



Karoline Nunes Oliveira

**Modelagem numérica em elementos finitos
para caracterização de zonas de dano em
falhas geológicas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientadora: Prof^a. Deane de Mesquita Roehl

Coorientador: Dr. Roberto Quevedo Quispe

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2023



Karoline Nunes Oliveira

**Modelagem numérica em elementos finitos
para caracterização de zonas de dano em
falhas geológicas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof^a. Deane de Mesquita Roehl

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Dr. Roberto Juan Quevedo Quispe

Coorientador

Instituto Tecgraf/PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Dr. Anderson Moraes

Cenpes/Petrobras

Rio de Janeiro, 27 de fevereiro de 2023

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Karoline Nunes Oliveira

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade de Fortaleza em 2018. No primeiro semestre de 2021, ingressou no Mestrado em Engenharia Civil ofertado pelo Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de concentração Estruturas. No ano de 2022, passou a integrar o grupo de Modelagem e Simulação Multifísica do Instituto Tecgraf/PUC-Rio como aluna pesquisadora. Atualmente, desenvolve pesquisas na área de modelagem e simulação das zonas de dano de falhas geológicas.

Ficha catalográfica

Oliveira, Karoline Nunes

Modelagem numérica em elementos finitos para caracterização de zonas de dano em falhas geológicas / Karoline Nunes Oliveira ; orientadora: Deane de Mesquita Roehl ; coorientador: Roberto Quevedo Quispe. – 2023.
122 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Falhas geológicas. 3. Zonas de dano. 4. Plasticidade. 5. Interação de falhas. I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Quispe, Roberto Quevedo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus, meu porto seguro que me deu a oportunidade, a força e a paz que excede todo entendimento (Filipenses 4:6,7) para sonhar e alcançar mais um objetivo de vida mediante a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, que sempre se empenharam e nunca mediram esforços para me proporcionar tudo que houvesse de melhor ao seu alcance. Vocês me ensinaram a resiliência que precisei ter para chegar até aqui. Agradeço por me incentivarem e acreditarem em mim. Eu amo vocês incondicionalmente.

À minha irmã mais nova, que me apoiou e me amou nos dias difíceis. À minha irmã mais velha de consideração (Tia Leudiana), por todos os bons conselhos e por ser um ombro amigo.

À minha orientadora Deane Roehl, pelo conhecimento transmitido, bem como toda confiança, compreensão e todo apoio prestados no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu coorientador Roberto Quevedo, pelos ensinamentos e por todos os conselhos, sugestões e incentivos, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À banca examinadora, pela disponibilidade e por agregar à pesquisa com as devidas contribuições.

A todos os amigos e professores que contribuíram de alguma forma para a conclusão de mais esta etapa da vida. Em especial, ao professor Eduardo Leite da Universidade de Fortaleza pelo incentivo à caminhada na vida acadêmica.

A todos os colegas do Instituto Tecgraf/PUC-Rio. Um agradecimento especial aos colegas do grupo Geoband: Alexandre Zanatta, Francisco Dias, Luis Felipe, Marcello Congro, Paul Ortega e Pedro Lobo.

Aos professores e funcionários da PUC-Rio, por todas as contribuições prestadas.

À PUC-Rio e ao Instituto Tecgraf/PUC-Rio, pelo auxílio concedido e pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

Resumo

Oliveira, Karoline Nunes; Roehl, Deane de Mesquita (Orientadora); Quispe, Roberto Juan Quevedo (Co-orientador). **Modelagem numérica em elementos finitos para caracterização de zonas de dano em falhas geológicas**. Rio de Janeiro, 2023. 122 . Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Zonas de falha são estruturas geológicas usualmente presentes em subsuperfície. Na indústria de óleo e gás, tais estruturas podem trazer diferentes impactos, tanto no comportamento geomecânico dos campos quanto na produção nos reservatórios. Em geral, as zonas de falha são compostas pelo núcleo e pela zona de dano. O núcleo é responsável pela compartimentalização de reservatórios atuando como barreira para a passagem de fluidos. A zona de dano, região de rocha deformada adjacente ao núcleo, pode ter um impacto direto na produção, criando caminhos de fluxo preferencial ou barreiras, dependendo das feições geológicas formadas no processo de deformação. Enquanto o núcleo pode ser caracterizado com larguras da ordem de centímetros a alguns metros, as larguras das zonas de dano são uma grande incerteza. Este trabalho apresenta uma metodologia para a modelagem numérica da geração de zonas de dano. A metodologia é baseada no método de elementos finitos, em modelos constitutivos elastoplásticos representativos do comportamento geomecânico de rochas, e na aplicação de deslocamentos prescritos (rejeito) para simular o processo de formação da falha. Diversos cenários são analisados considerando o impacto dos parâmetros geomecânicos das rochas e as distâncias relativas entre duas falhas na definição das zonas de dano. Em seguida, a metodologia é utilizada para a análise de regiões favoráveis à trajetória de um poço de produção localizado entre três falhas geológicas. Os resultados obtidos demonstram que a metodologia proposta pode servir como base para caracterizar as zonas de dano em falhas geológicas.

Palavras-chave

Falhas geológicas; zona de dano; plasticidade.

Abstract

Oliveira, Karoline Nunes; Roehl, Deane de Mesquita (Advisor); Quispe, Roberto Juan Quevedo (Co-advisor). **Numerical modeling using the finite element method for characterization of fault damage zones.** Rio de Janeiro, 2023. 122 . Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Fault zones are geological structures usually present in subsurface. In the oil and gas industry, such structures can have different impacts on geomechanical behavior and on reservoir production. In general, fault zones are composed by a core and a damage zone. The core is responsible for the compartmentalization of reservoirs, acting usually as a barrier for fluid flow. The damage zone is the region of rock deformed adjacent to the core that may directly impact on production, creating preferential flow paths or barriers, depending on the geological features triggered in the deformation process. While the core width can be in the order of centimeters to a few meters, the damage zone width is uncertain. This work presents a methodology for numerical modeling of the generation of damage zones. The methodology is based on finite element method, elastoplastic constitutive models representative of the geomechanical behavior of rocks, and on the application of prescribed displacements to simulate the fault formation process. Several scenarios are analyzed considering the impact of the geomechanical parameters of rocks and the relative distances between two faults to characterize the damage zones. Then, the methodology is used to analyze regions favorable to the trajectory of a production well located between three geological faults. The obtained results demonstrate that the proposed methodology can serve as a basis for characterizing damage zones in geological faults.

Keywords

Geological faults; damage zone; plasticity.

Sumário

1 Introdução	20
1.1. Motivação e justificativa	21
1.2. Objetivos	22
1.3. Estrutura da Dissertação	22
2 Fundamentos da geologia estrutural	23
2.1. Zonas de falha	23
2.2. Zonas de dano	27
2.3. Impacto das estruturas geológicas na permeabilidade da zona de falha.	30
3 Modelagem numérica de zonas de dano	35
3.1. Geometria e malha	35
3.2. Condições iniciais e de contorno	36
3.3. Modelos constitutivos	39
3.3.1. Mohr Coulomb (MHC)	43
3.3.2. Soft Rock Plasticity (SR3)	46
3.3.3. Equivalência de parâmetros entre o MHC e o SR3	50
3.4. Medição da zona de dano	52
4 Análise numérica	55
4.1. Dados do modelo	55
4.2. Análise paramétrica	60
4.2.1. Influência dos parâmetros usando o modelo MHC	61
4.2.2. Influência dos parâmetros usando o modelo SR3	68
4.3. MHCxSR3: Comparação da zona de dano resultante de uma falha isolada	77
4.4. MHCxSR3: Comparação da zona de dano resultante da conexão entre duas falhas	87

5 Estudo de caso	97
5.1. Descrição do problema	97
5.2. Dados	97
5.3. Definição dos cenários	99
5.4. Resultados e discussões	100
5.4.1. Seções verticais: Simulação do rejeito normal da falha	101
5.4.2. Seções horizontais: Simulação do rejeito horizontal da falha	109
6 Considerações finais	114
6.1. Conclusões	114
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	116
Referências bibliográficas	118

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Caracterização de falhas geológicas através da (a) interpretação sísmica e da (b) realidade geológica (Adaptado de Andrade, 2021).	21
Figura 2.1 – Classificação de acordo com o movimento relativo dos blocos rochosos e a disposição das tensões principais para (a) falhas normais, (b) falhas reversas, (c) falhas transcorrentes sinistras e (d) falhas transcorrentes destrais (Adaptado de Fossen, 2010).	24
Figura 2.2 – Combinação de movimentos horizontais e verticais de falhas oblíquas (Adaptado de Fossen, 2010).	25
Figura 2.3 – (a) Perspectiva de uma vista em mapa e (b) seção vertical de uma falha (Adaptado de Fossen, 2010)	25
Figura 2.4 – (a) Esquema ilustrativo da distribuição de deslocamento em uma falha isolada; (b) zona de dano, considerando seções horizontais e verticais; (c) terminologia de descrição da geometria da falha (Adaptado de Fossen, 2010; Kim e Sanderson, 2005).	26
Figura 2.5 – Tipos de distribuição do deslocamento (D) ao longo do comprimento de falha (L), considerando os tipos: (a) pico, (b) forma de sino e (c) platô (Fossen, 2010).	27
Figura 2.6 – Falha capturada aproximadamente no mesmo local por meio da geração de dados sísmicos (Adaptado de Faleide <i>et al.</i> , 2021).	28
Figura 2.7 – Esquema para delimitação da zona de dano com base na curva de frequência acumulada de fraturas (Adaptado de Mayolle <i>et al.</i> , 2019).	29
Figura 2.8 – Diferentes tipos de zona de dano, incluindo os termos de zonas de dano de aproximação e de interseção (Adaptado de Peacock <i>et al.</i> , 2017a)	30
Figura 2.9– Classificação cinemática das bandas de deformação (Adaptado de Fossen <i>et al.</i> , 2007).	31
Figura 2.10 – Modelos conceituais da representação da zona de falha com base na permeabilidade da zona de dano e do núcleo de falha (Adaptado de Rohmer <i>et al.</i> , 2015).	33

Figura 2.11 – Desenvolvimento de rampa de revezamento pela interação de falhas normais (Adaptado de Crider e Peacock, 2004).	34
Figura 3.1 – (a) Seção vertical em plano de falha e (b) representação da falha por duas linhas sobrepostas de movimentação independente com (c) discretização de malha de elementos finitos.	36
Figura 3.2 – Esquema de representação das tensões iniciais no modelo.	37
Figura 3.3 – Distribuição do deslocamento incremental com variação parabólica considerando o modelo de comprimento de falha constante.	38
Figura 3.4 – Relação entre o deslocamento máximo e comprimento de falha para falhas normais, reversas e transcorrentes (Adaptado de Torabi e Berg, 2011).	39
Figura 3.5 – Tipos de diagrama tensão-deformação de modelos elásticos uniaxiais.	40
Figura 3.6- Representação de um (a) segmento da superfície potencial plástico e da (b) curva potencial plástico com as componentes do incremento de deformação plástica (Adaptado de Potts e Zdravkovic,, 1999).	42
Figura 3.7 – Representação do critério de Mohr-Coulomb.	43
Figura 3.8 – Representação da superfície de plastificação de Mohr Coulomb no (a) espaço das tensões principais e no (b) plano desviador (Adaptado de Dassault Systèmes Simulia, 2021 e de Davis e Selvadurai, 2002).	44
Figura 3.9 – Função potencial plástico no (a) plano meridional e no (b) plano desviador (Adaptado de Menetrey e Willam, 1995)	45
Figura 3.10 - Superfície de plastificação do SR3 no plano $p - q$ (Adaptado de Ferrill; et al, 2020).	48
Figura 3.11 - Representação da superfície de plastificação do SR3 no (a) plano p-q, no (b) plano desviador e com (c) influência da excentricidade (Adaptado de Crook <i>et al.</i> , 2006 e Dassault Systèmes Simulia, 2021)	48
Figura 3.12 – Correlação da porosidade com a pressão crítica para carbonatos definida com base no conjunto de dados do projeto Carbfault (Fisher <i>et al.</i> , 2018).	49
Figura 3.13 – Superfície potencial plástico do modelo SR3 e definição dos incrementos de deformações dilatantes e compressivas.	50

Figura 3.14 – Equivalência dos modelos MHC e SR3 no valor da coesão.	51
Figura 3.15 – Medição da largura da zona de dano.	54
Figura 4.1 – Geometria e malha de elementos finitos do modelo com uma falha isolada.	57
Figura 4.2 – (a) Tensões iniciais aplicadas ao modelo e (b) Inicialização do modelo com deslocamentos nulos.	58
Figura 4.3 – Incremento final de deslocamento considerando os modelos constitutivos (a) MHC e (b) SR3.	59
Figura 4.4 – Delimitação da zona de dano de uma falha isolada com PEMAG mínimo de 0.1.	60
Figura 4.5 – Relação DxW para variação do ângulo de atrito na modelagem com o MHC.	62
Figura 4.6 - Relação DxW para variação do ângulo de dilatância na modelagem com o MHC.	63
Figura 4.7 – Variação das componentes de deformação plástica com a variação da inclinação da superfície potencial plástico do MHC.	64
Figura 4.8 - Relação DxW para variação da coesão na modelagem com o MHC.	65
Figura 4.9 - Relação DxW para variação do gradiente de tensões efetivas vertical na modelagem com o MHC.	66
Figura 4.10 - Relação DxW para a variação do deslocamento máximo na modelagem com o MHC.	67
Figura 4.11 – Relação DxW para variação do PEMAG mínimo na modelagem com o MHC.	68
Figura 4.12 – Relação DxW para variação do ângulo de atrito na modelagem com SR3.	69
Figura 4.13 – Relação DxW para variação do ângulo de dilatância na modelagem com SR3.	69
Figura 4.14 – Variação das componentes de deformação plástica com a variação da inclinação da superfície potencial plástico do SR3.	70
Figura 4.15 – Relação DxW para variação da coesão na modelagem com SR3.	70
Figura 4.16 - Relação DxW para variação do gradiente de tensões efetivas vertical na modelagem com SR3.	71

Figura 4.17 - Relação DxW para variação do PEMAG mínimo na modelagem com SR3.	72
Figura 4.18 - Relação DxW obtida com variável PEMAG para variação do $Dmáx$ na modelagem com SR3.	73
Figura 4.19 – Evolução da variável PEMAG ao longo da análise.	73
Figura 4.20 - Evolução da variável PEEQ ao longo da análise.	74
Figura 4.21 - Relação DxW com obtida com variável PEEQ para variação do $Dmáx$ na modelagem com SR3	75
Figura 4.22 – Distribuição da zona de dano ao longo da falha considerando os valores de p_c de 240 MPa e 70 MPa com esquematização do mecanismo de deformação de uma falha normal.	76
Figura 4.23 – Distribuição da variável PEMAG em uma falha isolada para o MHC e para o SR3 com valor de pressão crítica de 240 MPa e de 70 MPa.	78
Figura 4.24 – Delimitação da zona de dano ao longo da falha para diferentes modelos.	79
Figura 4.25 - Trajetória de tensões do modelo de MHC para uma falha.	80
Figura 4.26 - Trajetória de deformações do modelo de MHC para uma falha.	81
Figura 4.27 - Trajetória de tensões do modelo SR3 com pressão crítica de 240 MPa para uma falha.	82
Figura 4.28 - Trajetória de deformações do modelo SR3 com pressão crítica de 240 MPa para uma falha.	82
Figura 4.29 - Trajetória de tensões do modelo SR3 com pressão crítica de 70 MPa para uma falha.	83
Figura 4.30 - Trajetória de deformações do modelo SR3 com pressão crítica de 70 MPa para uma falha.	84
Figura 4.31 – Trajetória das tensões da extremidade superior considerando MHC e SR3 de baixa porosidade.	85
Figura 4.32 - Trajetória das tensões da extremidade superior considerando MHC e SR3 de alta porosidade.	85
Figura 4.33 - Trajetória das tensões do centro da falha considerando MHC e SR3 de baixa porosidade.	86
Figura 4.34 - Trajetória das tensões do centro da falha considerando MHC e SR3 de alta porosidade.	86

Figura 4.35 - Trajetória das tensões da extremidade inferior considerando MHC e SR3 de baixa porosidade.	87
Figura 4.36 - Trajetória das tensões da extremidade inferior considerando MHC e SR3 de alta porosidade.	87
Figura 4.37 – Configuração geométrica dos grupos de análise do estudo paramétrico da interação entre duas falhas considerando $L = 500$ m e $\theta = 60^\circ$.	88
Figura 4.38 – Trajetórias de tensão referente ao modelo M2.	90
Figura 4.39 - Trajetórias de deformação referente ao modelo M2.	90
Figura 4.40 - Trajetórias de tensão referente ao modelo M4.	91
Figura 4.41 - Trajetórias de deformação referente ao modelo M4.	91
Figura 4.42 - Trajetórias de tensão referente ao modelo M3.	93
Figura 4.43 - Trajetórias de deformação referente ao modelo M3.	93
Figura 4.44 - Trajetórias de tensão referente ao modelo M10.	95
Figura 4.45 - Trajetórias de deformação referente ao modelo M10.	95
Figura 4.46 - Trajetórias de tensão referente ao modelo M12.	96
Figura 4.47 - Trajetórias de deformação referente ao modelo M12.	96
Figura 5.1 – Superfície das falhas, dos horizontes, e trajetória do poço do estudo de caso.	98
Figura 5.2 – (a) Trajetória do poço na região entre falhas e (b) representação da irregularidades nas superfícies das falhas.	98
Figura 5.3 – (a) Esquema com conjunto de seções verticais para definição dos (b) planos de análise do estudo de caso.	99
Figura 5.4 – Seções horizontais para análise do movimento transcorrente do estudo de caso.	100
Figura 5.5 - Movimento transcorrente destal e sinistral na configuração de falhas do estudo de caso.	100
Figura 5.6 – Representação das deformações na seção vertical A, através da variável PEMAG com limite mínimo de (a) 0.1 e (b) 0.001.	101
Figura 5.7 – Distribuição da variável PEMAG na seção vertical A.	102
Figura 5.8 – Trajetória das tensões dos pontos definidos na seção A.	103

