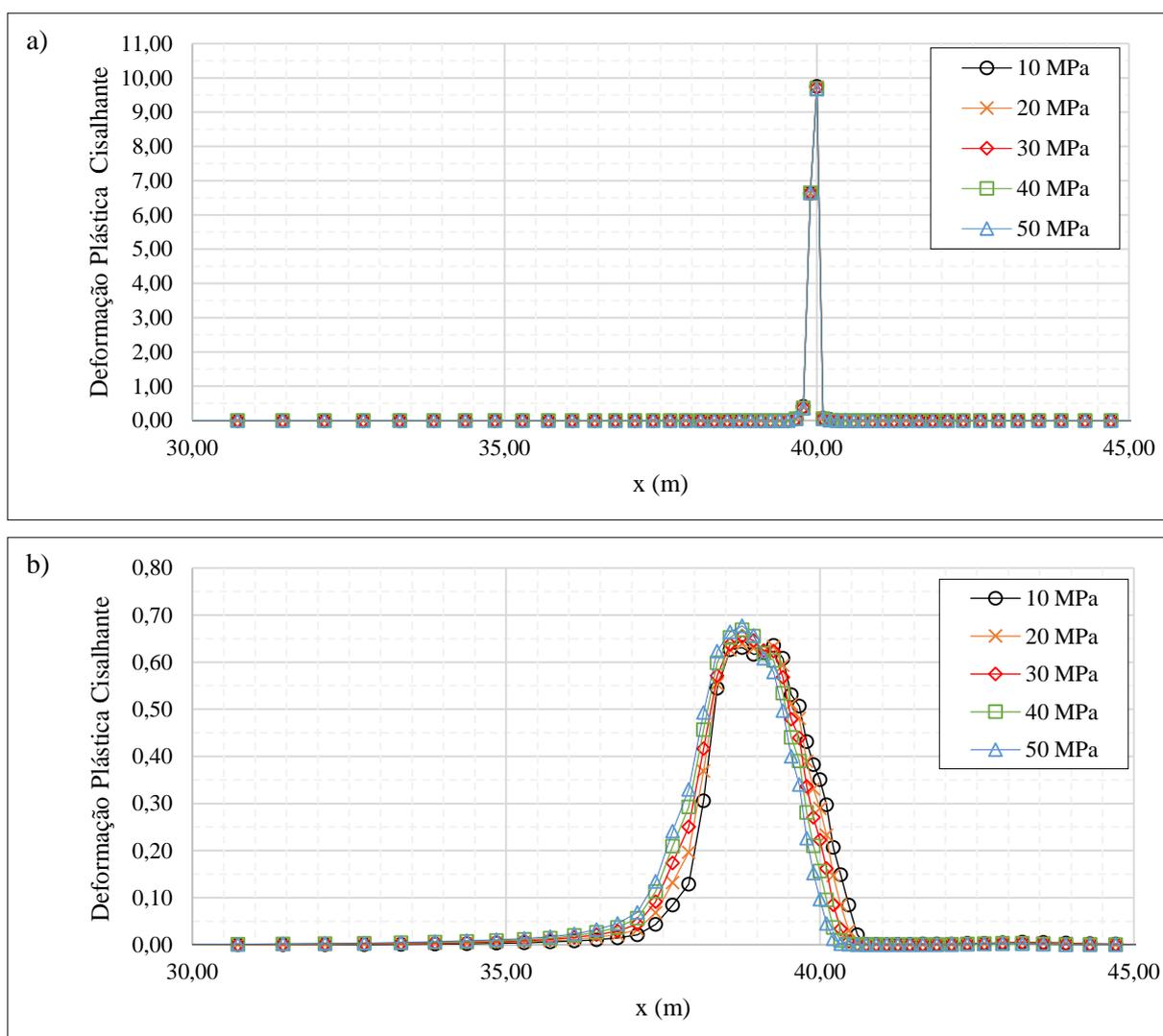


Fonte: O Autor (2020).

As deformações plásticas nas extremidades inferior e superior apresentaram características distintas. Na linha inferior o pico de deformação máxima bem acentuado na mudança da condição de contorno de restrição do movimento em relação ao eixo  $z$  e próximo à largura de 40 m. Por outro lado, na linha superior há uma região maior de plastificação,

espalhando para ambos os lados do pico e, nesse caso, a tensão vertical influência no posicionamento da curva, quanto maior mais à esquerda. Os Gráficos 45 a) e b) apresentam as considerações quando a deformação plástica cisalhante na extremidade inferior e superior do maciço em função da largura, para a região central entre 30 e 45 m, onde já foi constatado haver variação das deformações plásticas.

Gráfico 45 – Deformações na formação de zona de dano em regime normal em relação a largura: a) linha inferior; b) linha superior.

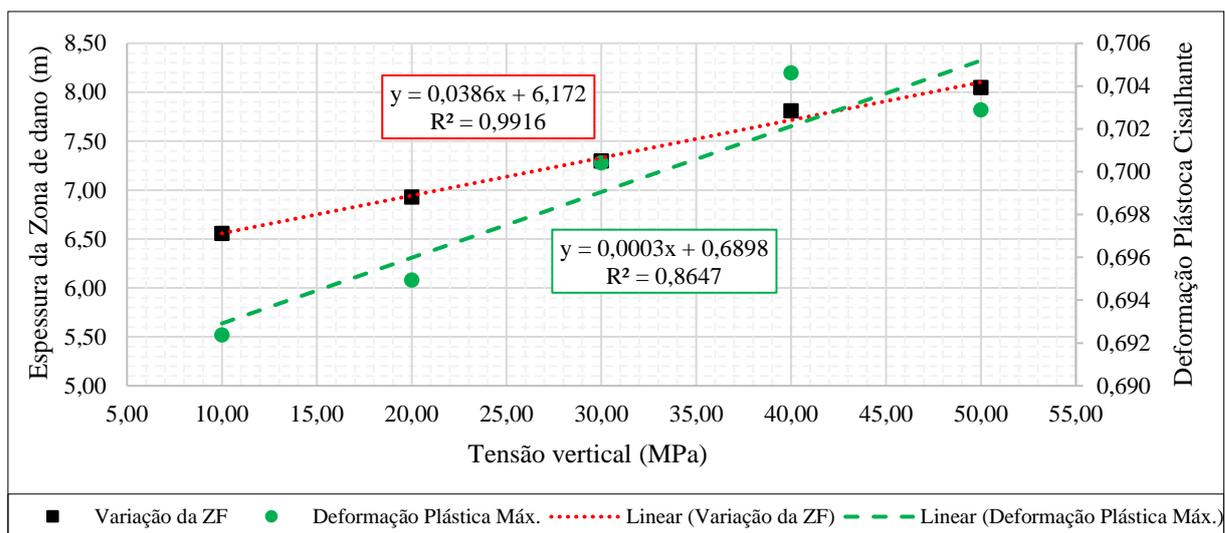


Fonte: O Autor (2020).

Dos dados de deformação plástica cisalhante é possível relacionar a espessura da zona de dano e as deformações plásticas máximas na linha central do maciço com a tensão vertical aplicada. O Gráfico 46 apresenta a espessura da zona de dano em metros e a deformação plástica cisalhante máxima ambas em função da tensão vertical, a primeira no eixo principal e segunda no eixo secundário. É possível relacionar o aumento da largura zona de dano formada em função

da tensão vertical visto que foi estabelecido uma linha de tendência com coeficiente de correlação,  $R^2 = 0,9916$ . Da mesma forma que para o eixo secundário há a correlação da tensão máxima com o aumento da tensão vertical com coeficiente de correlação,  $R^2 = 0,8647$ .

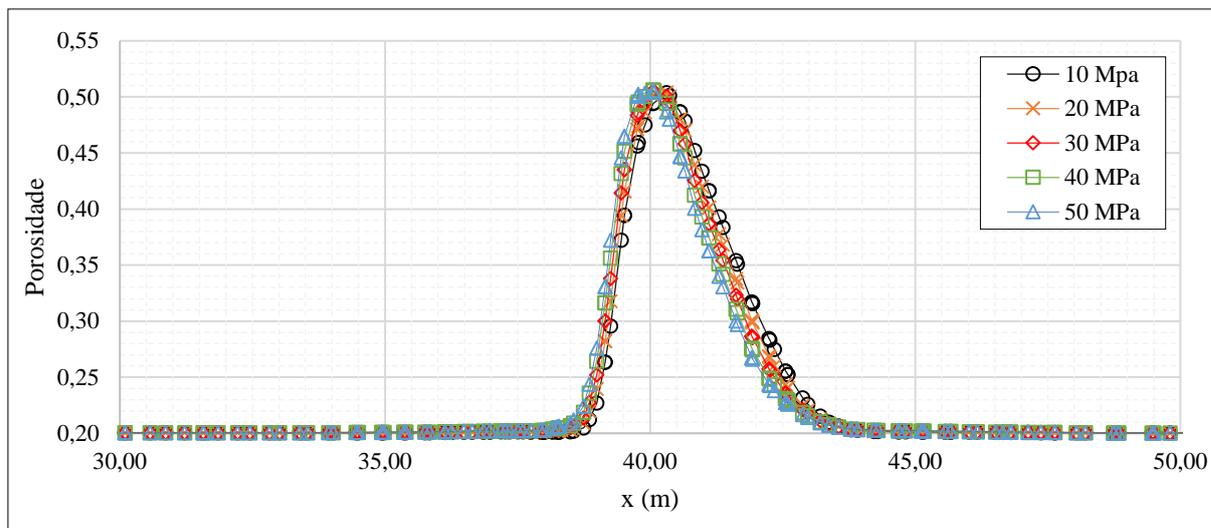
Gráfico 46 – Espessura da zona de dano em função da tensão vertical e deformações plásticas máximas em função da tensão vertical no eixo secundário.



Fonte: O Autor (2020).