Figura 5.9 - Trajetória das deformações dos pontos definidos na seção B	103
Figura 5.10 - Distribuição da variável PEMAG na seção vertical B.	104
Figura 5.11 - Trajetória das tensões dos pontos definidos na seção B.	104
Figura 5.12 - Trajetória das deformações dos pontos definidos na seção B.	105
Figura 5.13 - Distribuição da variável PEMAG na seção vertical C.	106
Figura 5.14 - Trajetória das tensões dos pontos definidos na seção C.	106
Figura 5.15 - Trajetória das deformações dos pontos definidos na seção C.	106
Figura 5.16 - Distribuição da variável PEMAG na seção vertical D.	107
Figura 5.17 - Trajetória das tensões dos pontos definidos na seção D.	108
Figura 5.18 - Trajetória das deformações dos pontos definidos na seção D.	108
Figura 5.19 - Distribuição da variável PEMAG na seção horizontal S1 para deslocamento transcorrente destrai.	109
Figura 5.20 - Distribuição da variável PEMAG na seção horizontal S2 para deslocamento transcorrente destrai.	110
Figura 5.21 - Trajetória das tensões dos pontos definidos nas seções horizontais S1 e S2 para deslocamento destrai.	110
Figura 5.22 - Trajetória das deformações dos pontos definidos nas seções horizontais S1 e S2 para deslocamento destrai.	111
Figura 5.23 - Distribuição da variável PEMAG na seção horizontal S1 para deslocamento transcorrente sinistral.	111
Figura 5.24 - Distribuição da variável PEMAG na seção horizontal S1 para deslocamento transcorrente sinistral.	112
Figura 5.25 - Trajetória das tensões dos pontos definidos nas seções horizontais S1 e S2 para deslocamento sinistral.	113
Figura 5.26 - Trajetória das deformações dos pontos definidos nas seções horizontais S1 e S2 para deslocamento sinistral.	113

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros geomecânicos do material.	56
Tabela 2 – Parâmetros do material para o SR3.	56
Tabela 3 – Valores adotados para geração dos modelos de análise paramétrica.	61
Tabela 4 - Medição da largura da zona de dano considerando um limite mínimo de 0.10 para as variáveis PEMAG e PEEQ.	75
Tabela 5 – Resultados da variável PEMAG para o grupo 1.	89
Tabela 6 - Resultados da variável PEMAG para o grupo 2.	92
Tabela 7 - Resultados da variável PEMAG para o grupo 3.	94

Lista de Símbolos

c	Coesão;
D	Deslocamento total no passo atual;
$D_{máx}$	Deslocamento máximo equivalente ao rejeito da falha;
E	Módulo de Young;
e_0	Excentricidade do SR3 no plano meridional;
e	Excentricidade do MHC no plano desviador;
f_0	Parâmetro do material aplicado no SR3;
f_1	Parâmetro do material aplicado no SR3;
H'	Traço de altura da falha;
H	Altura da falha;
h	Distância medida a partir de uma das extremidades da falha;
K_0	Coefficiente lateral;
k	Parâmetro de estado da função de plastificação;
L'	Traço de comprimento da falha;
L	Comprimento da falha;
m	Parâmetro de estado da função potencial plástico;
n	Vetor normal à superfície potencial plástico;
n_y	Parâmetro de forma do SR3 no plano meridional;
p'	Tensão média efetiva;
p	Tensão octaédrica ou tensão média;
p_c	Tensão de plastificação na compressão hidrostática, pressão crítica;
p_c^0	Valor inicial de p_c ;
p_t	Tensão de plastificação na tração hidrostática;
q	Tensão de von Mises ou de desvio;
$q_{MHC}^{p'=0}$	Tensão de desvio do MHC quando tensão média efetiva é nula;
$q_{SR3}^{p'=0}$	Tensão de desvio do SR3 quando tensão média efetiva é nula;
r	Terceiro invariante do tensor de tensões;

s_1	Componente principal máxima do tensor de tensões de desvio;
s_2	Componente principal intermediária do tensor de tensões de desvio;
s_3	Componente principal mínima do tensor de tensões de desvio;
ν	Coefficiente de Poisson;
z	Profundidade;
W	Largura da zona de dano
α	Parâmetro do material aplicado no SR3;
β	Ângulo obtido em função do ângulo de atrito;
γ	Multiplicador plástico;
$\Delta\varepsilon_{dev}$	Incremento de deformação total desviadora;
$\Delta\varepsilon_{vol}$	Incremento de deformação total volumétrica;
$\Delta\varepsilon^p$	Incremento de deformação plástica;
$\Delta\varepsilon_1^p$	Incremento de deformação plástica principal máxima;
$\Delta\varepsilon_2^p$	Incremento de deformação plástica principal intermediária;
$\Delta\varepsilon_3^p$	Incremento de deformação plástica principal mínima;
$\Delta\varepsilon_{vol}^p$	Incremento de deformação plástica volumétrica;
$\partial\sigma'_v$	Variação da tensão efetiva vertical;
∂Z	Variação da profundidade;
ε	Deformação total acumulada;
ε^p	Deformação plástica acumulada;
ε_1^p	Deformação plástica acumulada principal máxima;
ε_2^p	Deformação plástica acumulada principal intermediária;
ε_3^p	Deformação plástica acumulada principal mínima;
$\bar{\varepsilon}_p _0$	Deformação plástica equivalente inicial;
ϵ	Excentricidade do MHC no plano meridional;
θ	Ângulo de Lode;
θ	Ângulo de mergulho;
σ	Tensor de tensões;
σ	Tensão total acumulada;
σ'_h	Tensão efetiva horizontal;
σ'_v	Tensão efetiva horizontal;
σ_1	Tensão principal máxima;

σ_2	Tensão principal intermediária;
σ_3	Tensão principal mínima;
ϕ	Porosidade;
φ	Ângulo de atrito;
Ψ	Ângulo obtido em função do ângulo de dilatação;
ψ	Ângulo de dilatação;

1 Introdução

As falhas geológicas são formações resultantes do movimento relativo de blocos rochosos. As zonas de falhas são regiões complexas formadas por múltiplas superfícies de deslizamento, fraturas subsidiárias e, talvez, bandas de deformação, a depender da porosidade inicial da rocha submetida ao mecanismo de deformação. (Fossen e Rotevatn, 2016; Torabi *et al.*, 2020). A arquitetura das falhas apresenta um núcleo com maiores níveis de deformação e uma zona de dano adjacente, com uma menor intensidade de deformações, mas abrange um maior volume de rocha. O núcleo, quando inativo, funciona como uma barreira de permeabilidade, com isso, se torna responsável por compartimentalizar inúmeros reservatórios de óleo e gás (Mayolle *et al.*, 2019).

Rochas de alta porosidade respondem às variações de tensão com quebra e reorganização dos grãos, e colapso de poros, resultando em diferentes bandas de deformação. Por outro lado, rochas de baixa porosidade respondem à variação das tensões gerando fraturas e fissuras. Estas estruturas geológicas impactam nas propriedades da rocha, podendo criar caminhos preferenciais para o fluxo de fluidos quando as fraturas são dominantes, ou barreiras ao fluxo, quando há estruturas de compactação (Choi *et al.*, 2016).

Em geral, os modelos sísmicos simplificam a zona de falha através de uma superfície de deslizamento, desconsiderando a zona de dano no entorno, conforme Figura 1.1a. No entanto, essa representação é inconsistente com a realidade geológica das falhas observadas em campo (Figura 1.1b). As falhas não são superfícies discretas, mas descontinuidades com zonas de falha de largura finita e com propriedades diferentes da rocha hospedeira (Faleide *et al.*, 2021; Wibberley; *et al.*, 2008).

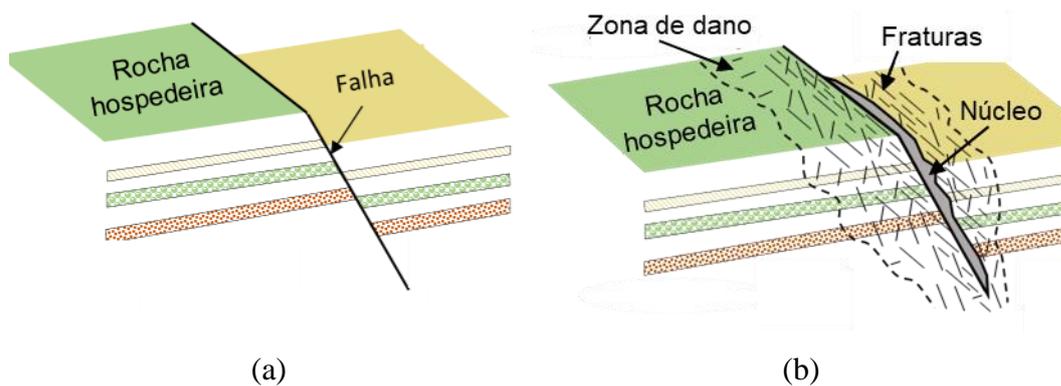


Figura 1.1 – Caracterização de falhas geológicas através da (a) interpretação sísmica e da (b) realidade geológica (Adaptado de Andrade, 2021).

1.1. Motivação e justificativa

O estudo e a caracterização das zonas de dano são de grande interesse para o desenvolvimento de estratégias de produção e exploração nas indústrias de petróleo e gás. Trabalhos como o de Paul *et al.* (2007) e Hennings *et al.* (2012) mostram que poços que atravessam regiões com a presença de redes de fraturas, ainda que seja em rochas de baixa porosidade, possuem altas taxas de produtividade, devido à permeabilidade associada a essas estruturas geológicas nos reservatórios.

No entanto, ainda existem muitas incertezas no que se diz respeito à definição das estruturas geológicas que compõem a região da zona de dano, bem como a sua extensão e propagação, em especial nos casos que envolvem interação de falhas. Observações de campo são superficiais e não possibilitam o estudo do volume de deformação da rocha que a zona de dano abrange. Falhas na subsuperfície, geralmente são caracterizadas pela sísmica, ainda que sem resoluções que possibilitem caracterizar de forma mais detalhada essas estruturas.

Métodos numéricos permitem analisar diferentes situações, cenários, e incertezas, e simular o comportamento das rochas, bem como da evolução e formação das zonas de dano. Nesse contexto, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é largamente utilizado, pois permite a modelagem de estruturas geológicas com geometrias complexas submetidas a carregamentos e comportamentos não lineares. Adicionalmente, o MEF possibilita a avaliação de tensões, deslocamentos e deformações em domínios de interesse além dos pontos de observação.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é o aprimoramento de uma metodologia para caracterização das zonas de dano em falhas geológicas, visando a delimitação dessa região a partir dos mecanismos de deformação que levaram à sua formação.

Um objetivo secundário é analisar a influência dos parâmetros de entrada do modelo: geometria, materiais e condições de campo no desenvolvimento da zona de dano obtida.

Por fim, busca-se aplicar a metodologia proposta para simular um estudo de caso e analisar a aplicabilidade do trabalho proposto na simulação de falhas reais. O tema de pesquisa do presente trabalho está inserido no contexto do projeto de pesquisa colaborativa entre PUC-Rio e a Petrobras com o título “GeoBand – Geomodelagem de zona de dano em falhas geológicas”.

1.3. Estrutura da Dissertação

Além da introdução, esta dissertação é estruturada em outros cinco capítulos:

- O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos fundamentos da geologia estrutural necessária para o embasamento do trabalho.

- No capítulo 3 é apresentada a metodologia para modelagem numérica das zonas de dano. É descrita a geometria, a malha, as condições iniciais e de contorno, bem como os modelos constitutivos adotados na descrição do comportamento das rochas considerado nas simulações

- No capítulo 4 são apresentados resultados de análises numéricas empregando a metodologia apresentada. As análises caracterizam as zonas de dano de falhas isolada, bem como a zona de dano de conexão entre falhas. Também é analisada a influência dos parâmetros do modelo na geração da zona de dano.

- O capítulo 5 apresenta os resultados do estudo de caso de com a aplicação da metodologia para simulação de um campo do pré-sal brasileiro em que um poço de produção é perfurado entre três falhas geológicas.

- No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas diante das análises realizadas, como também sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentos da geologia estrutural

A geologia estrutural descreve sobre como e por que falhas geológicas, bem como outras estruturas de deformação, se desenvolvem na litosfera. Essas estruturas ocorrem em diferentes ambientes e estão sujeitas a alterações em seu campo de tensão e deformação. O estudo e a interpretação de estruturas geológicas são de interesse à sociedade em diversos aspectos, como na necessidade de se ter previsões razoáveis para mapeamento e exploração de recursos (Fossen, 2010).

2.1. Zonas de falha

As zonas de falha são estruturas geológicas complexas formadas por diferentes mecanismos de deformação nas rochas. Essas estruturas incluem um núcleo e uma zona de dano que concentram diferentes níveis de deformação. Os estudos referentes a caracterização dessas zonas de falha comumente envolvem observações de campo, experimentos em laboratórios, sismologia, hidrogeologia e modelagem analítica e numérica (Choi *et al.*, 2016; Faulkner *et al.*, 2010; Mayolle *et al.*, 2019; Qu e Tveranger, 2016; Torabi *et al.*, 2020)

O núcleo da falha se forma a partir da concentração de elevadas tensões cisalhantes, gerando zonas com grandes deformações. No entanto, a zona de dano adjacente ao núcleo da falha é caracterizada por concentrações de tensão e deformação menos pronunciadas. Esta zona é constituída por uma rede de estruturas subsidiárias mecanicamente relacionada ao crescimento da zona de falha. A depender do tipo de estrutura que se forma na zona de dano, esta pode atuar como uma barreira ou favorecer o fluxo de fluidos. O núcleo pode funcionar como um conduto de fluidos durante a deformação ou como uma barreira quando os vazios são preenchidos por materiais porosos resultantes da precipitação mineral após a deformação (Caine *et al.*, 1996; Choi *et al.*, 2016).

Os mecanismos de deformação que geram as zonas de falha estão relacionados ao movimento dos blocos rochosos em relação à superfície de falha

(Fossen, 2010). A identificação do movimento relativo dos blocos rochosos é fundamental para a classificação do tipo de falha. As falhas normais são caracterizadas por acomodar o movimento descendente do *teto* com relação ao *muro* (Figura 2.1a). O oposto ocorre no caso de falhas reversas (Figura 2.1b), nas quais, com um mergulho relativamente raso, o teto se move para cima em relação ao muro (Pollard e Fletcher, 2006; Zoback, 2007). Quando o movimento ocorre principalmente no plano horizontal, ou seja, os blocos rochosos movimentam-se lateralmente, ocorrem as falhas transcorrentes. Estas são classificadas como transcorrentes sinistras (Figura 2.1c) quando o bloco da lateral esquerda está à frente. Caso contrário, o movimento é classificado como transcorrente dextral (Figura 2.1d) (das palavras latinas *sinister* e *dexter*, que significam esquerda e direita, respectivamente). A classificação tradicional das tensões tectônicas assume que uma das tensões principais é vertical, enquanto as outras duas são horizontais. Assim, dependendo da disposição das tensões, 3 regimes de deformação são definidos: regime de falha normal, regime de falha reversa e regime de falha transcorrente (Fossen, 2010).

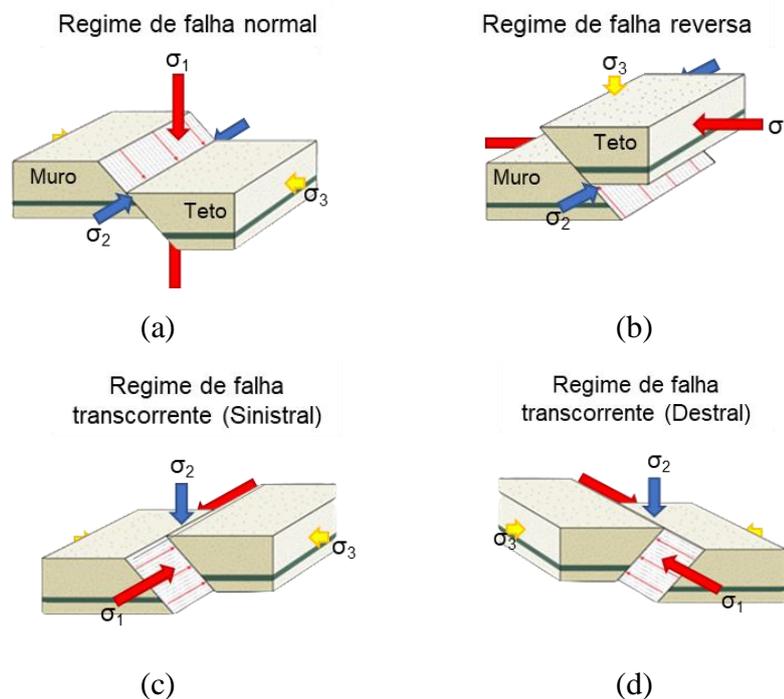


Figura 2.1 – Classificação de acordo com o movimento relativo dos blocos rochosos e a disposição das tensões principais para (a) falhas normais, (b) falhas reversas, (c) falhas transcorrentes sinistras e (d) falhas transcorrentes dextrais (Adaptado de Fossen, 2010).

No entanto, muitas falhas apresentam um comportamento combinado, com componentes de movimentação horizontal (transcorrente) e vertical (normal ou

reversa). Esse mecanismo de deformação é característico de falha oblíqua (Figura 2.2). Os rejeitos horizontal e vertical são observados, respectivamente, através de uma vista em mapa e de uma seção vertical no plano de falha, conforme Figura 2.3 (Fossen, 2010).

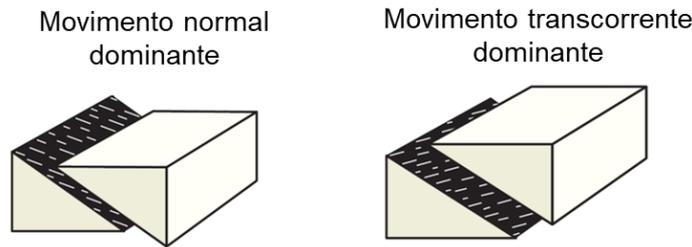


Figura 2.2 – Combinação de movimentos horizontais e verticais de falhas oblíquas (Adaptado de Fossen, 2010).

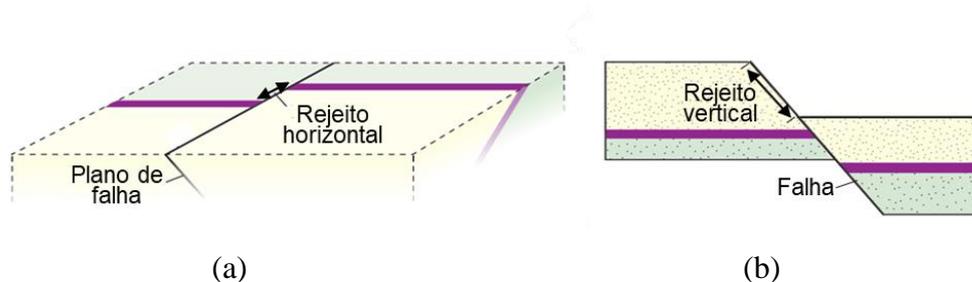


Figura 2.3 – (a) Perspectiva de uma vista em mapa e (b) seção vertical de uma falha (Adaptado de Fossen, 2010)

Em ambas as direções, as falhas isoladas tendem a apresentar um deslocamento que varia ao longo da superfície (Fossen, 2010; Kim e Sanderson, 2005). O deslocamento é nulo nas extremidades e aumenta gradativamente em direção ao centro onde ocorre o deslocamento máximo ($D_{máx}$) ocorre (Childs *et al.*, 2002; Peacock e Sanderson, 1991). As falhas geológicas não são estritamente representadas por esse modelo simples pois existem fatores como a interação de falhas, a anisotropia que surge das diferenças reológicas entre as camadas e sua interação com a superfície livre. No entanto, a grande maioria das falhas pode ser caracterizada como uma variação dessa premissa básica, conforme Figura 2.4a (Walsh *et al.*, 2003). A *largura da zona de dano* (W do inglês *Width*) é utilizada para indicar, em um plano de corte, a extensão da zona de dano gerada pelo deslocamento dos blocos rochosos (Figura 2.4b). Kim e Sanderson (2005) propõem uma terminologia para descrição da geometria da zona de falha, conforme Figura 2.4c. O *comprimento* (L do inglês *Length*) é a maior dimensão horizontal da

superfície de falha e o *traço de comprimento* (L') é o comprimento correspondente a uma seção horizontal arbitrária. De modo semelhante, a maior dimensão vertical na superfície de falha é denominada *altura* (H do inglês *Height*), enquanto uma seção vertical arbitrária apresenta o *traço de altura* (H').

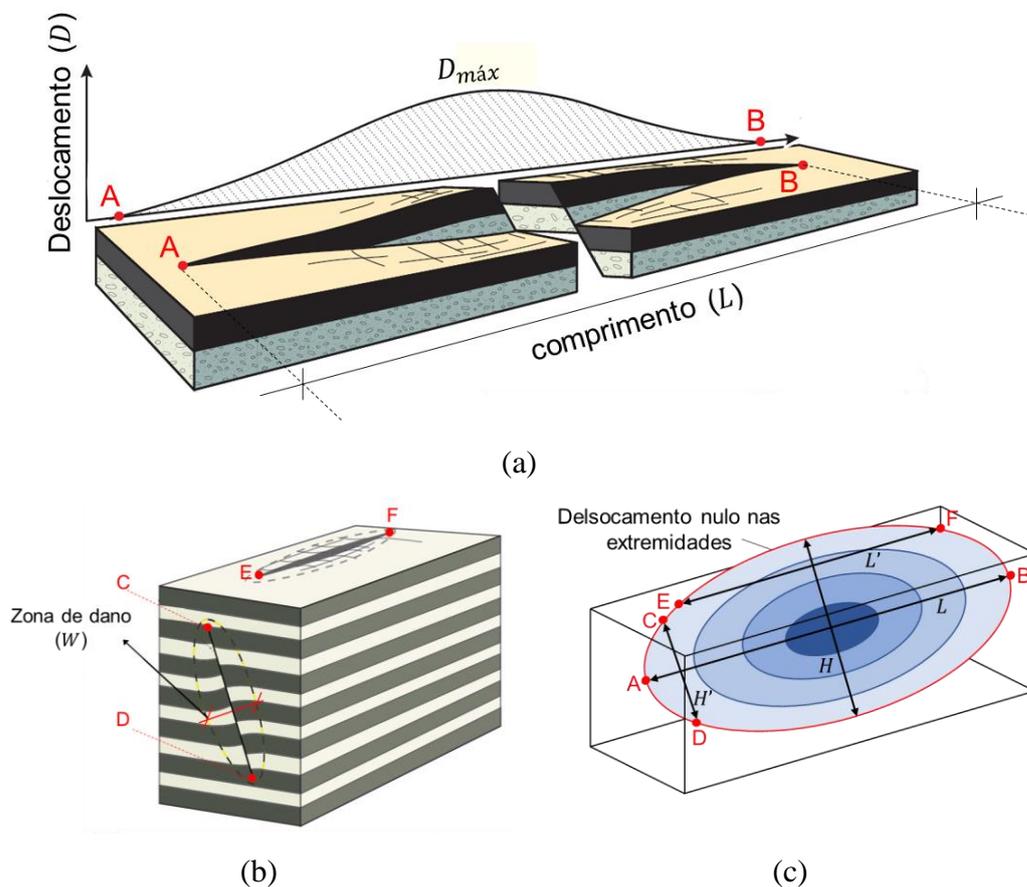


Figura 2.4 – (a) Esquema ilustrativo da distribuição de deslocamento em uma falha isolada; (b) zona de dano, considerando seções horizontais e verticais; (c) terminologia de descrição da geometria da falha (Adaptado de Fossen, 2010; Kim e Sanderson, 2005).

A distribuição do deslocamento ao longo do comprimento ou da altura da falha pode variar de um formato aproximadamente linear, para um formato de sino ou elíptico, conforme Figura 2.5 (Fossen, 2010).

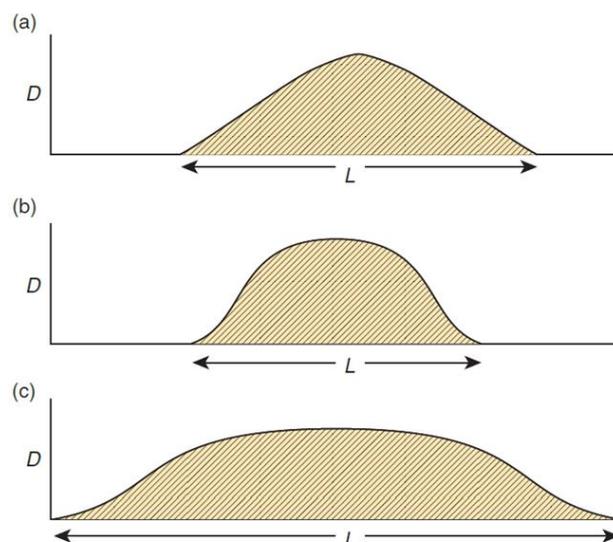


Figura 2.5 – Tipos de distribuição do deslocamento (D) ao longo do comprimento de falha (L), considerando os tipos: (a) pico, (b) forma de sino e (c) platô (Fossen, 2010).

2.2. Zonas de dano

A zona de dano é o volume de rocha deformada que se encontra nas proximidades da superfície de falha e se desenvolve por diferentes processos, como a iniciação, propagação e interação de falhas. O desenvolvimento de diferentes estruturas dentro da zona de dano fornece informações valiosas sobre a propagação e o crescimento das falhas, o fluxo de fluidos, bem como o início e término de terremotos (Kim *et al.*, 2003; Mayolle *et al.*, 2019; Mcgrath e Davison, 1995; Peacock *et al.*, 2017a)

A interpretação de dados sísmicos é a forma mais comum de identificar e mapear falhas no subsolo, visto que não é possível caracterizar essas falhas com apenas a investigação de afloramentos. Embora o processamento desses dados tenha melhorado nos últimos anos (Figura 2.6), ainda existem limitações quanto à sua resolução e à qualidade para a identificação de geometrias complexas de subsuperfície. Por exemplo, as incertezas na definição de velocidades sísmicas usadas para conversão de profundidade podem dificultar a interpretação da zona de dano e das estruturas que a compõem (Faleide *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2019; Roche *et al.*, 2021)

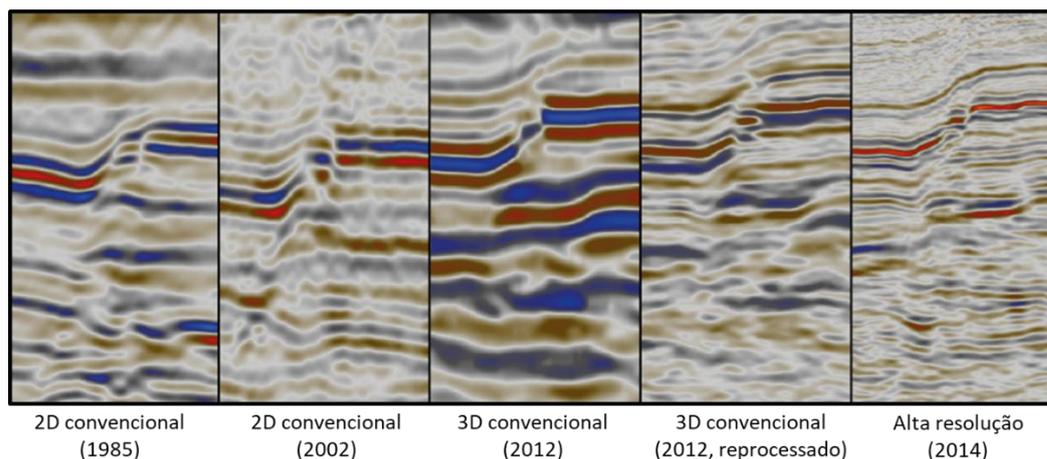


Figura 2.6 – Falha capturada aproximadamente no mesmo local por meio da geração de dados sísmicos (Adaptado de Faleide *et al.*, 2021).

Em função dessas limitações, as zonas de dano têm sido caracterizadas a partir de análises de campo, por meio da observação de afloramentos superficiais (Mayolle *et al.*, 2019). Por exemplo, mudanças na densidade e geometria de fraturas próximas às falhas fornecem um meio para delimitar a zona de dano (Micarelli *et al.*, 2006). O método analítico das linhas de varredura (*scanlines*) é aplicado em diversos estudos para mensurar a largura das zonas de dano (Choi *et al.*, 2016; Mayolle *et al.*, 2019; Torabi *et al.*, 2020). Este método consiste na medição, por metro linear, da frequência de estruturas de dano que cruzam uma determinada linha de amostragem em diferentes pontos ao longo do comprimento de falha. A largura da zona de dano é indicada pela mudança abrupta da inflexão da curva do gráfico de frequência acumulada, como apresenta a Figura 2.7. No entanto, ainda que sejam adotados os mesmos critérios, há incertezas nos dados que podem influenciar os resultados em cada estudo. Essas incertezas estão relacionadas à escolha do intervalo de unidade para o levantamento da *scanline*, bem como à subjetividade dos pesquisadores na definição da densidade de fratura e/ou largura da zona de dano (Choi *et al.*, 2016).

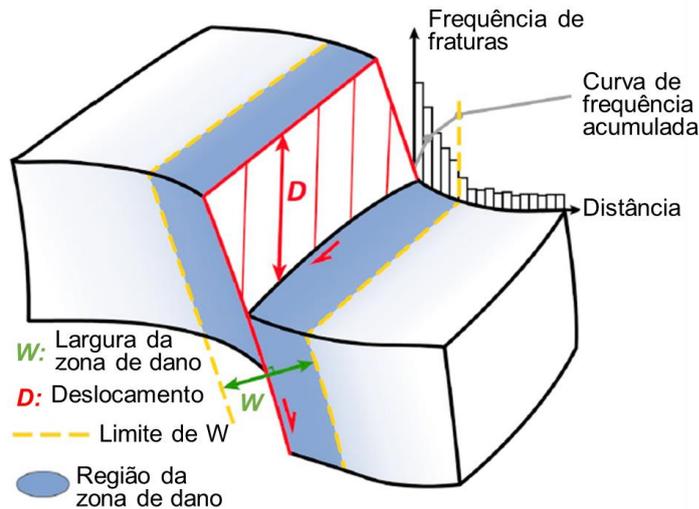


Figura 2.7 – Esquema para delimitação da zona de dano com base na curva de frequência acumulada de fraturas (Adaptado de Mayolle *et al.*, 2019).

Com base na posição relativa da zona de dano dentro da zona de falha, Kim *et al.* (2004) definem três tipos de zona de dano: zona de dano de extremidade, zona de dano de conexão e zona de dano de parede, como apresenta a Figura 2.8. A zona de dano de extremidade se desenvolve em resposta à concentração de tensões ao redor das extremidades ou pontas da falha, podendo apresentar regiões extensionais e contracionais, a depender do mecanismo de formação da falha à qual está associada. Por sua vez, as zonas de dano de parede são resultantes da propagação das falhas na rocha ou do dano associado com o aumento de deslizamento da superfície de falha. A interação das extremidades de duas falhas em uma região relativamente pequena gera as zonas de dano de conexão, que podem apresentar diferentes padrões de fraturas a depender da natureza da interação dos dois segmentos de falha. As diferentes classificações de zona de dano podem se sobrepor, como no caso em que a zona de dano de ponta se desenvolve em zonas de dano de ligação. À medida que a falha progride, essas zonas de dano também podem se transformar em zonas de dano de parede.

Peacock *et al.* (2017b) definem a região resultante da interação entre as extremidades dos segmentos de duas falhas de distintas orientações como zonas de dano de interação. A zona de dano de conexão, citada por Kim *et al.* (2004), seria uma subclasse da classificação de Peacock *et al.* (2017b) relacionada a segmentos de falha subparalelos. A zona de dano de interação pode se comportar como zona de interseção ou zona de aproximação. A zona de dano de interseção ocorre com a

conexão cinemática e geométrica entre as falhas. No entanto, na aproximação, acontece apenas a conexão cinemática, ou seja, há influência no deslocamento de uma falha em relação à outra, mas não estão fisicamente conectadas no plano em que estão sendo observadas. As classificações da zona de dano são ilustradas na Figura 2.8.

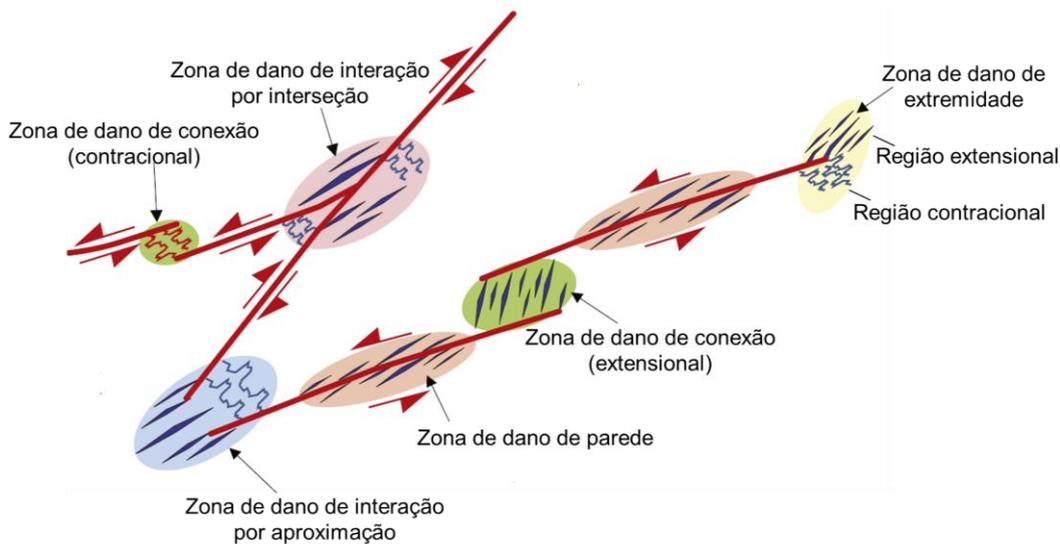


Figura 2.8 – Diferentes tipos de zona de dano, incluindo os termos de zonas de dano de aproximação e de interseção (Adaptado de Peacock *et al.*, 2017a)

Peacock *et al.* (2017a) classificam de forma detalhada as possíveis interações que podem ocorrer entre falhas. O estudo propõe um esquema com base em vários critérios, como: as relações geométricas, o ângulo entre a linha de interseção e a direção do deslocamento, o deslocamento e a deformação na zona de interação, e a relação de idade relativa das falhas. O esquema proposto é aplicável a qualquer tipo de interação de falha e independe de fatores como configuração tectônica e escala.