A variação da tensão vertical imposta não influenciou nos valores máximos da porosidade no meio do maciço, Gráfico 47. No entanto, da mesma forma que ocorreu para a plasticidade com o aumento da tensão aplicada a curva de porosidade na região a esquerda deslocava mais para esquerda. Vale ressaltar que do pico para a esquerda a redução é consideravelmente mais abrupta do que do pico para a direita, em que há uma região de transição mais bem definida e diminuição progressiva da porosidade até o valor inicial de 0,20.

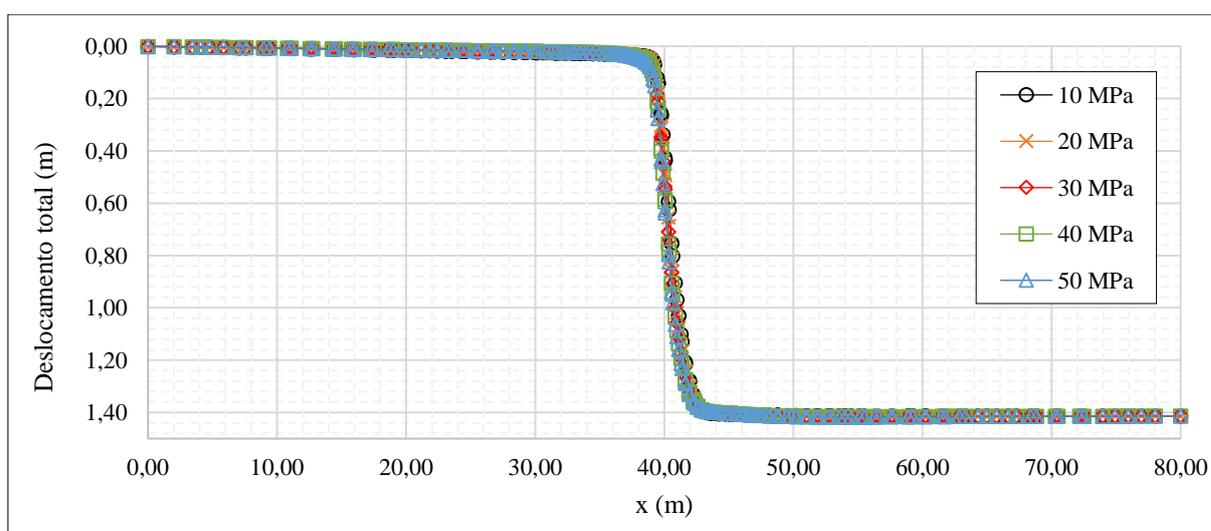
Gráfico 47 – Variação da porosidade em relação a largura do maciço na formação de zona de dano em regime normal variando a tensão vertical.



Fonte: O Autor (2020).

O deslocamento total para todas as simulações, com diferentes tensões uniaxiais foram iguais a um máximo de 1,417 m. Fica evidente que a tensão vertical não influenciou nos deslocamentos, como também não influenciou na característica da transição de parte sem movimento para outra com movimento que caracteriza a estrutura, Gráfico 48. Essa característica dos deslocamentos evidencia o ambiente rúptil da formação da falha e está em consonância com o trabalho de Anastasopoulos *et al.* (2007), para falhas normais.

Gráfico 48 – Deslocamento total em relação a largura do maciço em metros para a formação de zona de dano em regime normal variando a tensão vertical.



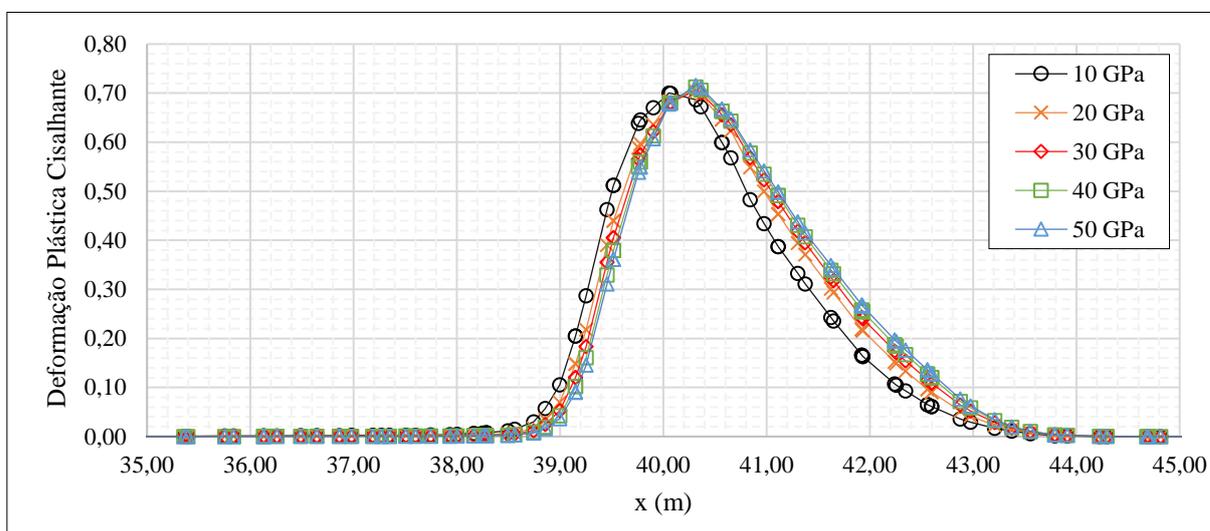
Fonte: O Autor (2020).

## 5.2.2 Influência da Rigidez da Rocha

Avaliando a influência do parâmetro material relacionado a rigidez do mesmo, módulo de elasticidade, optou-se por tratar de valores de 10 GPa à 50 GPa para as mesmas condições de contorno para formação de zona de dano em regime normal e tensão vertical aplicada de 30 MPa, valor intermediário nas análises da seção 5.2.1. Os deslocamentos totais fora os mesmos para todos os casos chegando a valores correspondentes a 1,417 m. A porosidade não apresentou sensibilidade à mudança do módulo de elasticidade, visto à dependência direta do parâmetro de ângulo de dilatância.

O parâmetro que apresentou variação com a mudança do módulo de elasticidade foi a deformação plástica cisalhante a linha central do maciço. Assim, apesar de não ocorrer diferença expressiva nos valores máximos há a tendência de a curva deslocar para a direita com o aumento do valor do módulo de elasticidade, Gráfico 49. Vale chamar a atenção para o descolamento da curva cujo módulo de elasticidade é 10 GPa o que indicaria que existe sensibilidade da plasticidade para esse parâmetro material é perceptível para valores menores que 20 GPa.

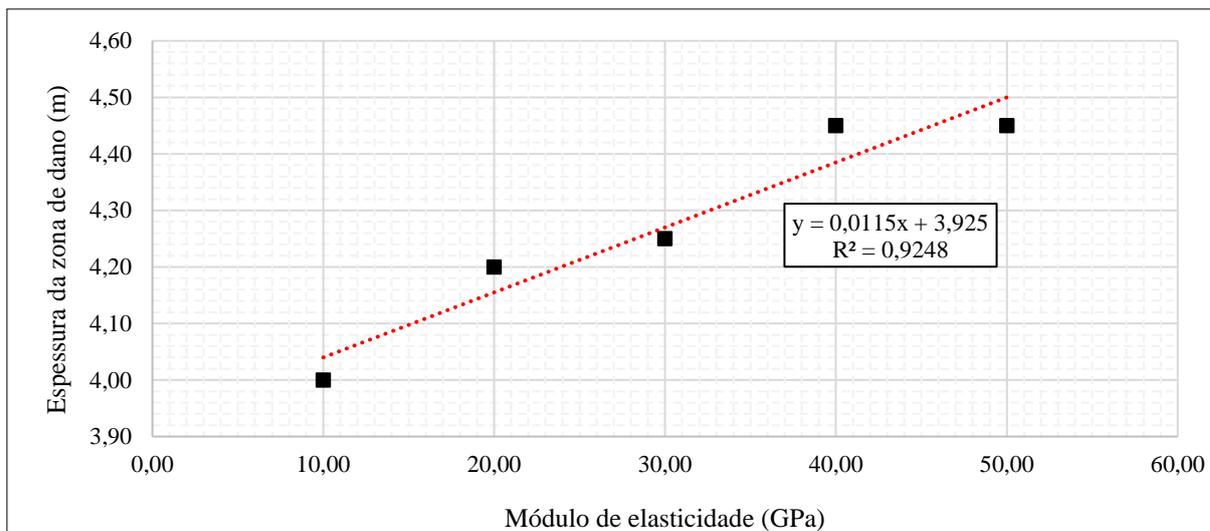
Gráfico 49 – Variação da deformação plástica cisalhante na linha central da formação de zona de dano em regime normal com variação do módulo de elasticidade.



Fonte: O Autor (2020).

Além do deslocamento da curva houve variação da largura da zona de plastificação com a variação do módulo de elasticidade. O Gráfico 50 correlaciona a largura da zona de plastificação, conseqüentemente a zona de dano do material, com o módulo de elasticidade obtendo coeficiente de correlação  $R^2 = 0,9248$ .

Gráfico 50 – Correlação da espessura da zona de dano (m) com o módulo de elasticidade (GPa) para a formação de zona de dano em regime normal.



Fonte: O Autor (2020).

### 5.3 SEGMENTOS DE FALHAS

Nessa seção será apresentado à análise dos segmentos de falhas pré-existentes inseridos no contínuo através da utilização da técnica de descontinuidades fortes incorporadas. As análises consistiram em aplicação de tensão litostática no maciço seguido de deslocamentos extensionais ou compressionais, caracterizando o processo de reativação tectônica. As análises consistiram em duas etapas, a primeira com a verificação da resposta de um maciço considerado elástico à inserção de duas descontinuidades na região central utilizando como indicador de reativação de falha as deformações plásticas. A segunda etapa consistiu em utilizar um segmento de falha disposto em um maciço submetido a extensão, ambos utilizando modelo constitutivo elastoplástico e com parâmetros elásticos e mecânicos iguais. Para todos os casos foram desconsiderados os esforços de corpo visto que os eixos  $x$  e  $y$  remetem a vista em planta de cada problema.