2.3. Impacto das estruturas geológicas na permeabilidade da zona de falha.

Dependendo das condições anteriores à formação da falha, como a natureza da rocha hospedeira e o estado de tensões, a arquitetura da falha pode variar consideravelmente, podendo apresentar domínios contracionais e/ou dilatacionais caracterizados pela formação de diferentes estruturas geológicas. Em particular, uma tensão média efetiva bastante elevada favorecerá a formação de bandas de

compactação em decorrência do colapso dos poros e do esmagamento dos grãos (Myers e Aydin, 2004).

Em rochas de alta porosidade, a resposta às variações de tensão pode causar mudanças na permeabilidade da rocha por reorganização e quebra de grãos, resultando em diferentes tipos de bandas de deformação. Na predominância de bandas de deformação, as zonas de dano atuam como barreiras para o fluxo de fluidos (Choi *et al.*, 2016). Cinematicamente, as bandas de deformação podem ser classificadas como bandas de dilatação, bandas de cisalhamento ou bandas de compactação. Embora os três tipos ocorram na natureza, dados de campo indicam que modos híbridos dos três citados são os mais comuns em falhas localizadas. Como bandas de cisalhamento compactas ou bandas de cisalhamento dilatantes, conforme Figura 2.9 (Aydin *et al.*, 2006; Fossen *et al.*, 2007).

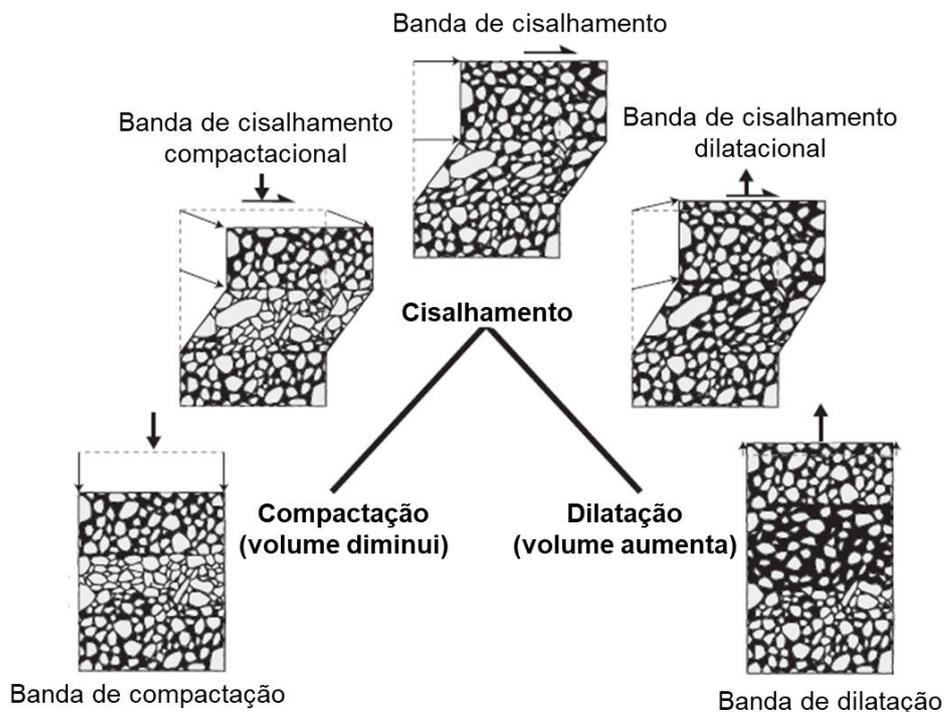


Figura 2.9– Classificação cinemática das bandas de deformação (Adaptado de Fossen *et al.*, 2007).

A região próxima à superfície de deslizamento das falhas possui uma porosidade reduzida em relação à rocha indeformada. Através de uma análise em pequenas seções de rochas carbonáticas, Micarelli *et al.* (2006) reconheceram quatro mecanismos responsáveis por essa redução: colapso dos poros, trituração de grãos, abrasão de partículas maiores e precipitação de cimento de calcita. Colapso de poros e esmagamento de grãos podem resultar em reorientação preferencial de grãos alongados. A abrasão de partículas produz um aumento no teor relativo de

partículas finas em relação ao teor de partículas grossas. Por sua vez, o cimento de calcita preenche os espaços entre as fraturas recentes e a porosidade remanescente.

Os núcleos mostram forte redução de porosidade e permeabilidade. Em alguns casos, esses quatro mecanismos de redução de porosidade coexistem. Comumente, estes mecanismos são sequenciais em função da magnitude do deslocamento, com predominância de um ou mais mecanismos em um estágio específico de evolução da falha. Falhas com pequenos deslocamentos não exibem um núcleo de falha, mas a redução da porosidade e permeabilidade ocorre principalmente por compactação localizada nos primeiros milímetros adjacentes à superfície da falha, que pode, portanto, constituir uma barreira estreita, mas relativamente eficiente, ao fluxo de fluido (Micarelli *et al.*, 2006).

Rochas com baixa porosidade normalmente respondem a mudanças de tensão por faturamento (Choi *et al.*, 2016; Fossen *et al.*, 2007; Torabi *et al.*, 2020). Estas estruturas geológicas podem ter impactos consideráveis na permeabilidade da rocha. Em outras palavras, a zona de dano pode atuar como um conduto se as fraturas forem dominantes (Caine *et al.*, 1996; Rohmer *et al.* 2015). As fraturas são descontinuidades caracterizadas pela quebra das rochas, ou dos minerais, e pela redução ou perda de coesão. São descritas como superfícies, mas a certa escala há uma espessura envolvida. No entanto, possuem uma das direções bastante estreita. O termo “fratura” é utilizado para pequenos deslocamentos, na escala de mm ou dm, enquanto o termo “falha” é aplicado a descontinuidades com deslocamentos maiores. O termo “superfície de deslizamento” é aplicado para fraturas com movimentos de deslocamentos paralelos, consistente com a aplicação para falhas (Fossen, 2010).

Quando as fraturas de cisalhamento altamente conectadas caracterizam as zonas de dano, estas podem facilitar o fluxo de fluido ao longo da falha. Neste caso, o contraste entre zonas de dano de alta permeabilidade e núcleos de falha de baixa permeabilidade acentua o comportamento combinado conduto-barreira de zonas de falha em relação ao fluxo de fluido (Micarelli *et al.*, 2006). Fraturas não conectadas afetam apenas o armazenamento de fluidos, não o fluxo (Matonti *et al.*, 2012).

Rohmer *et al.* (2015) adaptaram o modelo conceitual de Matonti *et al.* (2012) e caracterizaram essa relação entre conduto e barreira a partir de 3 combinações possíveis na zona de falha, conforme ilustrado na Figura 2.10 e descrito a seguir:

1. **Conduto-conduto:** assume uma zona de dano fraturada e um núcleo pouco cimentado. Neste caso, o fluxo de fluidos acontece através e ao longo da falha.
2. **Conduto-Barreira:** caracterizado por um núcleo de baixa porosidade atuando como uma barreira e uma zona de dano com fraturas extensionais, atuando como conduto. A intensidade de fraturas aumenta nas proximidades do núcleo. Neste caso, o fluxo de fluidos acontece ao longo da falha, mas não através desta.
3. **Barreira-Barreira:** considera um núcleo altamente cimentado e uma zona de dano com estruturas de compactação. Neste caso, a zona de falha impede o fluxo de fluidos.

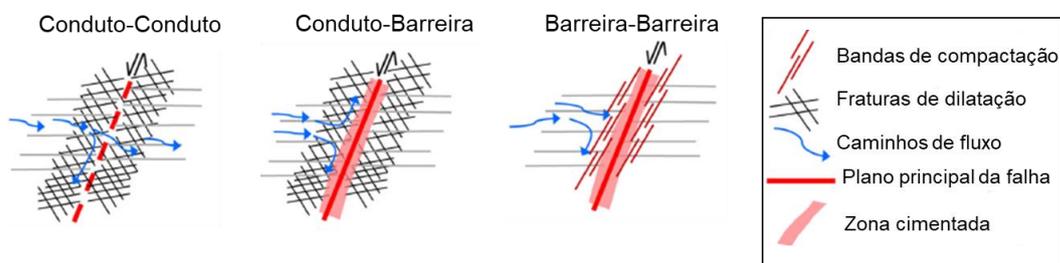


Figura 2.10 – Modelos conceituais da representação da zona de falha com base na permeabilidade da zona de dano e do núcleo de falha (Adaptado de Rohmer et al., 2015).

A interação entre dois segmentos de falha que estão suficientemente próximos gera retardo ou parada temporária na propagação das falhas, encurvamento das pontas na zona de sobreposição entre falhas, desenvolvimento de uma zona complexa de estruturas subsidiárias (subfalhas, fraturas e bandas de deformação) e a formação de uma rampa de revezamento, conforme Figura 2.11 (Fossen e Rotevatn, 2016). As rampas de revezamento resultam da transferência de tensões e deslocamentos entre falhas localizadas em materiais com comportamento frágil. Eventualmente, à medida que o deslocamento aumenta, a rampa sofre uma quebra (Peacock e Sanderson, 1995; Rotevatn e Bastesen, 2014). As rampas de revezamento, com quebras ou não, são tipicamente caminhos preferenciais para a migração de fluidos por apresentar uma maior complexidade estrutural, comparado a falhas isoladas. Ou seja, esse tipo de estrutura apresenta um maior número de falhas e fraturas com diversas orientações.

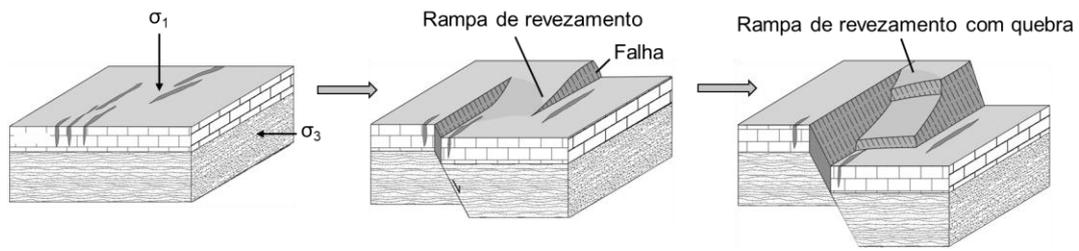


Figura 2.11 – Desenvolvimento de rampa de revezamento pela interação de falhas normais
(Adaptado de Crider e Peacock, 2004).

3 Modelagem numérica de zonas de dano

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para modelagem numérica de zonas de dano de falhas geológicas. Esta metodologia é baseada nos trabalhos apresentados por Andrade *et al.* (2020, 2021), e Oliveira *et al.* (2022) que utilizaram o MEF, modelos constitutivos elastoplásticos e condições de campo apropriadas para simular o processo de formação de falhas geológicas e determinar assim a largura da zona de dano. Esses trabalhos utilizaram o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb (MHC) para representação do comportamento geomecânico das rochas. No entanto, apesar desse modelo ter sido bastante utilizado em diversas aplicações, ele apresenta algumas inconsistências, como a geração contínua de deformações plásticas de dilatação sem nenhuma representação das deformações plásticas por compactação. Assim, o modelo denominado Soft-Rock-Model (SR3) também é utilizado nesta dissertação para representar o comportamento geomecânico das rochas. Para fins de comparação entre o MHC e o SR3, algumas equivalências entre seus parâmetros são apresentadas. Utiliza-se a convenção de sinais de mecânica das rochas, segundo a qual as tensões e as deformações de compressão são positivas.

3.1. Geometria e malha

A formação e a evolução das zonas de dano em falhas geológicas são analisadas por meio de modelos 2D na condição de estado plano de deformação. Esta hipótese foi validada por Andrade (2021) quem simulou uma falha em um domínio tridimensional. A partir da comparação de análises 2D realizadas em diversos cortes verticais ao modelo 3D, Andrade (2021) observou que os resultados eram bastante próximos, com diferenças relativas na definição da largura da zona de dano resultante na ordem de 5%. Assim, considerando o elevado custo computacional para processamento de modelos 3D, a modelagem bidimensional se mostra bastante vantajosa.

As geometrias dos modelos são definidas a partir de seções de corte ou planos intersectando a superfície de falha. No caso de falhas normais, aplicam-se planos verticais (Figura 3.1a). Uma falha isolada é representada nos modelos bidimensionais por duas linhas sobrepostas inseridas em um meio homogêneo, cada linha pode se mover de maneira independente, simulando a descontinuidade representativa das falhas (Figura 3.1b). O modelo é discretizado em uma malha não estruturada com elementos quadriláteros e triangulares de tamanho variado nas bordas do modelo. O número de elementos ao longo da falha é definido com base em uma análise de convergência de malha, na qual varia-se a quantidade de elementos em 30, 50, 70 e 90 elementos. Os resultados para 70 e 90 elementos são aproximados; no entanto, o tempo de processamento para 70 elementos é consideravelmente inferior. Portanto, a falha é discretizada com 70 elementos ao longo de cada uma das linhas sobrepostas, conforme ilustra a Figura 3.1c. A malha é formada por elementos de interpolação quadrática e integração completa (CPE6, CPE8). A utilização da malha não estruturada mitiga resultados espúrios de dependência de malha.

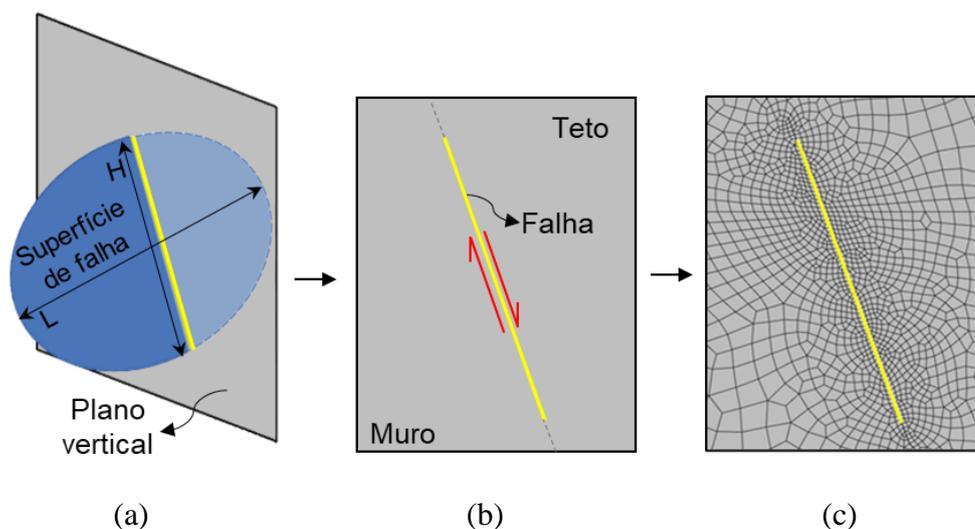


Figura 3.1 – (a) Seção vertical em plano de falha e (b) representação da falha por duas linhas sobrepostas de movimentação independente com (c) discretização de malha de elementos finitos.

3.2. Condições iniciais e de contorno

O modelo é inicializado com um estado de tensões de variação linear não isotrópico. Ou seja, considera-se a variação da profundidade (z) e o coeficiente lateral (K_0) que relaciona as tensões efetivas horizontal (σ'_h) e vertical (σ'_v). A

utilização das tensões efetivas desconsidera a influência da poropressão na análise do comportamento mecânico do modelo, conforme Figura 3.2.

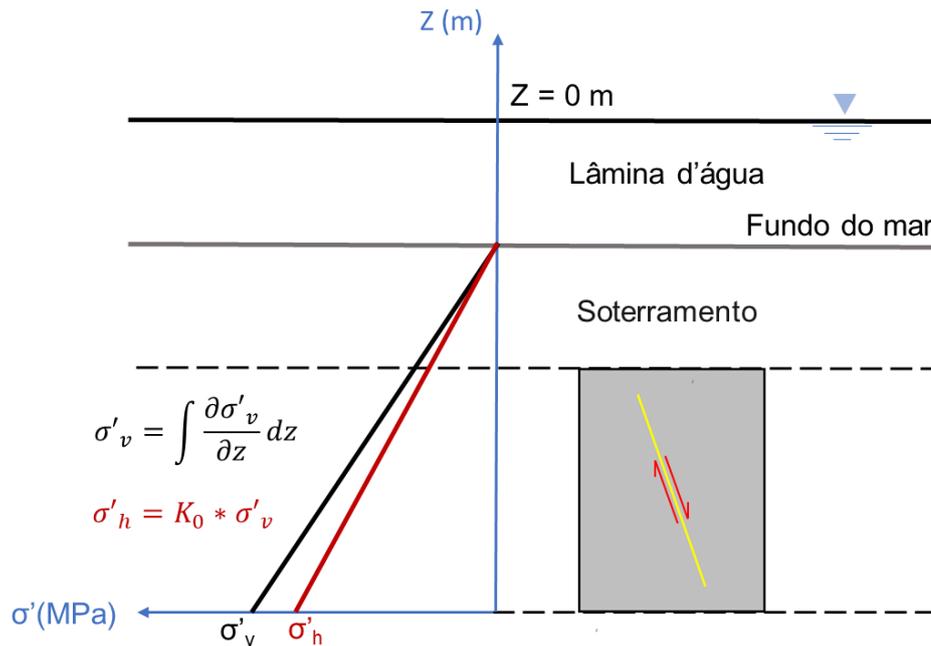


Figura 3.2 – Esquema de representação das tensões iniciais no modelo.

Para a definição das condições de contorno, as bordas do modelo são suficientemente afastadas a fim de se evitar a influência dos efeitos de borda nos resultados da zona de falha (Andrade, 2021). Os deslocamentos horizontais e verticais em cada nó das bordas do modelo são restringidos, representando o meio de grandes dimensões no qual a falha se encontra.

A zona de dano é gerada pela aplicação de deslocamentos incrementais de direções opostas nos nós de cada linha sobreposta. A distribuição do deslocamento varia de forma parabólica entre a extremidade e o centro da falha, com deslocamentos nulos nas extremidades e máximo na região central, considerando o modelo de comprimento de falha constante (Kim e Sanderson, 2005). A função que define o deslocamento para cada lado da falha é descrita por:

$$D(h) = -4(0.5D_{m\acute{a}x}) \left(\frac{h}{H}\right)^2 + 4(0.5D_{m\acute{a}x}) \left(\frac{h}{H}\right) \quad (1)$$

onde, h é a distância medida a partir de uma das extremidades da falha, conforme Figura 3.3. Este deslocamento máximo equivale ao rejeito final da falha.

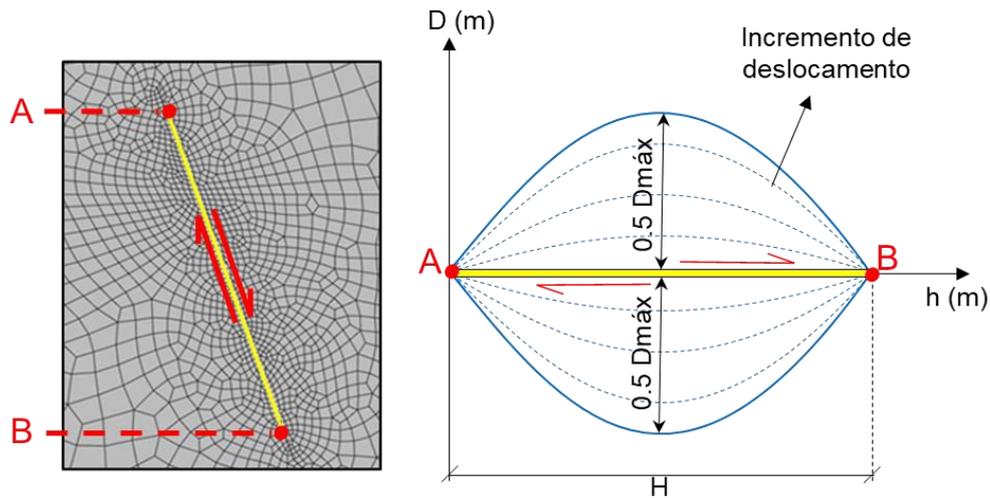


Figura 3.3 – Distribuição do deslocamento incremental com variação parabólica considerando o modelo de comprimento de falha constante.

Torabi e Berg (2011) relacionam o deslocamento máximo com o comprimento da falha, considerando que o *comprimento* (L) de falha seja a máxima dimensão linear perpendicular ao deslocamento da falha. De acordo com a Figura 3.4, o deslocamento varia entre L e $0,001L$, indicando a dispersão da relação do deslocamento com o comprimento de falha observado em campo. Assim, como em alguns estudos já realizados (Andrade *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2022), é considerado um deslocamento da ordem de $0,1H$ para o caso de falhas normais.

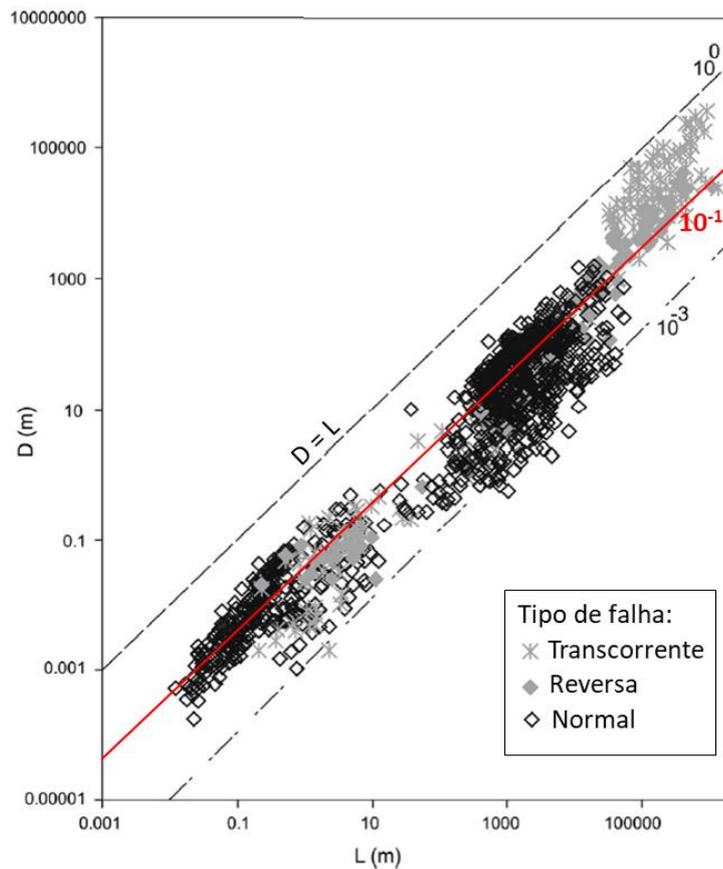


Figura 3.4 – Relação entre o deslocamento máximo e comprimento de falha para falhas normais, reversas e transcorrentes (Adaptado de Torabi e Berg, 2011).

3.3. Modelos constitutivos

O comportamento dos materiais pode ser analisado através de leis constitutivas que relacionam matematicamente as deformações do material com as tensões aplicadas. A relação constitutiva mais simples usada na modelagem numérica é elasticidade linear baseada na Lei de Hooke (Gray, 2014). A elasticidade linear envolve constantes como o módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν) e define uma relação proporcional entre as tensões (σ) e as deformações (ϵ). Um material elástico se deforma à medida que as tensões são aplicadas, mas retorna a sua forma original após o descarregamento das forças as quais o material foi submetido. Em outros termos, as deformações são reversíveis (Fossen, 2010; Zoback, 2007). No entanto, essa relação elástica pode ocorrer de forma não linear. Ou seja, a relação tensão-deformação não é constante, com variações para o valor de E . Quando a curva de carregamento e descarregamento são idênticas, o material

é perfeitamente elástico (Fossen, 2010). Os modelos constitutivos de elasticidade linear e não-linear são representados na Figura 3.5.

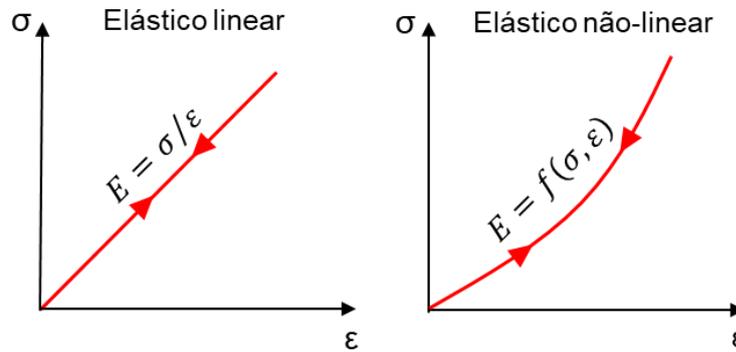


Figura 3.5 – Tipos de diagrama tensão-deformação de modelos elásticos uniaxiais.

No entanto, modelos elásticos são relativamente simples e não são capazes de representar características importantes do comportamento das rochas. Melhorias podem ser feitas aprimorando esses modelos com a aplicação da Teoria da Plasticidade (Potts e Zdravkovic, 1999). Após atingir a tensão de plastificação, os geomateriais passam a acumular deformações irreversíveis (plásticas), o que os caracteriza como materiais elastoplásticos.

A formulação do comportamento de materiais elastoplásticos de acordo com o estado multiaxial de tensões possibilita a aplicação dos conceitos de elastoplasticidade de forma mais geral. Diante da complexidade de se interpretar resultados considerando as seis componentes de tensão e de deformação, representações mais simples com base nas tensões principais ou nos invariantes de tensão podem ser adotadas ao se considerar um material isotrópico. Os invariantes são obtidos através de combinações envolvendo todas as seis componentes de tensão ou as três tensões principais (Potts e Zdravkovic, 1999).

Considerando a coincidência das direções principais de ambos, a tensão acumulada e o incremento de deformação plástica, Potts e Zdravkovic (1999) formulam um modelo elastoplástico com base em três componentes: (1) Função de plastificação, (2) Leis de endurecimento/amolecimento e (3) Função potencial plástico.

Em casos multiaxiais, por haver mais de uma componente de tensão, a plastificação do material é definida por uma função do estado de tensões, podendo ser expressa em termos das tensões principais: máxima (σ_1), intermediária (σ_2) e

mínima (σ_3); ou dos invariantes de tensão: tensão octaédrica ou tensão média (p), tensão de von Mises ou de desvio (q), e do terceiro invariante (r) como

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \mathbf{k}) = F(p, q, r, \mathbf{k}) = 0 \quad (2)$$

onde \mathbf{k} é o parâmetro de estado que representa os processos de endurecimento/amolecimento. Os invariantes de tensão são avaliados de acordo com as seguintes expressões:

$$p = \frac{I_1}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (3)$$

$$q = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4)$$

$$r = 3 \left(\frac{J_3}{2} \right)^{\frac{1}{3}} = 3 \left(\frac{s_1 s_2 s_3}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

onde s_1 , s_2 e s_3 são as componentes principais do tensor de tensões de desvio.

A função de plastificação pode variar de três maneiras distintas, pois o material pode ser perfeitamente plástico (plasticidade ideal) ou apresentar um comportamento característico das leis de endurecimento ou amolecimento. Materiais perfeitamente plásticos, após atingir a tensão de plastificação, acumulam deformações plásticas sem alterar o nível de tensão. No caso de haver aumento das tensões à medida que as deformações plásticas são incrementadas ocorre o endurecimento e o material ganha resistência. Os materiais que apresentam amolecimento acumulam deformações plásticas com redução das tensões aplicadas (Fossen, 2010). As leis de endurecimento e amolecimento prescrevem como \mathbf{k} varia com as deformações plásticas. Se o material é perfeitamente plástico, \mathbf{k} é constante (Potts e Zdravkovic, 1999).

A superfície potencial plástico é definida por uma função dos componentes de tensão e dos parâmetros de estado ($G(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{m})$). O gradiente da função potencial plástico determina a direção do incremento de deformação plástica (eq. (6)), enquanto o multiplicador plástico (γ) é um escalar que tem a função de ajustar a magnitude dos incrementos de deformação plástica, sendo nulo em regime elástico (Abreu, 2019)

$$\dot{\varepsilon}^p = \gamma \frac{\partial G(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{m})}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (6)$$

Os invariantes de deformação são:

$$\Delta \varepsilon_{vol} = \Delta \varepsilon_1 + \Delta \varepsilon_2 + \Delta \varepsilon_3 \quad (7)$$

$$\Delta \varepsilon_{dev} = \frac{2}{\sqrt{6}} \sqrt{(\Delta \varepsilon_1 - \Delta \varepsilon_2)^2 + (\Delta \varepsilon_2 - \Delta \varepsilon_3)^2 + (\Delta \varepsilon_3 - \Delta \varepsilon_1)^2} \quad (8)$$

onde $\Delta \varepsilon_{vol}$ é o incremento de deformação volumétrica, o qual determina se o material está submetido a uma deformação de dilatação ou de compactação, e $\Delta \varepsilon_{dev}$ o incremento de deformação desviadora (Potts e Zdravkovic, 1999).

Assumindo que as direções principais das tensões estão alinhadas com as direções principais dos incrementos de deformação plástica, os incrementos de deformação e as tensões acumuladas podem ser plotados nos mesmos eixos. O vetor normal (n) à superfície potencial plástico (Figura 3.6a) em um determinado estado de tensão possui componentes que indicam a direção e magnitude dos componentes de deformação incremental, conforme Figura 3.6b.

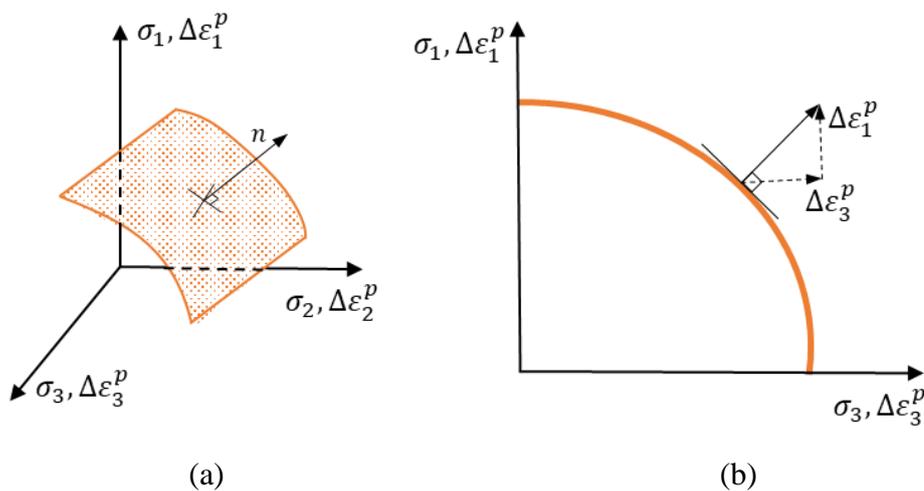


Figura 3.6- Representação de um (a) segmento da superfície potencial plástico e da (b) curva potencial plástico com as componentes do incremento de deformação plástica (Adaptado de Potts e Zdravkovic,, 1999).

As leis de fluxo são de grande importância na definição dos modelos constitutivos. A lei de fluxo associada é uma simplificação que assume a igualdade das funções de plastificação e do potencial plástico ($F(\boldsymbol{\sigma}) = G(\boldsymbol{\sigma})$). No entanto,

uma lei de fluxo associada pode superestimar os efeitos de dilatância, particularmente no modelo de Mohr-Coulomb. Em casos mais gerais, quando não há igualdade das funções ($F(\sigma) \neq G(\sigma)$), a lei de fluxo é denominada como não associada (Potts e Zdravkovic., 1999).

A análise das falhas geológicas em termos das condições de tensão e deformação possibilita uma melhor compreensão dos processos que formam a zona de dano e que podem ter implicações significativas para a presença ou a ausência de condutos de fluidos (Ferrill *et al.*, 2020). Há uma série de modelos constitutivos capazes de descrever o comportamento de vários materiais geológicos. Neste estudo, a zona de dano é caracterizada através da presença de deformações irreversíveis, ou seja, deformações plásticas. Com isso, são adotados os modelos constitutivos elastoplásticos de Mohr-Coulomb (MHC) e o Soft Rock Plasticity (SR3), ambos implementados no software Abaqus®. Nas análises apresentadas nessa pesquisa, considera-se elasticidade linear, plasticidade ideal e lei de fluxo não associada.

3.3.1. Mohr Coulomb (MHC)

Amplamente usado na representação de geomateriais, este é um modelo constitutivo clássico que define a resistência ao cisalhamento como uma função linear da tensão normal atuante sobre a superfície da falha no momento da falha. O modelo utiliza como parâmetros a coesão (c) e o ângulo de atrito (φ), conforme Figura 3.7.

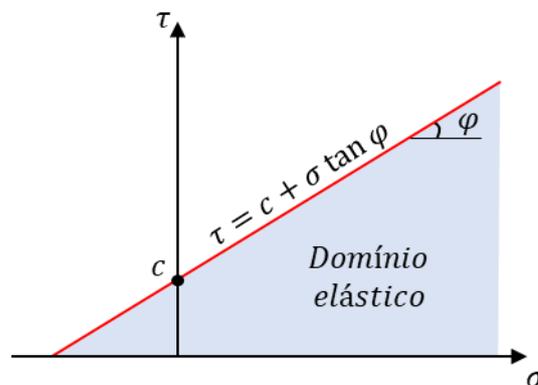


Figura 3.7 – Representação do critério de Mohr-Coulomb.

Em um estado multiaxial de tensões, a superfície de plastificação de Mohr-Coulomb pode ser definida em termos dos invariantes de tensão, conforme eq. (9).

$$F(p, q, r) = R_{mc}q - p \tan \varphi - c = 0 \quad (9)$$

$$R_{mc}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{3} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \tan \varphi \quad (10)$$

$$\cos(3\theta) = \left(\frac{r}{q}\right)^3 \quad (11)$$

onde o ângulo de Lode (θ) define o ângulo entre a projeção do tensor de tensões e os eixos das tensões principais no plano desviador (ou plano π). A superfície de plastificação no espaço das tensões principais é representada por um prisma de base hexagonal irregular (Figura 3.8a) que intercepta o eixo hidrostático na tração e se alarga com o aumento das tensões. O ângulo de atrito também controla a forma da superfície de plastificação no plano desviador (Figura 3.8b).