#### 5.3.1 Segmentos de Falha Pré-existentes em um Maciço Elástico em Transpressão

O primeiro caso simulado consistiu de dois segmentos de falhas dispostos em posição neutra um em relação ao outro, paralelas com a horizontal e submetido a um movimento compressional. Esse tipo de estrutura em par conjugado em falhas transcorrentes tem ampla ocorrência na natureza, com disposição neutra entre os segmentos, sobrepostas ou afastadas, corroborando para a formação de zonas dano por aproximação e interligação (PEACOCK *et al.*, 2017). A Figura 51 apresenta um exemplo de ocorrência desse tipo de estrutura da Bacia

Sergipe-Alagoas (AL) em que há um par conjugado sujeito ao movimento que tende a rotacionar em sentido horário do tipo *pull-apart*.

Figura 51 – Estrutura da Bacia Sergipe-Alagoas (AL), composta por par conjugado do tipo *pull-apart* (em mapa), neste caso relacionada à transcorrência dextral em arenito.



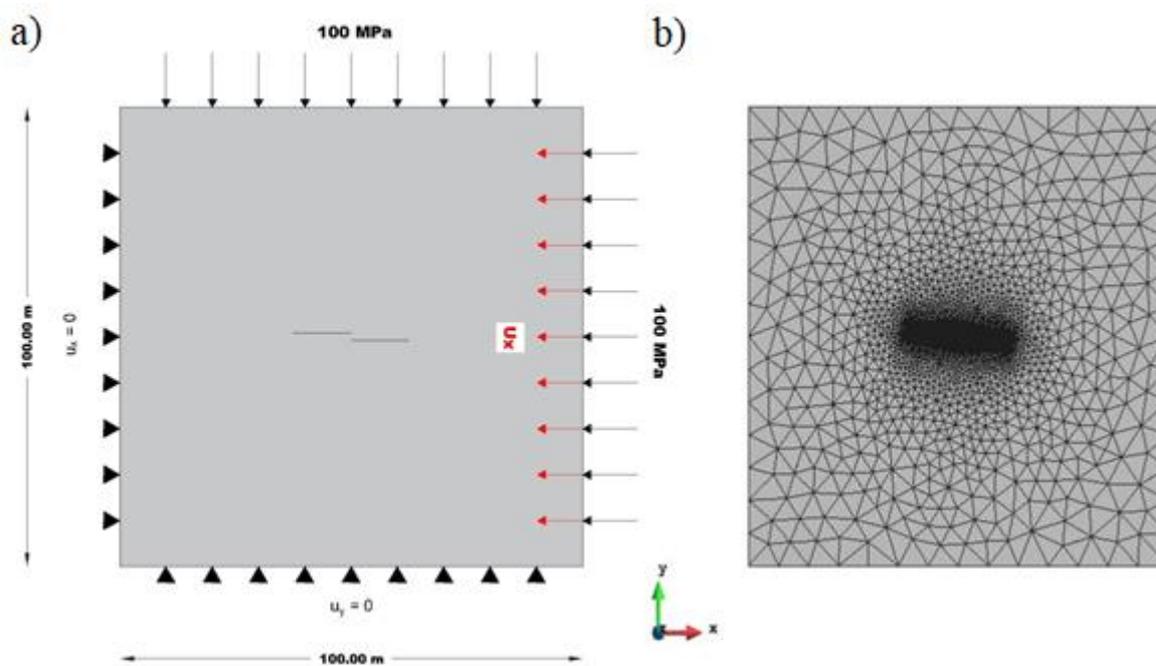
Fonte: Silva (2018).

No presente caso analisado, optou-se por uma geometria do problema adaptado do trabalho de Nabavi *et al.* (2017), em que um maciço rochoso com dimensões 100 x 100 m foi submetido inicialmente a uma pressão litostática de 100 MPa, e em um segundo momento à uma condição de deslocamento, cujo objetivo é induzir uma contração de 3% do valor total do comprimento no maciço. A escolha dessa disposição e cinemática inicial visa à simplificação do problema e buscar o entendimento do comportamento dos segmentos de falhas pré-existentes incorporadas através do método das descontinuidades forte.

Os segmentos de falhas inseridos como descontinuidades estão dispostos de maneira neutra, com comprimento de 12,5 m e distância entre si correspondente a 12,5% do comprimento, largura das descontinuidades de 1 cm e do elemento em que está inserido de 10 cm. Vale ressaltar que o tamanho dos segmentos foi determinado respeitando a condição de que o maciço fosse consideravelmente maior que o comprimento dos segmentos de falha, em pelo menos 5 vezes (MISRA *et al.*, 2009). A Figura 52 apresenta a geometria básica do problema,

condições de contorno e malha discretizada composta por 5954 nós e 11850 elementos triangulares.

Figura 52 – Geometria do problema utilizando segmentos de falha com a técnica de descontinuidades fortes incorporadas: a) condições de contorno; b) malha discretizada.



Fonte: O Autor (2019).

Os parâmetros da rocha utilizados na simulação correspondem a um arenito. O maciço foi considerado elástico e os segmentos de falha foram considerados elastoplásticos, utilizando o modelo constitutivo de Drucker-Prager. Logo, o Quadro 4 apresenta os parâmetros utilizados com base em trabalhos relacionados com mecânica das rochas (DEB; VERMA, 2016; GUDMUNDSSON, 2011).

Quadro 4 – Parâmetros elásticos e mecânicos utilizados nos materiais, maciço e segmentos de falhas pré-existentes incorporadas.

Parâmetro	Valor	Elemento
Módulo de Young ( $E$ )	22 GPa	Maciço e segmentos de falha
Coesão ( $c$ )	2 MPa	Segmentos de falha
Relação de Poisson ( $\nu$ )	0,24	Maciço e Segmentos de falha
Ângulo de Atrito ( $\phi$ )	31°	Maciço e Segmentos de falha
Ângulo de dilatância ( $\Psi$ )		

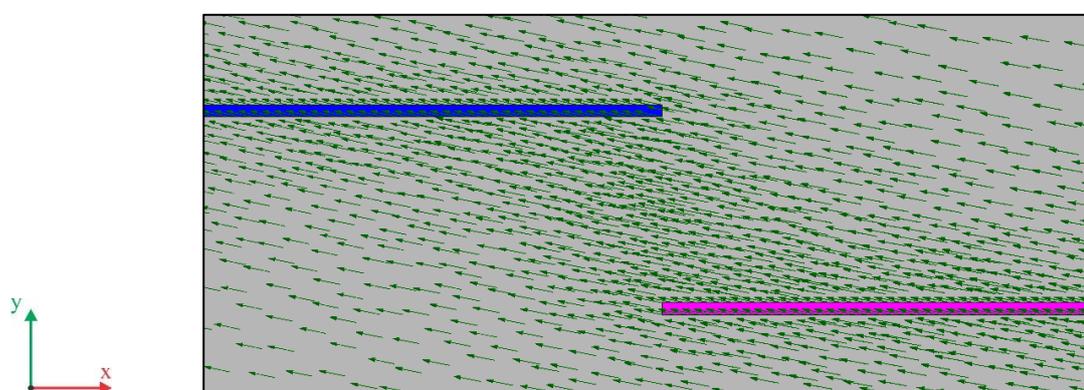
Fonte: O Autor (2019).

Os resultados foram avaliados utilizando como critério a avaliação das tensões e deformações elásticas no maciço na região próxima aos segmentos de falhas, as tensões

principais e cisalhantes (SEGALL; POLLARD, 1980). Além disso, as deformações plásticas nos segmentos de falhas como indicativo do processo de reativação dessas estruturas pré-existentes. Visto que a região de interesse consiste na região próxima aos segmentos de falhas, a apresentação dos resultados dará ênfase à esta região.

A Figura 53 apresenta os vetores de deslocamentos do problema, evidenciando que em acordo com o sentido cinemático da compressão do maciço, indicando a transpressão do maciço em movimento sinistral (rotação anti-horário).

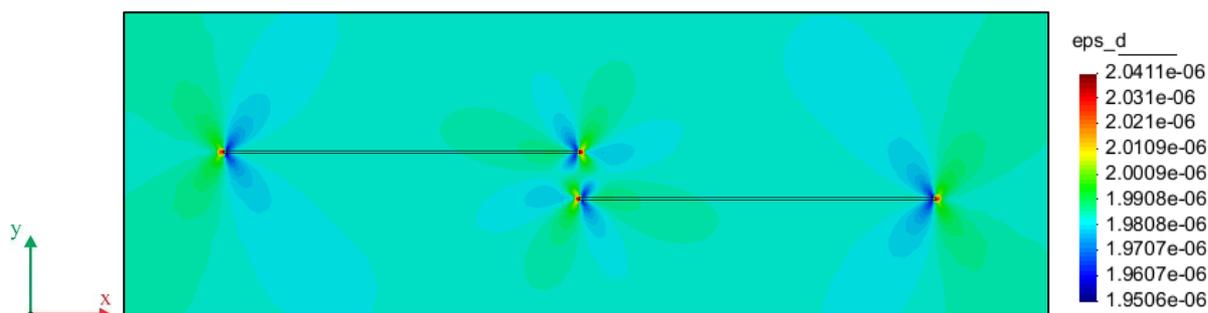
Figura 53 – Representação vetorial dos deslocamentos em transpressão no maciço com ênfase à região entre as extremidades internas dos dois segmentos de falha.



Fonte: O Autor (2019).

Analisando as deformações elásticas, é possível verificar que estas deformações no maciço apresentam pequena variação na escala de  $10^{-8}$  com concentração nas extremidades da descontinuidade, conforme apresenta a Figura 54.

Figura 54 – Deformações elásticas no maciço com detalhe para os segmentos incorporados em transpressão.

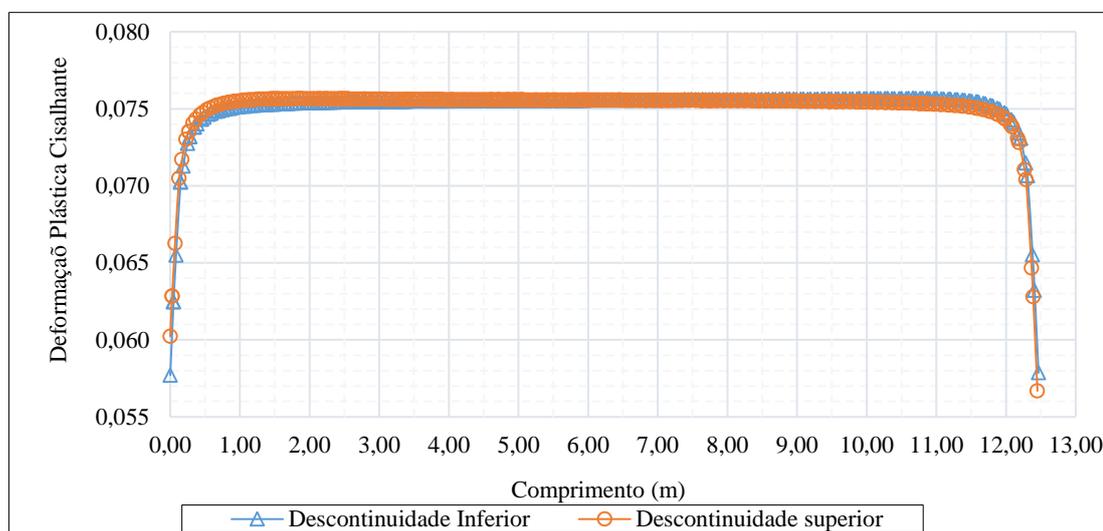


Fonte: O Autor (2019).

Em contrapartida, nos elementos com descontinuidade incorporada em que o modelo constitutivo considerado foi elastoplástico as deformações plásticas são maiores na região central de ambas as descontinuidades, conforme Gráfico 51 e Figura 55. A ocorrência de

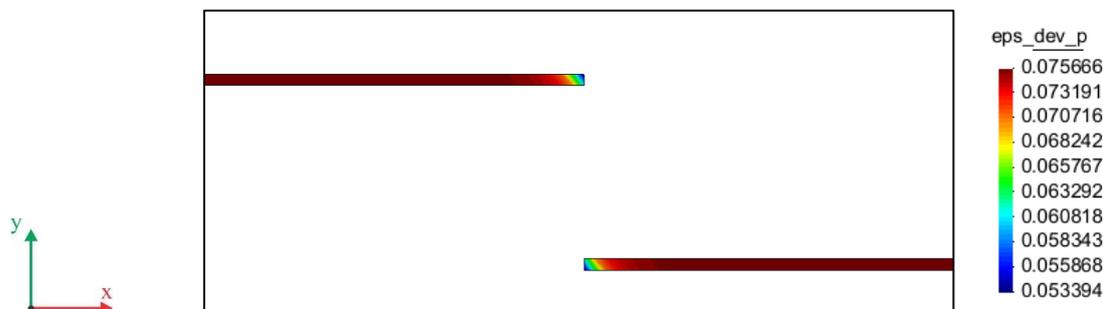
deformações plásticas cisalhantes indica o processo de reativação dessas estruturas no processo compressional.

Gráfico 51 – Deformações plásticas dos segmentos de falha pré-existentes incorporados em função do comprimento da descontinuidade.



Fonte: O Autor (2019).

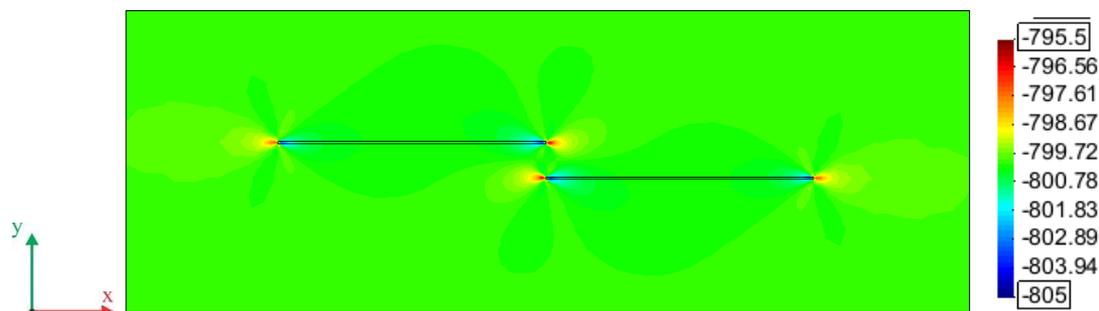
Figura 55 – Deformações plásticas cisalhantes nos segmentos de falha.



Fonte: O Autor (2019).

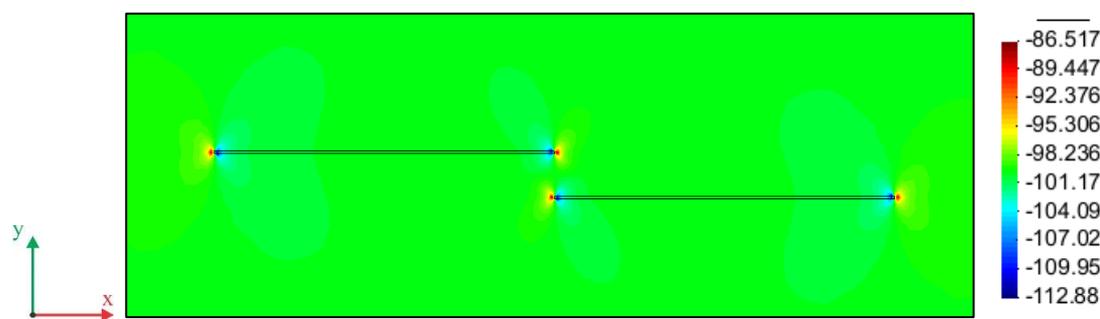
As tensões principais maior e menor apresentam uma concentração de valores máximos e mínimos nas extremidades internas das descontinuidades, conforme apresenta as Figuras 56 e 57, respectivamente. Ressalta-se que os valores estão negativos vide convenção de sinais utilizada no código, em que compressão é negativo.

Figura 56 – Distribuição da tensão principal maior  $\sigma_1$  (MPa) para o maciço com dois segmentos de falhas pré-existente incorporado.



Fonte: O Autor (2020).

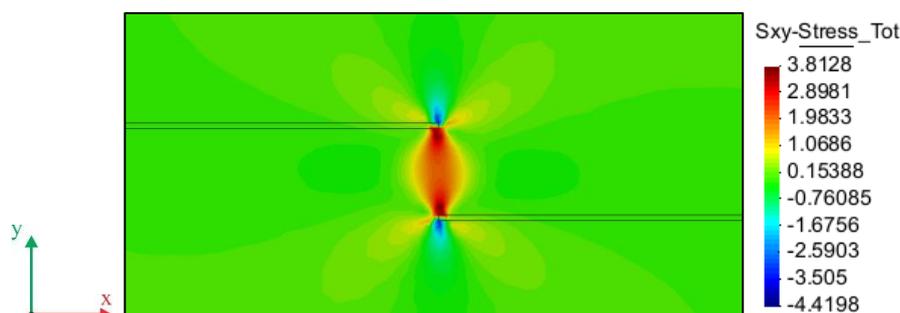
Figura 57 – Distribuição da tensão principal menor  $\sigma_3$  (MPa) para o maciço com dois segmentos de falhas pré-existente incorporado.



Fonte: O Autor (2020).

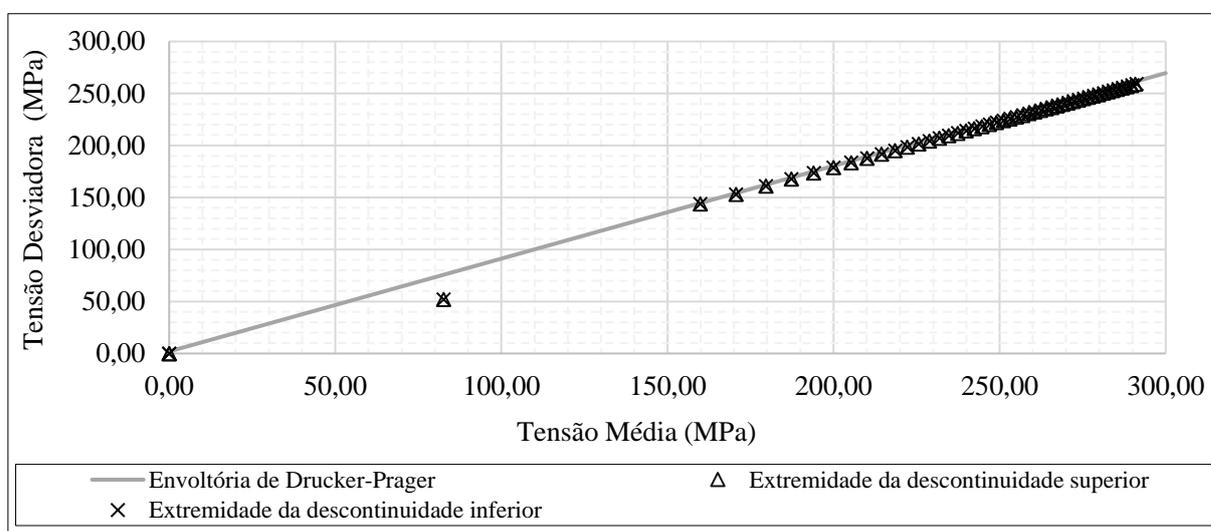
A distribuição das tensões cisalhantes entre as extremidades internas das discontinuidades com propagação entre estas, indica o caráter das movimentações sofridas pelo maciço e o comportamento das extremidades das discontinuidades de concentrar as tensões, como é apresentado na Figura 58. O Gráfico 52 apresenta a envoltória de Drucker Prager e a trajetória de tensões no espaço de tensões médias versus tensões desviadoras em MPa para os elementos das extremidades internas dos segmentos inferior e superior. Fica, portanto, evidente que os valores para as duas discontinuidades são praticamente coincidentes mostrando que a resposta tensão deformação nesta região é similar. Pelas trajetórias verifica-se que não houve valores acima da superfície de fluência, permanecendo em grande parte sobre a envoltória caracterizando o processo de plastificação.