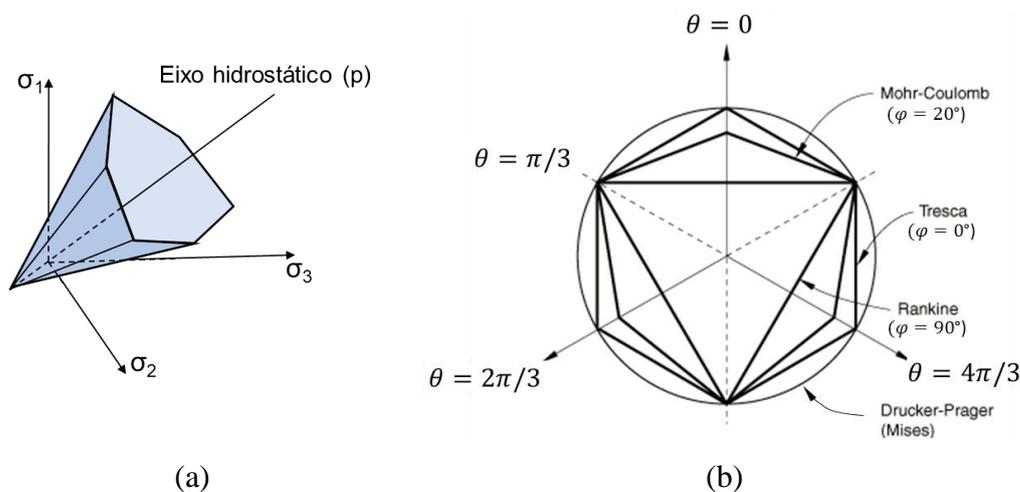


Figura 3.8 – Representação da superfície de plastificação de Mohr Coulomb no (a) espaço das tensões principais e no (b) plano desviador (Adaptado de Dassault Systèmes Simulia, 2021 e de Davis e Selvadurai, 2002).

A lei de fluxo é não associada, o que introduz o ângulo de dilatância (ψ) como um parâmetro para o modelo (Gray *et al.*, 2014). Menétrey e William (1995) propõem uma adaptação da superfície potencial plástico (eq. (12)), representando esta por uma função hiperbólica no plano meridional e uma função elíptica suave no plano desviador, conforme Figura 3.9. O parâmetro ϵ é a excentricidade no plano meridional, enquanto e é a excentricidade no plano desviador, dependente do

ângulo de atrito. A suavização das superfícies por meio das excentricidades possibilita uma melhor convergência dos modelos numéricos por garantir que a direção do fluxo seja única. A coesão inicial de plastificação é definida por $c|_0$.

$$G(p, q, r) = \sqrt{(\epsilon c|_0 \tan \psi) + (R_{mw} q)^2} - p \tan \psi \quad (12)$$

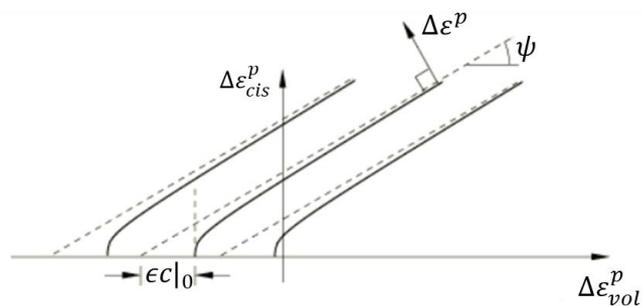
Sendo,

$$R_{mw}(\theta, e) \quad (13)$$

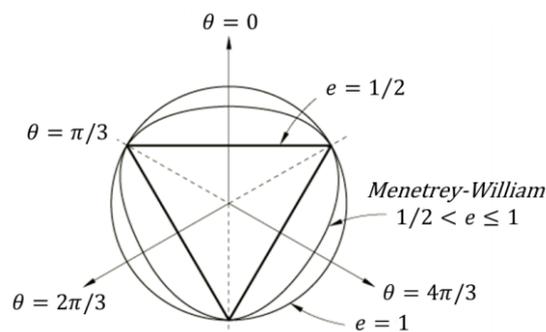
$$= \frac{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + (2e - 1)^2}{2(1 - e^2) \cos \theta + (2e - 1) \sqrt{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + 5e^2 - 4e}} R_{mc} \left(\frac{\pi}{3}, \varphi \right)$$

$$R_{mc} \left(\frac{\pi}{3}, \varphi \right) = \frac{3 - \sin \varphi}{6 \cos \varphi} \quad (14)$$

$$e = \frac{3 - \sin \varphi}{3 + \sin \varphi} \quad (15)$$



(a)



(b)

Figura 3.9 – Função potencial plástico no (a) plano meridional e no (b) plano desviador (Adaptado de Menetrey e Willam, 1995)

O tipo de deformação que se forma na região plastificada, ou seja, na zona de dano, depende do estado de tensão em relação à superfície de plastificação. Ou seja, são formadas estruturas de dilatação quando a tensão chega à envoltória em baixos valores positivos da tensão média (p), ao passo que, ao atingir valores negativos de p , as tensões passam a estar em uma região propensa à formação de fraturas. Por outro lado, para valores elevados de p , pressupõe-se o surgimento de estruturas de compressão (Fossen *et al.*, 2007). A principal desvantagem do modelo constitutivo de Mohr-Coulomb é o acúmulo indefinido de deformações plásticas de dilatação com o incremento das tensões cisalhantes. Essa desvantagem pode ser limitada empregando uma lei de fluxo não associada com ângulos de dilatância menores do que os ângulos de atrito. No entanto, o modelo ainda é incapaz de representar as deformações plásticas de compactação, pois apresenta uma superfície aberta na compressão (Potts e Zdravkovic, 1999).

3.3.2. Soft Rock Plasticity (SR3)

O modelo constitutivo elastoplástico SR3, diferentemente do modelo clássico de Mohr-Coulomb apresentado anteriormente, possibilita a análise do comportamento do material em resposta ao estado de tensões de forma mais ampla. (Crook *et al.*, 2006a). As funções das superfícies de plastificação e potencial plástico em termos dos invariantes de tensão são descritas nas equações (16) e (17) respectivamente. (Crook *et al.*, 2006b)

$$\begin{aligned}
 &F_{SR3}(p, q, r) && (16) \\
 &= \sqrt{(e_0 p_c^0 \tan \beta)^2 + (g(\sigma) q)^2} - (p - p_t) \tan \beta \left(\frac{p - p_c}{p_t - p_c} \right)^{\frac{1}{n_y}} \\
 &\quad - e_0 p_c^0 \tan \beta = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &G_{SR3}(p, q, r) && (17) \\
 &= \sqrt{(e_0 p_c^0 \tan \Psi)^2 + (g(\sigma) q)^2} - (p - p_t) \tan \Psi \left(\frac{p - p_c}{p_t - p_c} \right)^{\frac{1}{n_y}} \\
 &\quad - e_0 p_c^0 \tan \Psi
 \end{aligned}$$

Sendo,

$$g(\sigma) = \left[\frac{1}{1 - f_p} \left(1 + f_p \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right) \right]^\alpha \quad (18)$$

$$f_p = f_0 \exp \left(f_1 p \frac{p_c^0}{p_c} \right) \quad (19)$$

onde,

p_c tensão de plastificação na compressão hidrostática ou pressão crítica;

p_c^0 valor inicial de p_c ;

p_t tensão de plastificação na tração hidrostática;

β ângulo obtido em função do ângulo de atrito;

ψ ângulo obtido em função do ângulo de dilatância;

n_y parâmetro de forma da superfície no plano meridional;

e_0 parâmetro de excentricidade no plano meridional;

$g(\sigma)$ parâmetro de forma da superfície no plano desviador;

α, f_0, f_1 parâmetros do material.

De forma similar ao MHC, o SR3 simula o efeito de dilatação na superfície de cisalhamento. Além disso, possui a vantagem de caracterizar o comportamento do material na compactação com a superfície CAP, a qual é responsável pela geração de deformações volumétricas plásticas de compressão. A representação da superfície de plastificação no plano $p - q$ é representada na Figura 3.10.

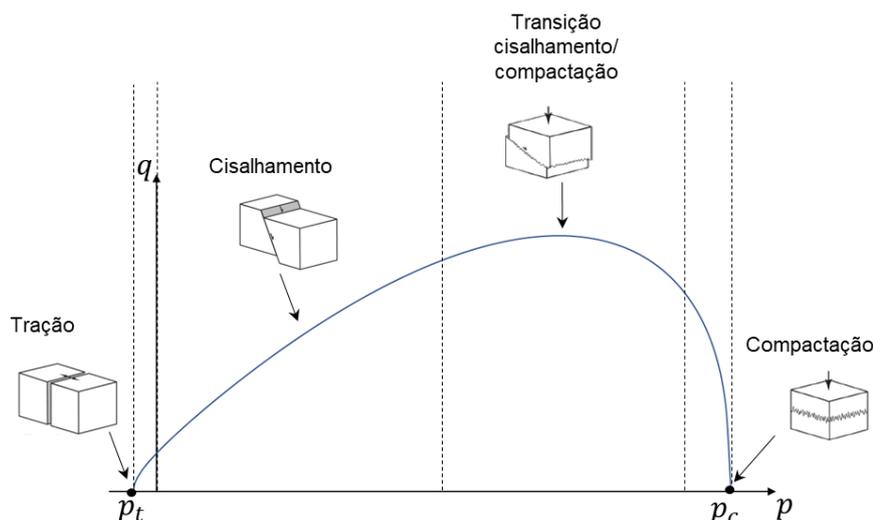


Figura 3.10 - Superfície de plastificação do SR3 no plano $p - q$ (Adaptado de Ferrill; et al, 2020).

O parâmetro n_y controla a forma da superfície de plastificação no plano p - q (Figura 3.11a), enquanto $g(\sigma)$ captura a transição no plano desviador de uma forma triangular arredondada para uma forma circular com o aumento de p , conforme Figura 3.11b (Crook *et al.*, 2006b). O parâmetro de excentricidade e_0 garante a unicidade do fluxo plástico quando $p = p_c$ e $p = p_t$. A seção meridional da superfície de plastificação se aproxima da forma retilínea quando e_0 tende a zero (Figura 3.11c).

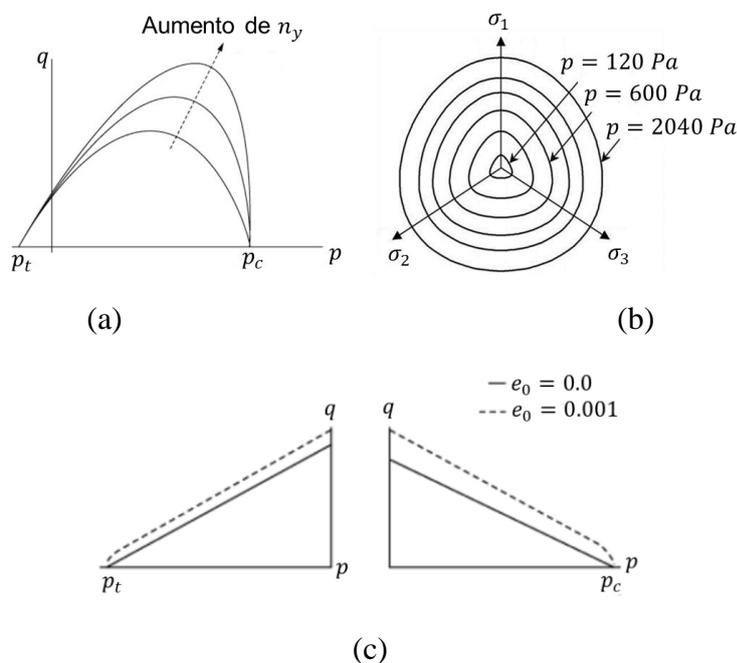


Figura 3.11 - Representação da superfície de plastificação do SR3 no (a) plano p - q , no (b) plano desviador e com (c) influência da excentricidade (Adaptado de Crook *et al.*, 2006 e Dassault Systèmes Simulia, 2021)

Considerando-se o modelo perfeitamente plástico, ou seja, não sendo adotadas as leis de endurecimento/amolecimento, a pressão crítica (p_c) se torna constante, pois a envoltória não se altera. Este parâmetro, indica a formação de deformações irreversíveis devido à compressão, causando colapso dos poros e quebra dos grãos. O valor de p_c pode ser definido a partir da correlação da porosidade (ϕ) com a pressão crítica, apresentada na Figura 3.12. Esta correlação é obtida com base no conjunto de dados do projeto Carbfault (Fisher *et al.*, 2018), no qual constam dados de um grupo de rochas carbonáticas da literatura e dados não publicados. Com isso, apesar da dispersão dos dados para baixas porosidades, pode-se definir a pressão crítica com base na porosidade da rocha.

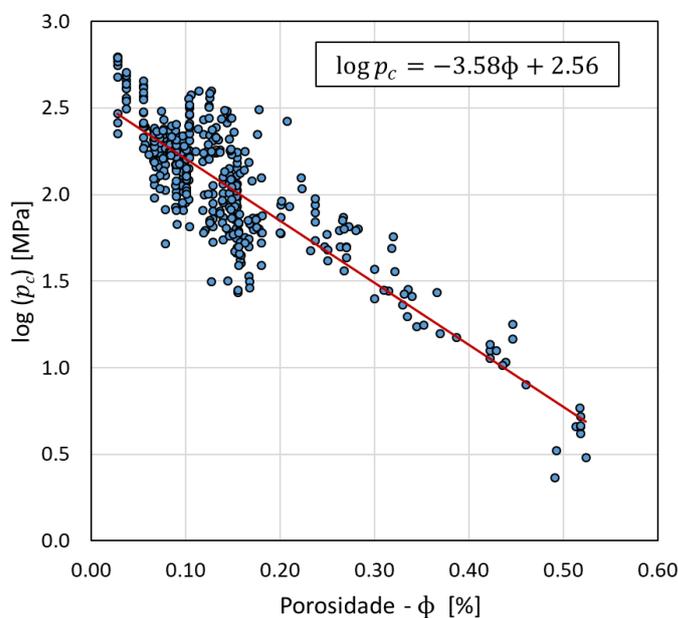


Figura 3.12 – Correlação da porosidade com a pressão crítica para carbonatos definida com base no conjunto de dados do projeto Carbfault (Fisher *et al.*, 2018).

Apesar de as funções $F_{SR3}(p, q, r)$ e $G_{SR3}(p, q, r)$ serem semelhantes e possuírem a mesma forma, a função de plastificação utiliza o ângulo β relacionado ao atrito do material enquanto a função potencial plástico utiliza o ângulo Ψ relacionado à dilatância do material. Com isso, a lei de fluxo do modelo é não associada quando $\beta \neq \Psi$.

Comumente, o ângulo de atrito possui valores maiores que o ângulo de dilatância, o que implica em uma envoltória de plastificação maior que a superfície potencial plástico. A depender do histórico de tensões, o modelo pode apresentar

diferentes respostas de deformação volumétrica. Se o material plastifica em uma região de cisalhamento ou tração (baixos valores de p), as deformações volumétricas serão de dilatação. No caso de o modelo plastificar na região do CAP (elevados valores de p), ocorrerão deformações volumétricas de compressão/compactação. No ponto de transição, o incremento de deformação plástica volumétrica será nulo (Figura 3.13).

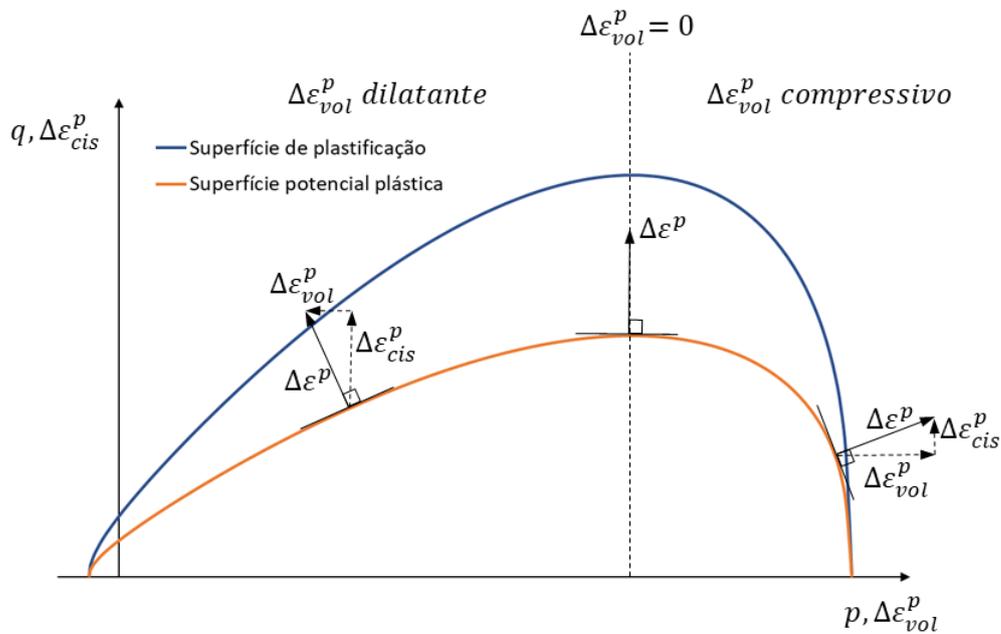


Figura 3.13 – Superfície potencial plástica do modelo SR3 e definição dos incrementos de deformações dilatantes e compressivas.