Figura 58 – Distribuição das tensões cisalhantes entre as extremidades internas das discontinuidades (MPa).



Fonte: O Autor (2020).

Gráfico 52 – Tensões desviadora (MPa) versus tensões médias (MPa) para os elementos da extremidade interna dos segmentos de falha pré-existentes incorporados.



Fonte: O Autor (2020).

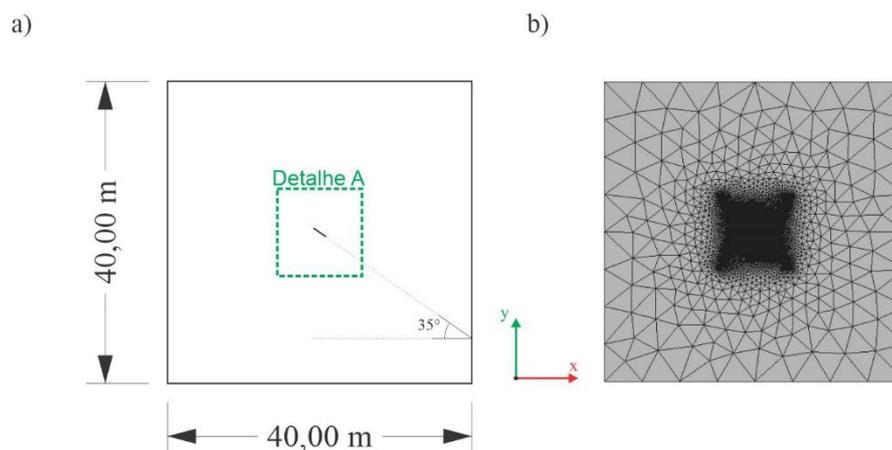
Neste caso de par conjugado fica evidente o comportamento das tensões cisalhantes como duplex transcorrente visto o aspecto de sigmoide entre as extremidades internas dos segmentos (KIM; PEACOCK; SANDERSON, 2004), mesmo que neste caso o maciço apresente comportamento elástico e disposição dos segmentos com ângulos de  $90^\circ$  entre si. Portanto, para um movimento cinemático compressivo conforme disposto as tensões e deformações foram amplamente influenciadas pela descontinuidade forte incorporada, principalmente nas extremidades internas e na região entre segmentos.

### 5.3.2 Segmento de Falha Incorporado no Maciço em Transtensão

A segunda análise realizada consistiu de um maciço com geometria de 40 x 40 m e um segmento de falha com comprimento de 2 m inclinado em  $35^\circ$  em relação a horizontal, Figura 59 a) (NEVITT, 2015). O maciço foi discretizado em elementos triangulares totalizando 21312

elementos e 10173 nós, Figura 59 b), com maior refino na região central com tamanho mínimo dos elementos de 10 cm, visto que é a largura do elemento em que foi inserida a descontinuidade. Os resultados da simulação serão apresentados utilizando o Detalhe A da Figura 59 a) buscando evidenciar a influência da falha em cada parâmetro analisado.

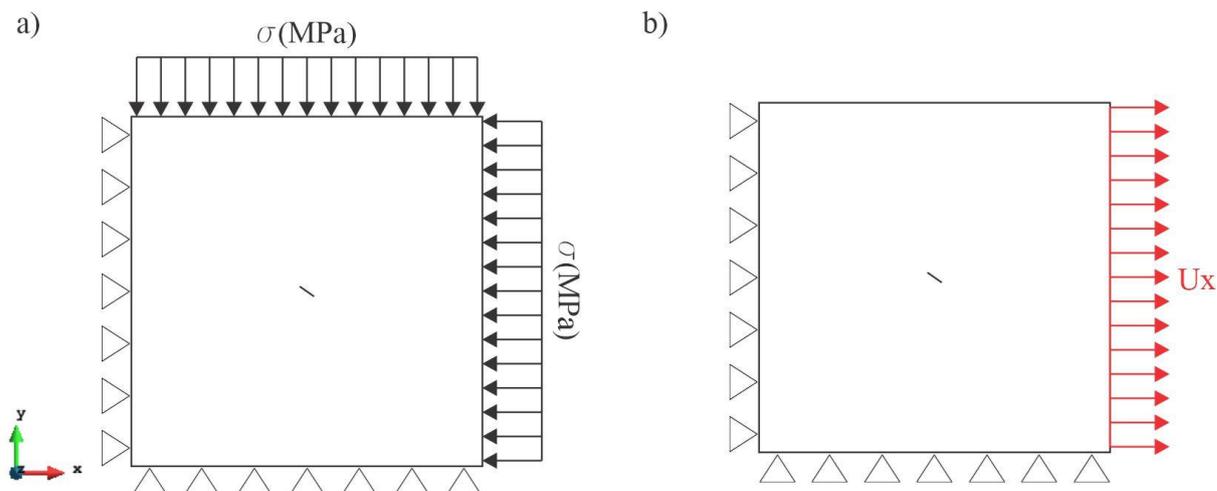
Figura 59 – Geometria do problema: a) maciço com dimensões 40 x 40 m e segmento de falha com 2 m de comprimento e ângulo com a horizontal de 35° e detalhe A que será utilizado nas análises dos resultados; b) malha discretizada em elementos triangulares com maior refino na região central do maciço.



Fonte: O Autor (2020).

A simulação consistiu em duas etapas. A primeira consistiu em aplicar o regime litostático através da aplicação da tensão de 100 MPa nas direções  $x$  e  $y$ , Figura 60 a). No segundo momento, mantido o estado de tensões litostáticas da etapa predecessora o maciço foi submetido a uma extensão na direção do eixo  $x$  no valor total correspondente a 3% do comprimento do maciço (NEVITT; POLLARD; WARREN, 2014; NEVITT, 2015). O maciço e os elementos com descontinuidades fortes foram simulados com o modelo elastoplástico de Drucker-Prager e com os mesmos parâmetros elásticos e mecânicos de um arenito com base em trabalhos direcionados a mecânica das rochas (DEB; VERMA, 2016; GUDMUNDSSON, 2011; POLLARD; FLETCHER, 2006), apresentados na Tabela 1.

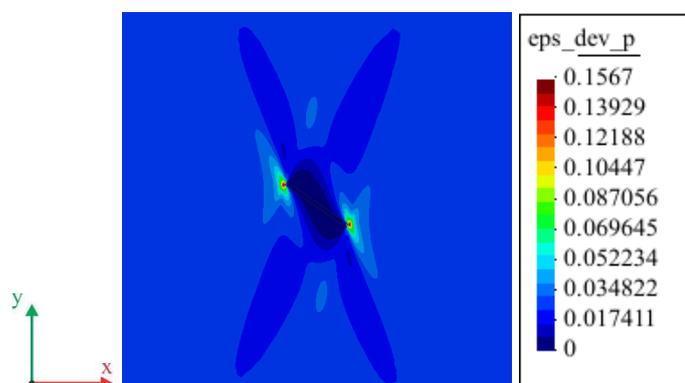
Figura 60 – Condições de contorno do problema: a) etapa inicial, imposição das tensões litostática ( $\sigma$ ) em MPa; b) imposição de deslocamento extensional  $U_x$  mantido o estado de tensões imposto na etapa anterior.



Fonte: O Autor (2020).

A Figura 61 apresenta a distribuição das deformações plásticas, em que fica nítida a influência do segmento de falha no comportamento e acentuada concentração nas extremidades. Essa concentração das deformações plásticas nas extremidades corrobora com o a evolução de falhas transcorrentes associadas a cinemática extensional, formando estruturas secundárias de extremidades como fraturas do tipo rabo de cavalo, wing crack, etc. (KIM; PEACOCK; SANDERSON, 2004), representados nesse caso pelo dano nas extremidades da falha. Cabe ressaltar que ao longo do comprimento da falha uma região não apresentou deformações plásticas, neste caso influenciado pela técnica de descontinuidades incorporadas que não permite o deslizamento das superfícies da descontinuidade.

Figura 61 – Deformações plásticas no maciço, em detalhe no segmento de falha incorporada.

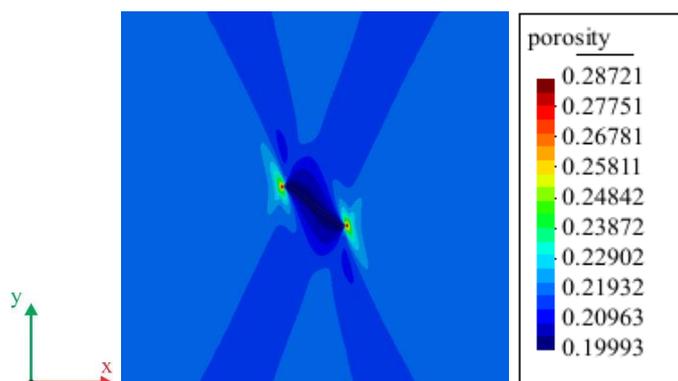


Fonte: O Autor (2020).

A consideração de plasticidade associada foi utilizada. Essa consideração majora as variações volumétricas e, conseqüentemente, aumenta a deformação plástica cisalhante resultante no maciço. A Figura 62 apresenta a variação da porosidade do maciço próximo ao

segmento de falha, com aumento acentuado nas extremidades e praticamente não houve alteração ao longo do comprimento. Neste caso, o aumento da porosidade nas extremidades pode ser correlacionado com o aumento da permeabilidade dessa rocha ao reativar a falha no processo cinemático de extensão. Cabe ressaltar que o processo extensional provocou deformações plásticas e variação da porosidade no maciço, no entanto menos expressivo que na região próxima à descontinuidade.

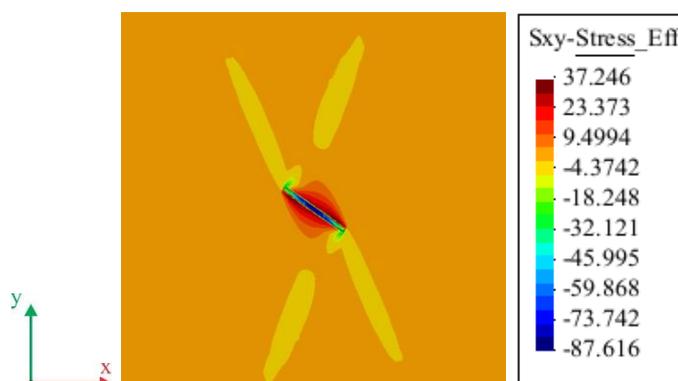
Figura 62 – Variação da porosidade na região próxima ao segmento de falha inserida no maciço.



Fonte: O Autor (2020).

Em relação ao comportamento das tensões cisalhantes no maciço, houve concentração dos valores máximos no segmento de falha resultante da introdução da banda de deformações nos elementos e a tendência da parte continua do elemento em impor tensões cisalhantes nessa banda por conta da cinemática do movimento. A Figura 63 apresenta essa a distribuição das tensões cisalhantes na região do segmento de falha.

Figura 63 – Variação da tensão cisalhante em MPa na região próxima ao segmento de falha.

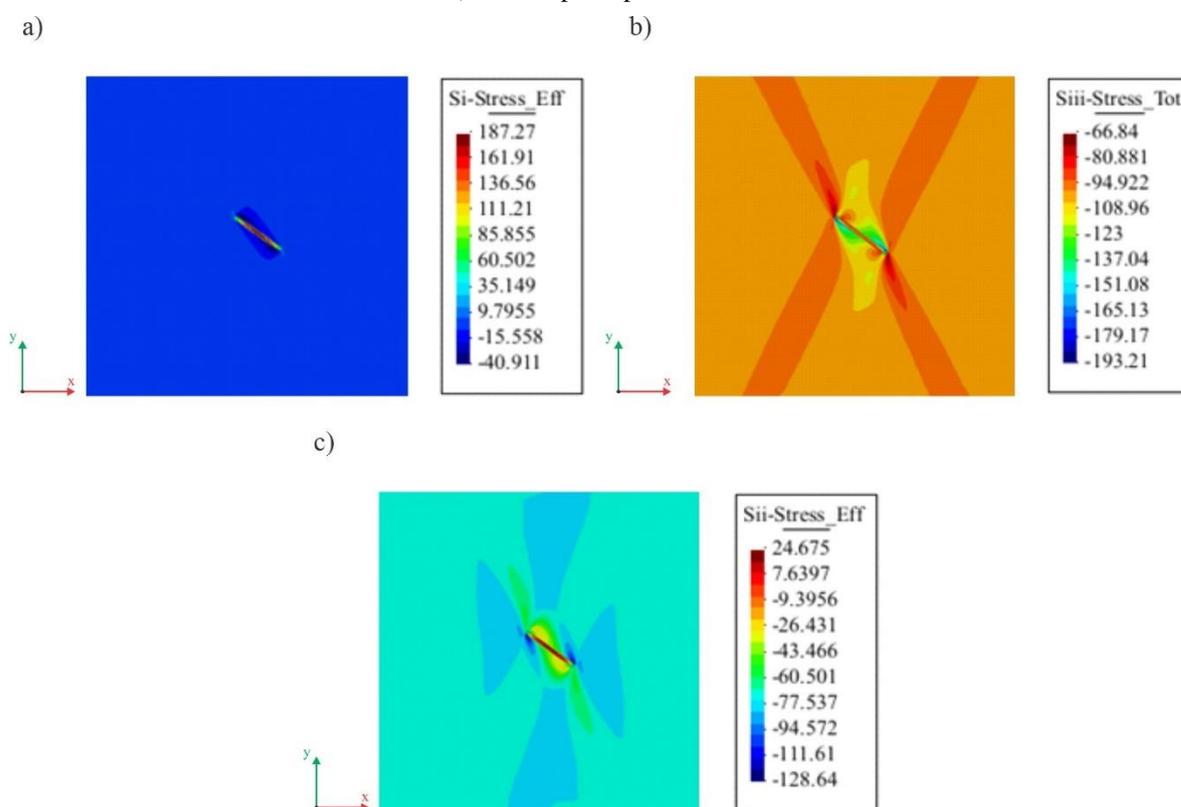


Fonte: O Autor (2020).

A Figura 64 apresenta a distribuição das tensões principais na região próxima ao segmento de falha tornando evidente que o segmento de falha concentra os valores das tensão principal mínimas ao longo do comprimento e os valores máximos nas extremidades. As

tensões médias concentram os valores mínimos ao longo do comprimento da falha enquanto que os valores máximos no maciço a partir das extremidades da descontinuidade. Este último comportamento e os demais associados as tensões principais evidenciam que as tensões no maciço são fortemente influenciadas e direcionadas pela reativação dessas estruturas no processo cinemático. Portanto, a incorporação de uma descontinuidade no maciço em regime litostático submetido a uma extensão terá a distribuição de tensões, deformações e porosidade controlada pelo comportamento da descontinuidade.

Figura 64 – Tensões principais no maciço em MPa: a) tensões principais mínima; b) tensões principais máxima; c) tensões principais médias.



Fonte: O Autor (2020).

O comportamento das tensões principais como sigmóides, Figura 64, representam bem o aspecto de zona de cisalhamento encontrado na natureza para falhas transcorrentes em regime cinemáticos extensionais, neste caso para a falha em sentido sinistral com tensões máximas nas extremidades dos segmentos.

## 6 DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do método dos elementos finitos para a modelagem da formação de zona de falha em maciços rochosos, considerando o uso do modelo constitutivo elastoplástico de Drucker-Prager e as deformações plásticas como parâmetro para a caracterização a espessura da zona de dano mostrou-se de acordo com a física do processo e as características deformacionais encontradas na arquitetura desta zona. No entanto o uso de plasticidade associada majorou consideravelmente a variação volumétrica e conseqüentemente as deformações plásticas totais.

No caso de formação de zona de dano em regime transcorrente constatou-se que as condições de contorno da modelagem estão de acordo com a física do processo cisalhante. Além disso, houve a formação de zona transição dos deslocamentos bem definida que caracteriza a formação de estruturas rúpteis. A concentração das tensões principais na região central caracterizando uma zona de cisalhamento bem definida para formação destas falhas, com esforços tracionando o maciço que indicam a formação de fraturas do modo I, esforços à compressão para fraturas do modo II e outras estruturas secundárias na zona de falha, corroborando com a variação acentuada da porosidade esperada para rochas sedimentares submetidas processo formador cisalhante. Foi possível verificar o papel fundamental da tensão confinante e do módulo de elasticidade do material no processo de deformação plástica cisalhante, espessura da zona de dano e no deslocamento total (rejeito), possibilitando estabelecer correlações com coeficientes aceitáveis.

Nas análises da formação de zonas de falhas em transensão apresentou comportamento esperado para a cinemática extensional na formação de falhas transcorrentes, pela característica romboidal das tensões principais na região central, possível formação de fraturas do modo I e degradação do material, já que houve expressivo aumento da porosidade na região central e uma zona de deformações plásticas cisalhantes bem formada que caracteriza a formação da zona de falha. Análogo à transcorrência, a variação da tensão confinante, influenciando diretamente na largura da zona formada e no deslocamento total da estrutura formada. No entanto, apesar do incremento no módulo de elasticidade do material, concedendo maior rigidez, influenciou no processo de plastificação máxima, nos deslocamentos e na distribuição da tensão cisalhante, a espessura da zona de dano não apresentou variação significativa.

A formação de zonas de falhas em transpressão apresentou tensões principais com características compressionais predominantes que sugerem a formação de antifraturas e fraturas do modo II, vide a cinemática da formação, com aspecto rúptil pela característica dos

deslocamentos. A variação da porosidade no maciço, diminuindo em grande parte até um pico mínimo no início da zona de falha sugere a ocorrência de estruturas como bandas de deformação na zona de dano, influenciando diretamente na permeabilidade do maciço, à medida em que há uma diminuição da porosidade a permeabilidade diminuirá. Nas análises da variação da tensão confinante e da mudança no módulo de rigidez influenciaram efetivamente no processo formador, visto que os deslocamentos totais foram os mesmos para todos os casos, consistindo do valor padrão imputado nas condições de contorno. Logo, esse caso evidencia a necessidade do uso de plasticidade não associada com variação volumétrica real, visto que houve tímida redução deste parâmetro em um processo de compressão acentuado. Outro fator importante a ser considerado, as análises para este regime consistiu do uso de plasticidade perfeita, visto que as rochas apresentam grande resistência a compressão e nesse caso especificamente, mantida a condição de equilíbrio no maciço o mesmo continuou deformando passando a comporta-se no regime dúctil, o que corrobora com a formação de estruturas características deste regime cinemático como dobras.