3.3.3. Equivalência de parâmetros entre o MHC e o SR3

Ambos os modelos utilizam na região elástica uma relação linear entre as tensões e deformações estabelecida com base no módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν). Os ângulos $\tan \beta$ e Ψ são relacionados com φ e ψ de acordo com:

$$\tan \beta = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (20)$$

$$\tan \Psi = \frac{6 \sin \psi}{3 - \sin \psi} \quad (21)$$

Além disso, com fins de comparação, pode-se estabelecer uma equivalência de parâmetros que garanta que ambos os modelos coincidam no ponto onde a tensão média efetiva (p') seja zero, conforme Figura 3.14.

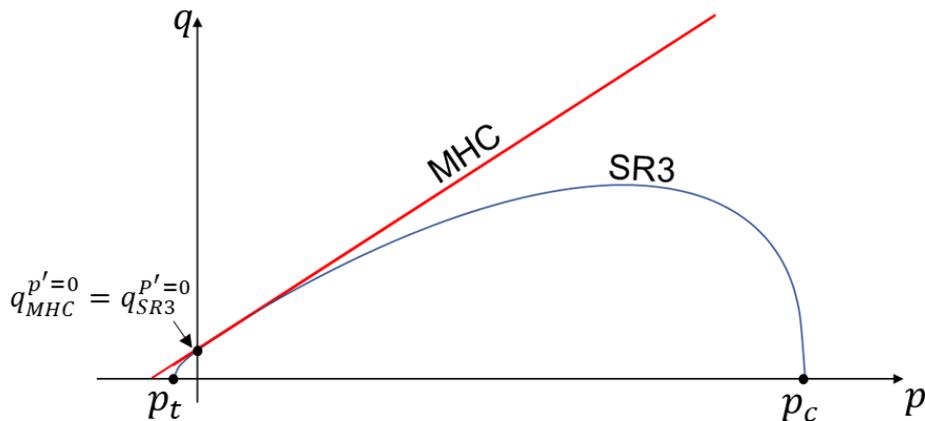


Figura 3.14 – Equivalência dos modelos MHC e SR3 no valor da coesão.

Após alguns rearranjos nas funções de plastificação dos modelos, temos as seguintes equações:

$$q_{MHC} = \left(\frac{3 \cdot c \cdot \cos \varphi + 3 \cdot p' \sin \varphi}{\sqrt{3} \sin(-\theta) - \cos \theta \sin \varphi} \right) \quad (22)$$

$$q_{SR3} = \sqrt{\frac{\left((p' - p_t) \tan \beta \left(\frac{p' - p_c}{p_t - p_c} \right)^{\frac{1}{n_y}} + e_0 p_c^0 \tan \beta \right)^2 - (e_0 p_c^0 \tan \beta)^2}{g(\sigma)}} \quad (23)$$

Assim, é assumida a igualdade $q_{MHC}^{p'=0} = q_{SR3}^{p'=0}$ (ou seja, mesmo valor da coesão em cada modelo). Logo, o valor de p_t pode ser definido a partir da eq.(24), utilizando métodos numéricos, como o de Newton-Raphson.

$$\begin{aligned}
 & -p_t \left(\frac{-p_c}{p_t - p_c} \right)^{\frac{1}{n_y}} \quad (24) \\
 & = \frac{\sqrt{(e_0 p_c^0 \tan \beta)^2 + \left(\frac{3c \cos \varphi g(\sigma)}{\sqrt{3} \sin(-\theta) - \cos \theta \sin \varphi} \right)^2} - e_0 p_c^0 \tan \beta}{\tan \beta}
 \end{aligned}$$

A utilização das tensões desviadoras normalizadas (q^*), ou seja, sem influência do ângulo de Lode, possibilita a compatibilização da trajetória das tensões obtidas no Abaqus® com as envoltórias plotadas no plano meridional. A variável *MISES* do Abaqus® equivale ao q . Logo, no MHC, após alguns rearranjos na definição de R_{mc} , o q_{MHC}^* pode ser definido por:

$$q_{MHC}^* = MISES * R_{mc} \quad (25)$$

$$R_{mc} = \frac{\sqrt{3} \cos \theta + \sin \theta \sin \varphi}{3 \cos \varphi} \quad (26)$$

No SR3, trata-se a influência do ângulo de Lode multiplicando a tensão desviadora pelo $g(\sigma)$ (ver eq(18)). Para que a trajetória se ajuste à envoltória é definido um fator de correção (F_c). Considerando o ponto de tensão relativa a coesão (c), F_c pode ser definido da seguinte forma:

$$q_{SR3}^* = c = q_{SR3}^{p'=0} * g(\sigma) * F_c \rightarrow F_c = \frac{c}{q_{SR3}^{p'=0} * g(\sigma)} \quad (27)$$

Com isso, tem-se que,

$$q_{SR3}^* = MISES * g(\sigma) * F_c = \frac{MISES * c}{q_{SR3}^{p'=0}} \quad (28)$$

3.4. Medição da zona de dano

Uma abordagem comum na literatura é a associação das zonas de dano às deformações plásticas (Ferrill *et al.*, 2020; Peacock *et al.*, 2017a). Com isso, a plastificação gerada nos modelos numéricos caracteriza regiões de formação da

zona de dano. Essas regiões podem ser identificadas por meio das variáveis PEEQ e PEMAG.

A variável escalar PEMAG é definida com base nas deformações plásticas principais acumuladas (ε^p), resultando na magnitude de deformação plástica, conforme eq. (29); a variável escalar PEEQ é a deformação plástica equivalente definida com base nos incrementos de deformação plástica ($\Delta\varepsilon^p$), conforme eq. (30).

$$PEMAG = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon^p : \varepsilon^p} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_1^{p2} + \varepsilon_2^{p2} + \varepsilon_3^{p2})} \quad (29)$$

$$PEEQ = \bar{\varepsilon}_p|_0 + \sqrt{\frac{2}{3} \Delta\varepsilon^p : \Delta\varepsilon^p} = \sqrt{\frac{2}{3} (\Delta\varepsilon_1^{p2} + \Delta\varepsilon_2^{p2} + \Delta\varepsilon_3^{p2})} \quad (30)$$

onde $\bar{\varepsilon}_p|_0$ é a deformação plástica equivalente inicial. Para a maioria dos materiais, PEEQ e PEMAG são iguais apenas para carregamentos proporcionais.

A delimitação do contorno que define os limites da zona de dano no modelo é feita com base em um valor mínimo dessas variáveis, conforme ilustra a Figura 3.15. A figura referencia a variável PEMAG, mas é aplicado o mesmo procedimento para PEEQ. É traçada uma trajetória (*path*) perpendicular à falha, a qual mede a distribuição da variável em questão em sua extensão, conforme o gráfico à direita da figura. A medição da largura de zona de dano em toda a extensão da falha é feita por meio da distribuição de várias trajetórias perpendiculares (*paths*) ao longo da falha.

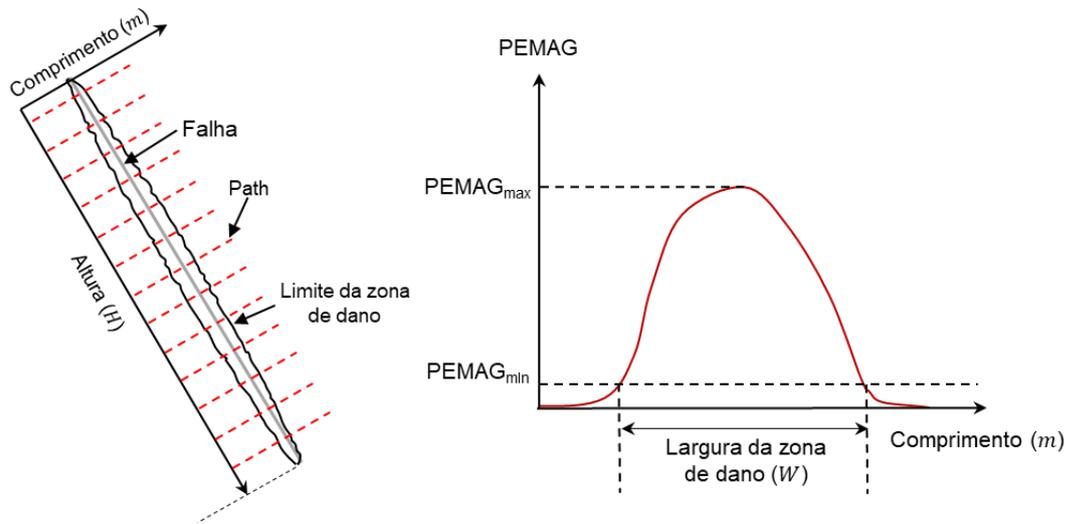


Figura 3.15 – Medição da largura da zona de dano.

4 Análise numérica

Neste capítulo se realiza um estudo de sensibilidade para avaliar o impacto dos parâmetros do modelo numérico na definição de zonas de dano de falhas geológicas em rochas carbonáticas. Para isto, consideram-se falhas normais isoladas em condições representativas dos campos do pré-sal brasileiro. São analisados os parâmetros geomecânicos, as tensões iniciais, os deslocamentos máximos aplicados na zona de falha e a leitura do valor mínimo da variável de medição das deformações plásticas (PEEQ/PEMAG). Também se avalia a caracterização de zonas de dano de falhas isoladas e de zonas de dano de conexão entre falhas. O estudo paramétrico e a caracterização das zonas de dano são aplicados tanto para o MHC quanto para o SR3. Os resultados são observados com base na relação entre a largura da zona de dano e o deslocamento da falha, como também na trajetória das tensões e deformações do material. Nas simulações, é utilizado o solver Abaqus/Standard® com formulação para grandes deslocamentos (formulação Lagrangiana atualizada). Para a construção dos modelos de elementos finitos parametrizados, empregou-se a biblioteca Damagezonemodeling desenvolvida ao longo do projeto Geoband. Além da construção dos modelos, essa biblioteca foi utilizada para a medição da largura da zona de dano em diferentes posições ao longo da falha.

4.1. Dados do modelo

O parâmetros geomecânicos do material utilizados para simular o comportamento de rochas carbonáticas são definidos com base em dados de travertinos testados em laboratório apresentados no trabalho de Kiewiet (2015), conforme Tabela 1. Tais rochas, possuem valores de porosidade que variam entre 2% e 20%. Com isso, neste estudo é considerada uma porosidade média no valor de 13%.

Tabela 1 – Parâmetros geomecânicos do material.

Parâmetro	Carbonato	Unidade
Módulo de Young (E)	17000	MPa
Coef. de Poisson (ν)	0,3	-
Ângulo de atrito (φ)	34	graus (°)
Ângulo de dilatação (ψ)	24	graus (°)
Coesão (c)	6	MPa

A formulação do modelo constitutivo MHC faz uso da aplicação direta dos parâmetros geomecânicos definidos na Tabela 1. Para o SR3 se utilizam as correlações apresentadas no capítulo 3. Para esse modelo, assume-se que a pressão crítica permanece constante, visto que não há dados suficientes para caracterizar sua evolução. Além disso, não há dados suficientes para definir os parâmetros de forma: f_1 , f_0 , α , e_0 e n_y . Portanto, estes foram assumidos de acordo com os valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do material para o SR3.

Parâmetros SR3	Carbonato	Unid.
Pressão crítica (p_c) para porosidade de 13%	120	MPa
Tensão de plastificação na tração hidrostática (p_t)	4,80	MPa
Parâmetro relativo ao ângulo de atrito (β)	53,97	graus (°)
Parâmetro relativo ao ângulo de dilatação (Ψ)	43,26	graus (°)
f_1	0	-
f_0	0	-
α	1	-
e_0	0,05	-
n_y	2,5	-

A geometria do modelo na simulação considera uma falha com altura de 500 m e com um mergulho de 60°. O ponto central da falha está a uma profundidade de 5000 m e as bordas superiores e inferiores do modelo a 4250 m e a 5750 m, respectivamente. A altura de lâmina d'água é de 2000 m. Com isso, tem-se um soterramento de 2250 m acima do modelo. O comprimento do modelo é de 2000

m, sendo as bordas laterais suficientemente afastadas da região de falha, garantindo que a restrição dos deslocamentos nas bordas do modelo não influencie nos resultados da largura da zona de dano após a aplicação do carregamento (deslocamentos incrementais). A malha de elementos finitos na falha é discretizada em 70 elementos de aproximadamente 7,15 m de lado, como demonstrado na Figura 4.1.

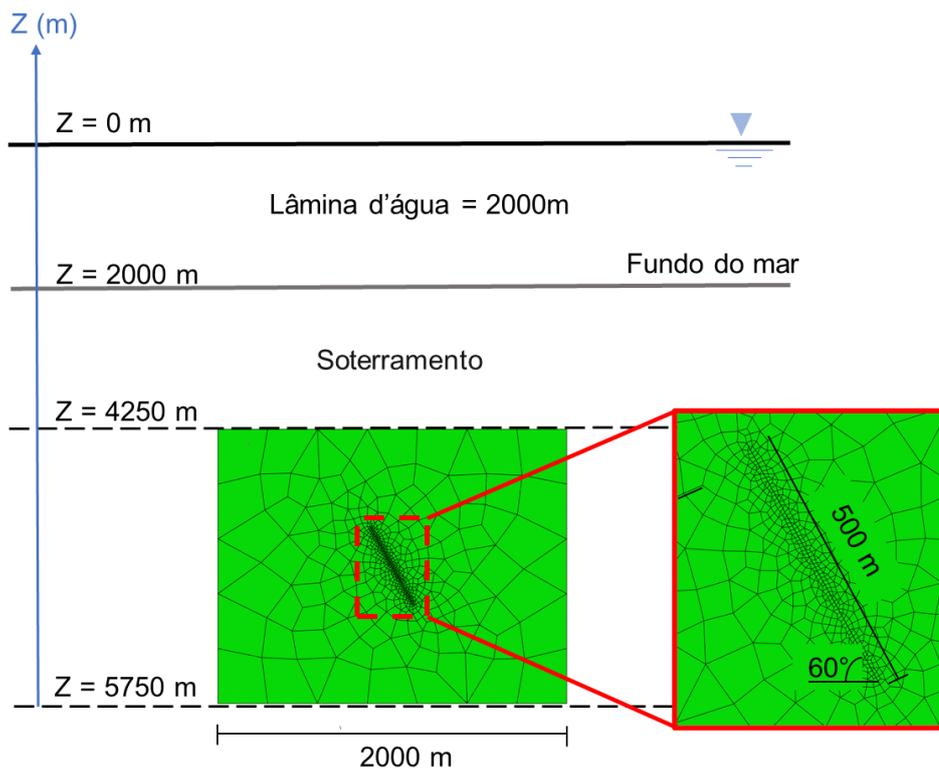


Figura 4.1 – Geometria e malha de elementos finitos do modelo com uma falha isolada.

As condições iniciais de tensão são definidas com um gradiente de tensões efetivas vertical de 0,012 MPa/m e um K_0 de 0.9. Resultando em uma tensão efetiva inicial principal vertical de 27 MPa no topo do modelo e 45 MPa na borda inferior, bem como tensões horizontais de 24.3 e de 40.5 MPa, respectivamente. A Figura 4.2a representa a devida inicialização das tensões. As tensões iniciais em equilíbrio não geram deslocamentos iniciais, conforme verificado na Figura 4.2b. Ou seja, deve haver compatibilidade entre as forças internas e externas no modelo.

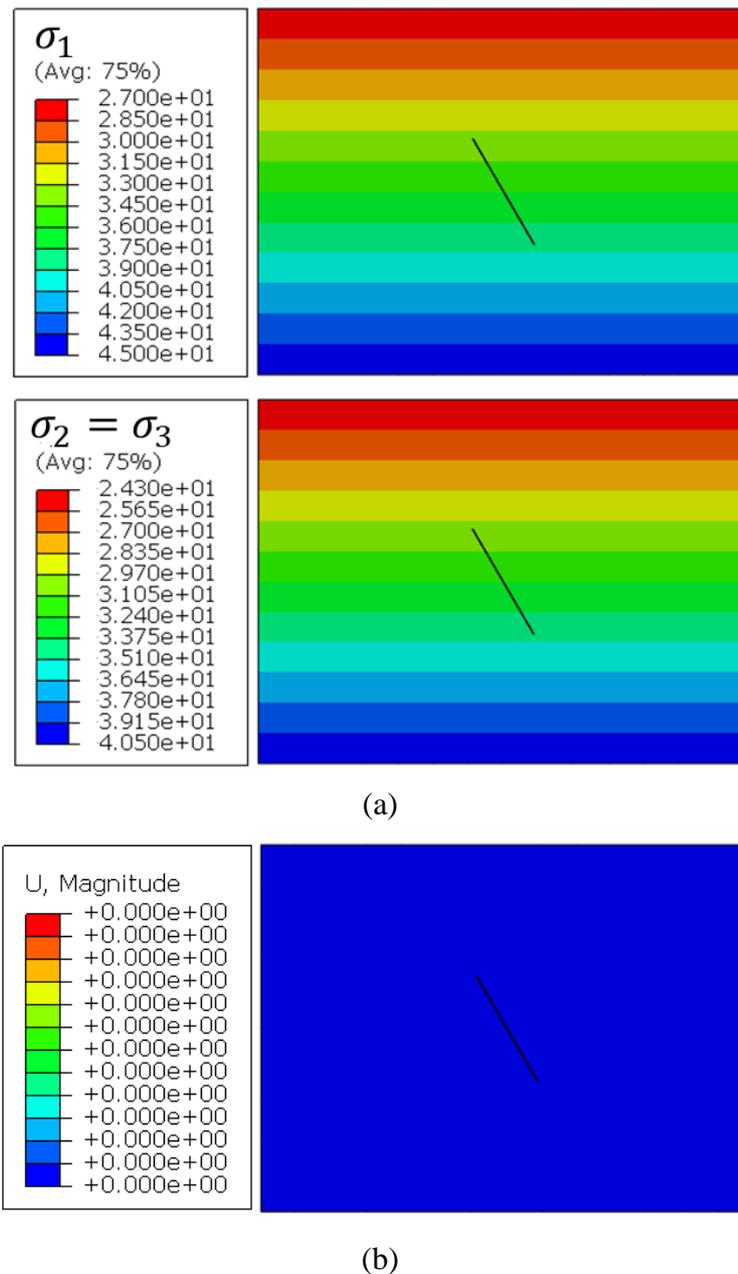


Figura 4.2 – (a) Tensões iniciais aplicadas ao modelo e (b) Inicialização do modelo com deslocamentos nulos.