Na formação de falhas normais submetidas à cinemática extensional, ficou o evidente comportamento rúptil caracterizado pelos deslocamentos. A formação da zona de falha pelo comportamento da deformação plástica cisalhante evidencia a formação de dois blocos posicionados distintos em função do plano de falha com mergulho definido. O aumento expressivo da porosidade na região da zona de falha sugere a formação de estruturas secundárias, como fraturas do modo I, além de bandas de cisalhamento que repercute diretamente no aumento considerável da permeabilidade do maciço.

A utilização da técnica de descontinuidades fortes com o método dos elementos finitos para simulação de maciços rochosos com segmentos de falha mostrou-se como ferramenta interessante para a compreensão do comportamento elastoplástico e do estado tensional do maciço contínuo com a inserção de uma ou mais estruturas descontínuas. As simulações realizadas apresentaram boa alternativa a verificação do controle estrutural, vide a influência do segmento de falha no maciço, em processos de reativação tectônica. No entanto apresentou limitação quando a verificação de rejeito para segmentos de falhas transcorrentes. O comportamento da concentração de tensões e deformações nos *tips* está de acordo com outras abordagens numéricas do tema e o comportamento físico dessas estruturas, inclusive por apresentar característica das tensões principais e cisalhantes em sigmoide, aspecto da etapa da formação de falha transcorrente com cinemática extensional.

## 6.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Realizar estudo de malha;
- Modelar utilizando plasticidade não-associada e processos de *softening*;
- Realizar a modelagem para formação de falhas em regime inverso;
- Modelar casos com diferentes litologias;
- Modelar processos formadores com superposição de eventos;
- Utilizar o método dos elementos finitos para grandes deformações;
- Utilizar métodos acoplados hidro-termo-mecânico e químico;
- Realizar modelagens tridimensionais para o processo de formação de zonas de falha em diferentes regimes.
- Realizar modelagens físicas utilizando *sandbox* e modelar numericamente para as mesmas características geométricas;
- Utilizar geometria e os parâmetros das rochas de afloramentos reais da Região Nordeste do Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ABBO, Andrew John. **Finite element algorithms for elastoplasticity and consolidation**. 1997. Thesis (PhD) - University of Newcastle, Newcastle, 1997.
- ACIOLI, Nayara Torres Belfort. **Análise numérica de escavação em rochas salinas com possibilidade de reativação de falhas via técnica de descontinuidades fortes**. 2017. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- ALONSO, E. E.; ZANDARÍN, M. T.; OLIVELLA, S. Joints in unsaturated rocks: Thermo-hydro-mechanical formulation and constitutive behaviour. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 200–213, 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1674775513000383>>. Acesso em: 8 dez. 2019.
- 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: 13 dez. 2019.
- ANTUNES, Paulo de Tarso Silva. **Modelagem numérica tridimensional visando o estudo de tensões na bacia do recôncavo via método dos elementos finitos**. 2003. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- ARAÚJO, Ana Itamara Paz. **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.
- BENSE, V. F. *et al.* Fault zone hydrogeology. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 127, p. 171–192, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008>>. Acesso em: 2 nov. 2019.
- BESERRA, Leila Brunet de Sá. **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, Leila Brunet de Sá. **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.
- BURBEY, Thomas J. The influence of geologic structures on deformation due to ground water withdrawal. **Ground Water**, Blacksburg, v. 46, n. 2, p. 202–211, 2008.
- CHILDS, Conrad *et al.* A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations. **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 117–127, 2009.

CHOI, Jin Hyuck *et al.* Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 152, n. November, p. 70–87, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.006>>. Acesso em: 2 out. 2019.

CIVIDINI, Annamaria; GIODA, Giancarlo. A finite element analysis of direct shear tests on stiff clays. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, [s. l.], v. 16, n. 12, p. 869–886, 1992.

CLAUSEN, O. R. *et al.* Discrete-element modelling of hanging wall deformation along the D-1 fault system, Danish North Sea, with implications for gas chimney interpretations. **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 118, p. 250–264, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.11.005>>. Acesso em: 6 jan. 2020.

DEB, Debasis; VERMA, ABHIRAM KUMAR. **FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS OF ROCK MECHANICS**. Delhi: PHI Learning Private Limited, 2016. v. 16

DRUCKER, D. C.; PRAGER, W. SOIL MECHANICS AND PLASTIC ANALYSIS OR LIMIT DESIGN. **Swp**, [s. l.], v. X, n. 2, p. 157–165, 1951.

DVORKIN, Eduardo N.; CUITIÑO, Alberto M.; GIOIA, Gustavo. Finite elements with displacement interpolated embedded localization lines insensitive to mesh size and distortions. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 541–564, 1990.

ENGELDER, Terry. **Stress Regimes in the Lithosphere**. Princeton: Princeton University Press, 1993.

FÄLTH, Billy *et al.* Simulating Earthquake Rupture and Off-Fault Fracture Response: Application to the Safety Assessment of the Swedish Nuclear Waste Repository. **Bulletin of the Seismological Society of America**, [s. l.], v. 105, n. 1, p. 134–151, 2015. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/bssa/article/105/1/134-151/323378>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

FAULKNER, D. R. *et al.* A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 32, n. 11, p. 1557–1575, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2010.06.009>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

FLINT, S. S.; BRYANT, I. D. The geological modelling of hydrocarbon reservoirs and outcrop analogues. **The geological modelling of hydrocarbon reservoirs and outcrop analogues**, [s. l.], n. 15, p. 57–80, 1993.

FOLCH, Albert; MAS-PLA, Josep. Hydrogeological interactions between fault zones and alluvial aquifers in regional flow systems. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 22, n. 17, p. 3476–3487, 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.6956>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

FOSSEN, Haakon. **Structural Geology**. 2nd. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

FOSSSEN, Haakon *et al.* A review of deformation bands in reservoir sandstones: Geometries, mechanisms and distribution. **Geological Society Special Publication**, [s. l.], v. 459, n. 1, p. 9–33, 2018.

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.

GERBAULT, Muriel; POLIAKOV, Alexei N. B.; DAIGNIERES, Marc. Prediction of faulting from the theories of elasticity and plasticity: What are the limits? **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 20, n. 2–3, p. 301–320, 1998.

GEUZAINÉ, Christophe; REMACLE, Jean-François. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [s. l.], v. 79, n. 11, p. 1309–1331, 2009. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/nme.2579>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

GONZALEZ, Oscar; STUART, Andrew M. **A First Course in Continuum Mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

GUDMUNDSSON, Agust. Effects of Young's modulus on fault displacement. **Comptes Rendus Geoscience**, [s. l.], v. 336, n. 1, p. 85–92, 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1631071303002347>>. Acesso em: 7 dez. 2019.

GUDMUNDSSON, August. **Rock Fractures in Geological Processes**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

GURTIN, Morton E. An Introduction to Continuum Mechanics. In: **MATHEMATICS IN SCIENCE AND ENGINEERING**. New York: Academic Press, INC., 1981. p. 272.

HERMANNNS, Reginald L.; LONGVA, Oddvar. Rapid rock-slope failures. In: **Landslides: Types, Mechanisms and Modeling**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 59–70.

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.

KIM, Young-Seog; PEACOCK, David C. P.; SANDERSON, David J. Fault damage zones. **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 503–517, 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191814103001391>>. Acesso em: 21 set. 2019.

KIM, Young Seog; SANDERSON, David J. The relationship between displacement and length of faults: A review. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 68, n. 3–4, p. 317–334, 2005.

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.

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.

MÄKEL, Gerard; WALTERS, John. Finite-element analyses of thrust tectonics: Computer simulation of detachment phase and development of thrust faults. **Tectonophysics**, [s. l.], v. 226, n. 1–4, p. 167–185, 1993. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0040195193901162>>. Acesso em: 7 jan. 2020.

MANDL, Georg. **Faulting in Brittle Rocks**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04262-5>>. Acesso em: 2 dez. 2019.

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: 8 set. 2019.

MARRETT, Randall; PEACOCK, David C. P. Strain and stress. **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 21, n. 8–9, p. 1057–1063, 1999. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191814199000206>>. Acesso em: 7 jan. 2020.

MAYER, Alex *et al.* Estimation of fault-zone conductance by calibration of a regional groundwater flow model: Desert Hot Springs, California. **Hydrogeology Journal**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 1093–1106, 2007. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10040-007-0158-0>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

MAYOLLE, Sylvain *et al.* Scaling of fault damage zones in carbonate rocks. **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 124, n. March, p. 35–50, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.03.007>>. Acesso em: 2 out. 2019.

MCCALLUM, James L. *et al.* Simulating the groundwater flow dynamics of fault zones MODFLOW Un-Structured Grid: A comparison of methods for representing fault properties and a regional implementation. **Department of the Environment and Energy**, Parkes, 2018.

MEANS, W. D. **Stress and Strain**. New York, NY: Springer New York, 1976. v. 162. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4613-9371-9>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

MIRANDA, T. S. *et al.* Quantifying aperture, spacing and fracture intensity in a carbonate reservoir analogue: Crato Formation, NE Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, [s. l.], v. 97, p. 556–567, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.07.019>>. Acesso em: 8 nov. 2019.

MISRA, Santanu *et al.* Mechanisms of deformation localization at the tips of shear fractures: Findings from analogue experiments and field evidence. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 114, n. B4, p. B04204, 2009. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2008JB005737>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

MOAYED, R. Z.; TAMASSOKI, S.; IZADI, E. Numerical Modeling of Direct Shear Tests on Sandy. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 943–947, 2012.

MOLLEMA, P. N.; ANTONELLINI, M. A. Compaction bands: a structural analog for anti-mode I cracks in aeolian sandstone. **Tectonophysics**, [s. l.], v. 267, n. 1–4, p. 209–228, 1996. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040195196000984>>. Acesso em: 9 jan. 2020.

MOLNÁR, László; TÓTH, Tivadar M.; SCHUBERT, Félix. Structural controls on petroleum migration and entrapment within the faulted basement blocks of Szeghalom Dome (Pannonian Basin, SE Hungary). **Geologia Croatica**, [s. l.], v. 68, n. 3, p. 247–259, 2015. Disponível em: <<http://www.geologia-croatica.hr/ojs/index.php/GC/article/view/GC.2015.19/pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

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

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: 8 abr. 2019.

NABAVI, Seyed Tohid; ALAVI, Seyed Ahmad; JABARABADI, Hamid Javanbakht. The Dinevar transtensional pull-apart basin, NW Zagros Mountains, Iran: a geological study and comparison to 2D finite element elastic models. **International Journal of Earth Sciences**, [s. l.], v. 108, n. 1, p. 329–346, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00531-018-1656-0>>. Acesso em: 6 jun. 2019.

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.

NEVITT, Johanna M.; POLLARD, David D.; WARREN, Jessica M. Evaluation of transtension and transpression within contractional fault steps: Comparing kinematic and mechanical models to field data. **Journal of Structural Geology**, Stanford, v. 60, p. 55–69, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191814113002320>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

NEVITT, Johanna Marjorie. **Fault-related deformation within the brittle-ductile transition: field observations, microstructural analysis and mechanical modeling**. 2015. 279 p. Thesis (Doctor of Philosophy) – Stanford University, Stanford, 2015. Disponível em: <<http://purl.stanford.edu/nd893sm0307>>. Acesso em: 1 jul. 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. Disponível em: <<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/02644409610151575/full/html>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

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

OLIVER, J. A consistent characteristic length for smeared cracking models. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 461–474, 1989. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/nme.1620280214>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

OLIVER, J. *et al.* From continuum mechanics to fracture mechanics: the strong discontinuity approach. **Engineering Fracture Mechanics**, [s. l.], v. 69, n. 2, p. 113–136, 2002. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794401000601>>. Acesso em: 16 jan. 2020.

OLIVER, J.; HUESPE, A. E.; CANTE, J. C. An implicit/explicit integration scheme to increase computability of non-linear material and contact/friction problems. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s. l.], v. 197, n. 21–24, p. 1865–1889, 2008.

ORELLANA, Luis Felipe; GIORGETTI, Carolina; VIOLAY, Marie. Contrasting Mechanical and Hydraulic Properties of Wet and Dry Fault Zones in a Proposed Shale-Hosted Nuclear Waste Repository. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 46, n. 3, p. 1357–1366, 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018GL080384>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

ORTEGA, Orlando J.; MARRETT, Randall A.; LAUBACH, Stephen E. A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement. **AAPG Bulletin**, [s. l.], v. 90, n. 2, p. 193–208, 2006. Disponível em: <<http://search.datapages.com/data/doi/10.1306/08250505059>>. Acesso em: 2 fev. 2020.

PATERSON, Mervyn S.; WONG, Teng-fong. **Experimental Rock Deformation - The Brittle Field**. 2nd. ed. New York: Springer, 2005.

PEACOCK, D. C. P. *et al.* A broader classification of damage zones. **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 102, n. August, p. 179–192, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019181411730158X>>. Acesso em: 19 dez. 2019.

PEACOCK, David C. P.; MARRETT, Randall. Strain and stress: Reply. **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 22, n. 9, p. 1369–1378, 2000. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.12.007>>. Acesso em: 18 dez. 2019.

PFIFFNER, O. a; RAMSAY, J. G. Constraints on geological strain rates: Arguments from finite strain states of naturally deformed rocks. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, [s. l.], v. 87, n. B1, p. 311–321, 1982. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/JB087iB01p00311>>. Acesso em: 8 jul. 2019.

PINOTTI, Alexandre Mathias; CARNEIRO, Celso Dal Ré. Geologia estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no Granito Santos, SP. **Terrae Didática**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 132, 2015. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8637402>>. Acesso em: 31 out. 2019.

PLUIJM, Ben A. Van der; MARSHAK, Stephen. **EARTH STRUCTURE: AN INTRODUCTION TO STRUCTURAL GEOLOGY AND TECTONICS**. 2nd. ed. New York: W. W. Norton & Company, 2004.

POLLARD, David D.; FLETCHER, Raymond C. Fundamentals of structural geology. **Choice Reviews Online**, Cambridge, v. 43, n. 09, p. 43-5304-43–5304, 2006.

POTTS, D. M.; DOUNIAS, G. T.; VAUGHAN, P. R. Finite element analysis of the direct shear box test. **Géotechnique**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 11–23, 1987. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.1987.37.1.11>>. Acesso em: 5 dez. 2019.

POTTS, David M.; ZDRAVKOVIC, Lidija. **Finite element analysis in geotechnical engineering: theory**. Reston: Thomas Telford, 1999.

PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 183–197, 1981. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0148906281909736>>. Acesso em: 3 nov. 1981.

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

SANDERSON, David J.; MARCHINI, W. R. .. Transpression. **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 449–458, 1984. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0191814184900580>>. Acesso em: 10 set. 2019.

SCHINDEL, Geary M. Genesis of the Edwards (Balcones Fault Zone) Aquifer. In: **The Edwards Aquifer: The Past, Present, and Future of a Vital Water Resource**. [s.l.] : Geological Society of America, 2019. v. 1215p. 9–18.

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: 1. Model calibration, boundary conditions, and selected results. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 112, n. B10, p. B10401, 2007. a. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2006JB004902>>. Acesso em: 2 out. 2019.

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: 2 out. 2019.

SCOTT BLAIR, G. W. RHEOLOGY: A BRIEF HISTORICAL SURVEY. **Jornnal of Texture Studies**, Dordrecht, v. 1, p. 14–18, 1969.

SEGALL, Paul; POLLARD, David D. Mechanics of discontinuous faults. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, [s. l.], v. 85, n. B8, p. 4337–4350, 1980. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/JB085iB08p04337>>. Acesso em: 17 maio. 2019.

SILVA, Fernando César Alves Da. **ATLAS DE GEOLOGIA ESTRUTURAL : EXEMPLOS BRASILEIROS**. Natal: EDUFRN, 2018.

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>>

SLOAN, S. W. Substepping schemes for the numerical integration of elastoplastic stress-strain relations. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [s. l.], v. 24, n. 5, p. 893–911, 1987. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/nme.1620240505>>. Acesso em: 27 out. 2019.

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

SYLVESTER, ARTHUR G. Strike-slip faults. **Geological Society of America Bulletin**, [s. l.], v. 100, n. 11, p. 1666–1703, 1988. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/gsabulletin/article/100/11/1666-1703/182044>>. Acesso em: 9 set. 2019.

TEIXEIRA, J. C.; MACIEL, B. M. C. M. **p3MatPac: Pre- and Post-Processing MATLAB package**. Recife, 2017.

TORABI, A. *et al.* Fault zone architecture and its scaling laws: where does the damage zone start and stop? **Geological Society, London, Special Publications**, [s. l.], p. SP496-2018–151, 2019. Disponível em: <<http://sp.lyellcollection.org/lookup/doi/10.1144/SP496-2018-151>>. Acesso em: 13 dez. 2019.

TORABI, A.; JOHANNESSEN, M. U.; ELLINGSEN, T. S. S. Fault Core Thickness: Insights from Siliciclastic and Carbonate Rocks. **Geofluids**, [s. l.], v. 2019, p. 1–24, 2019. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/geofluids/2019/2918673/>>. Acesso em: 2 out. 2019.

TORABI, Anita; BERG, Silje Støren. Scaling of fault attributes: A review. **Marine and Petroleum Geology**, [s. l.], v. 28, n. 8, p. 1444–1460, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.04.003>>. Acesso em: 28 dez. 2019.

TRUESDELL, C.; TOUPIN, R. The Classical Field Theories. In: **Principles of Classical Mechanics and Field Theory**. [s.l.: s.n.]. p. 226–858.

WANG, Qi *et al.* Petroleum charge and entrapment along active faults: Study of the accumulation mechanism of the Qinhuangdao 29 oil field on the slope of the Shijiutuo uplift, Bohai Sea. **AAPG Bulletin**, [s. l.], v. 100, n. 10, p. 1541–1560, 2016. Disponível em: <<http://search.datapages.com/data/doi/10.1306/04201615088>>

WIBBERLEY, Christopher A. J.; YIELDING, Graham; DI TORO, Giulio. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: A review. **Geological Society Special Publication**, [s. l.], v. 299, p. 5–33, 2008.

XU, Hao; BusetTI, Seth; ARSON, Chloé. Fracture-Induced Anisotropy of the Stress–Strain Response of Shale at Multiple Scales. **International Journal of Geomechanics**, [s. l.], v. 17, n. 8, p. 04017036, 2017. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0000897>>. Acesso em: 22 ago. 2019.

XU, Shiqing *et al.* Strain rate effect on fault slip and rupture evolution: Insight from meter-scale rock friction experiments. **Tectonophysics**, [s. l.], v. 733, n. November, p. 209–231, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.039>>. Acesso em: 22 ago. 2019.

YANG, Guang *et al.* Burial History and Petroleum Entrapment in the Yaoyingtai Region of the Changling Fault Depression, China. **Acta Geologica Sinica - English Edition**, [s. l.], v. 91, n. 6, p. 2230–2242, 2017. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/1755-6724.13460>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

YU, Maohong; MA, Guowei; LI, Guowei Ma Jianchun. Structural PLasticity: Limit, Shakedown and Dynamic Plastic Analyses of Structures. In: **ADVANCED TOPICS IN SCIENCE AND TECHNOLOGY IN CHINA**. New York: Springer, 2009. p. 384.

ZALÁN, Pedro Victor. A TECTÔNICA TRANSCORRENTE NA EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO: UMA REVISÃO. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 16(3), n. 3, p. 245–257, 1986.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method Volume 1: The Basis**. 5th. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.