A geração da zona de dano é obtida a partir da aplicação de deslocamentos incrementais. O deslocamento máximo do modelo é de 50 m, ou seja, 25 m em sentidos opostos de cada lado da falha. A Figura 4.3a mostra o deslocamento total no incremento final de uma análise considerando o modelo constitutivo de MHC, com a distribuição do deslocamento máximo no centro da falha, assim como no SR3 (Figura 4.3b). Observa-se que o campo de deslocamento resultante do SR3 tem uma maior concentração em torno da região da falha onde os deslocamentos são

prescritos. Estes resultados podem ser explicados pela maior dissipação de energia gerada pelo modelo SR3, o que limita as deformações.

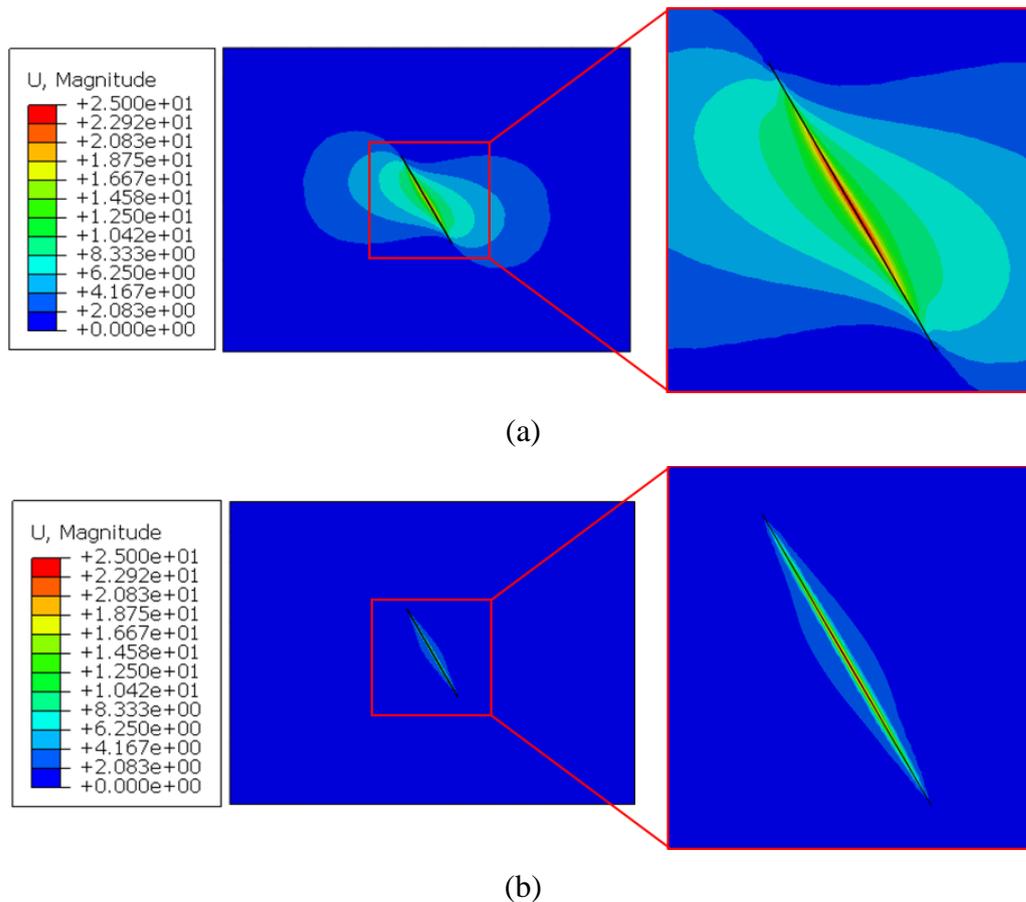


Figura 4.3 – Incremento final de deslocamento considerando os modelos constitutivos (a) MHC e (b) SR3.

A fim de se considerar a zona de dano adjacente à falha como a região com maior intensidade de deformação plástica, nos resultados que serão apresentados, os limites da zona de dano são definidos considerando um valor mínimo arbitrário da variável PEMAG de 0.10. Ou seja, magnitudes de deformação plástica inferiores a esse valor não são consideradas como zona de dano da falha, conforme ilustrado na Figura 4.4. As trajetórias (*path*) de medição das variáveis de deformação plástica (PEEQ e PEMAG) são traçadas perpendicularmente ao longo de todo o comprimento de falha para mapear os limites da largura da zona de dano.

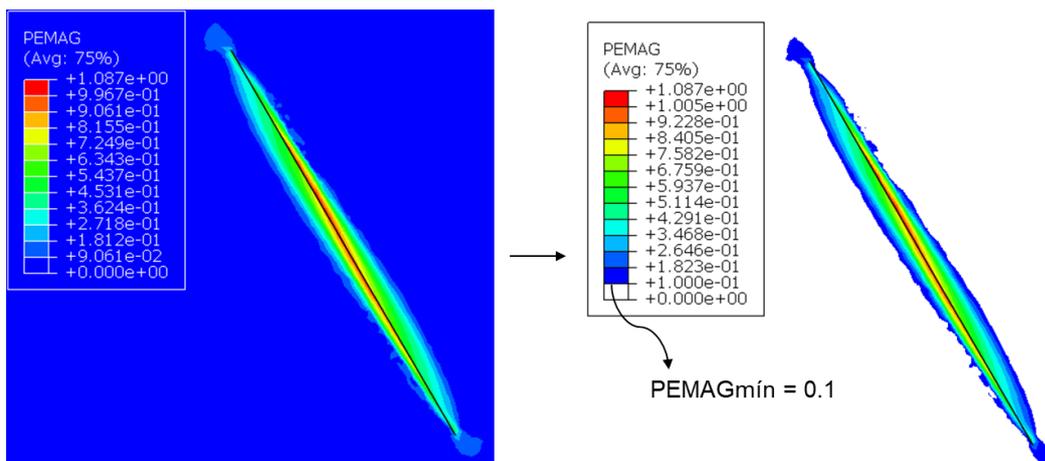


Figura 4.4 – Delimitação da zona de dano de uma falha isolada com PEMAG mínimo de 0.1.

4.2. Análise paramétrica

A variação dos diferentes parâmetros que compõem o modelo é feita a fim de se ter uma melhor compreensão da influência desses parâmetros na obtenção da largura da zona de dano. Com isso, é verificada a resposta de cada análise com uma relação entre o deslocamento aplicado e a largura da zona de dano gerada por estes deslocamentos (DxW). A zona de dano é obtida através do histórico de respostas da variável PEMAG em relação aos incrementos de deslocamento em uma trajetória que passa pela região central da falha.

Um resumo com os valores adotados na variação de cada parâmetro são apresentados na Tabela 3 e são consistentes com a faixa de variação destes parâmetros para travertinos mencionados na literatura (Zoback, 2007). Estes valores são aplicados tanto para o MHC quanto para o SR3, exceto a variável p_c , utilizada apenas no caso do SR3. Resultam um total de 46 modelos de análise. A variações apresentadas incluem os valores adotados como padrão deste estudo (apresentados no tópico 4.1) destacados em negrito. Os parâmetros elásticos (E , ν) não são verificados no estudo paramétrico, visto que a zona de dano é caracterizada pelas deformações plásticas. Ademais, Andrade (2021) verificou que E não tem influência na largura da zona de dano considerando rochas rígidas e grandes deslocamentos. Enquanto ν não afeta a largura da zona de dano.

Tabela 3 – Valores adotados para geração dos modelos de análise paramétrica.

φ [°]	ψ [°]	c [MPa]	$D_{m\acute{a}x}$ [%H]	PEMAG	$\partial\sigma'_v/\partial Z$ [MPa/m]	p_c [MPa]
29	19	3	2	0.05	0.010	70
34	24	6	5	0.10	0.011	240
38	29	9	10	0.15	0.012	
			15		0.013	
			20		0.014	

4.2.1.

Influência dos parâmetros usando o modelo MHC

Um primeiro conjunto de testes é aplicado para verificar o impacto dos parâmetros geomecânicos (ângulo de atrito, ângulo de dilatância e coesão) na modelagem de zonas de dano com MHC. Em uma primeira análise paramétrica, avalia-se a influência do ângulo de atrito (φ) na definição da largura da zona de dano. Os modelos são analisados com os seguintes valores de φ : 29°, 34° e 38°. Os demais parâmetros do modelo não se alteram e são apresentados juntamente com o resultado das análises na Figura 4.5. Analisando a relação DxW , nota-se que, à medida que há o aumento da magnitude dos deslocamentos, cresce a influência do ângulo de atrito na formação da zona de dano. No final da análise, a relação entre a largura da zona de dano e o ângulo de atrito é diretamente proporcional, ou seja, quanto menor o valor do ângulo de atrito, menor será a zona de dano. A diferença entre a largura da zona de dano gerada pelo maior e menor valor de φ utilizados é de 8,45%.

φ [°]	ψ [°]	c [MPa]	$D_{m\acute{a}x}$ [%H]	PEMAG	$\partial\sigma'_v/\partial Z$ [MPa/m]
Variável	24	6	10	0.10	0.012

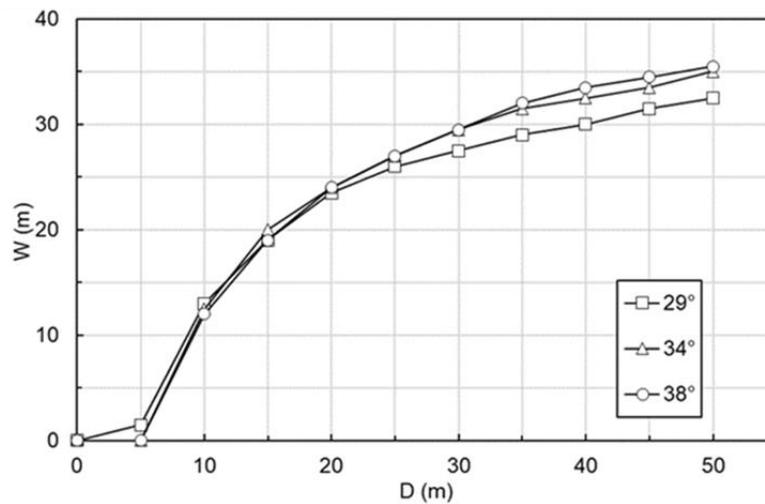


Figura 4.5 – Relação DxW para variação do ângulo de atrito na modelagem com o MHC.

Visto que a zona de dano é obtida com base na variável que mede a magnitude das deformações plásticas (PEMAG), a influência do ângulo de atrito pode ser justificada com base nos incrementos de deformação da superfície potencial plástico. Como a superfície potencial plástico utiliza o ângulo de dilatância para simular a deformação do material, espera-se que o ângulo de atrito não influencie o resultado das deformações da zona de dano. No entanto, como apresentado no capítulo 3, conforme as equações (12), (13), (14) e (15), a superfície potencial plástico do Mohr-Coulomb implementado no Abaqus possui uma certa influência do ângulo de atrito dada pelo ajuste da excentricidade do modelo no plano desviador. Isso pode justificar a influência desse parâmetro na definição da largura da zona de dano.

O impacto do ângulo de dilatância (ψ) é analisado por meio de simulações considerando os seguintes valores de ψ : 19°, 24° e 29°. Os demais parâmetros do modelo são apresentados juntamente com o resultado das análises na Figura 4.6. Com isso, observa-se na relação DxW um comportamento inversamente proporcional entre o valor de ψ e W . Ou seja, menores valores de ângulo de dilatância apresentam maiores valores de largura de zona de dano. Diferentemente do ângulo de atrito, o ângulo de dilatância influencia de forma mais considerável para valores de deslocamento abaixo de 20m. A diferença entre a largura da zona

de dano gerada pelo maior e pelo menor valor de ψ utilizados nesta análise é de 18,92%.

φ [°]	ψ [°]	c [MPa]	$D_{m\acute{a}x}$ [%H]	PEMAG	$\partial\sigma'_v/\partial Z$ [MPa/m]
34	Variável	6	10	0.10	0.012

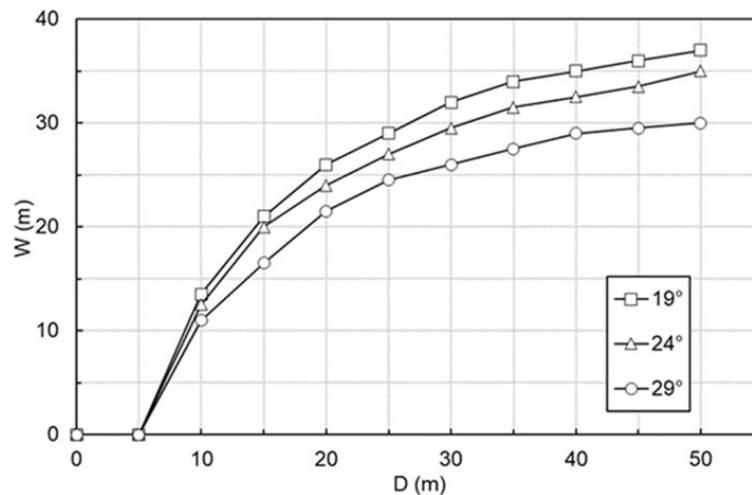


Figura 4.6 - Relação $D \times W$ para variação do ângulo de dilatância na modelagem com o MHC.

A variação da largura de zona de dano com o ângulo de dilatância pode ser justificada pelo fato de os limites da zona de dano serem definidos predominantemente por deformações cisalhantes (Perrin *et al.*, 2021). Quanto menor o ângulo de dilatância, menor a inclinação da superfície potencial plástica. Com isso, a magnitude do incremento de deformação volumétrica plástica diminui, enquanto a influência da magnitude do incremento de deformação cisalhante aumenta (Figura 4.7), resultando em maiores deformações plásticas e uma maior zona de dano.

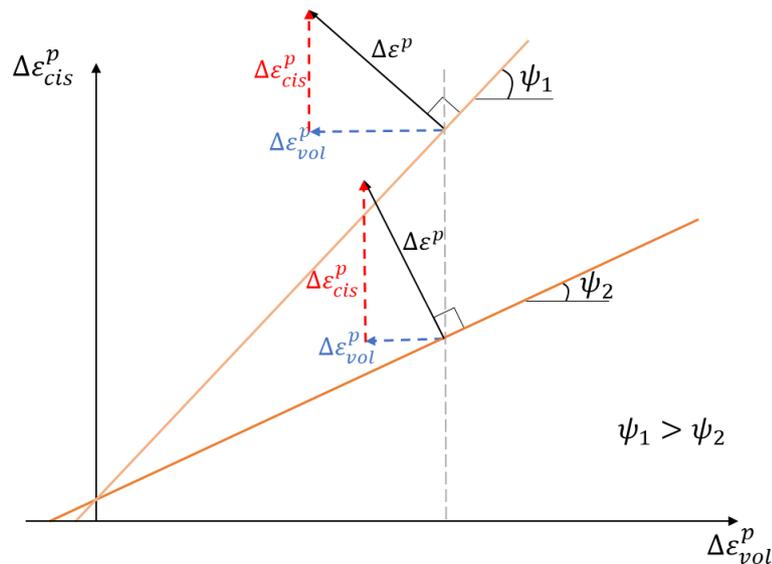


Figura 4.7 – Variação das componentes de deformação plástica com a variação da inclinação da superfície potencial plástica do MHC.

A influência da coesão (c) nos resultados de largura de zona de dano é verificada adotando os seguintes valores de c : 3 MPa, 6 MPa e 9 MPa. Mesmo com a variação de c , as análises dos modelos resultaram em valores similares de zona de dano para um mesmo conjunto de parâmetros, conforme Figura 4.8. As pequenas variações na largura da zona de dano podem ser justificadas pela aproximação numérica dos modelos. A diferença entre a zona de dano gerada pela coesão de 3 MPa e de 9 MPa é de apenas 1,4%. Variações na inclinação da superfície potencial plástica implica em variações nos incrementos de deformação plástica. No entanto, o parâmetro c modifica apenas a posição da superfície. Ou seja, não há alteração na magnitude dos incrementos de deformação plástica. Com isso, a resposta da zona de dano entre os modelos é equivalente.

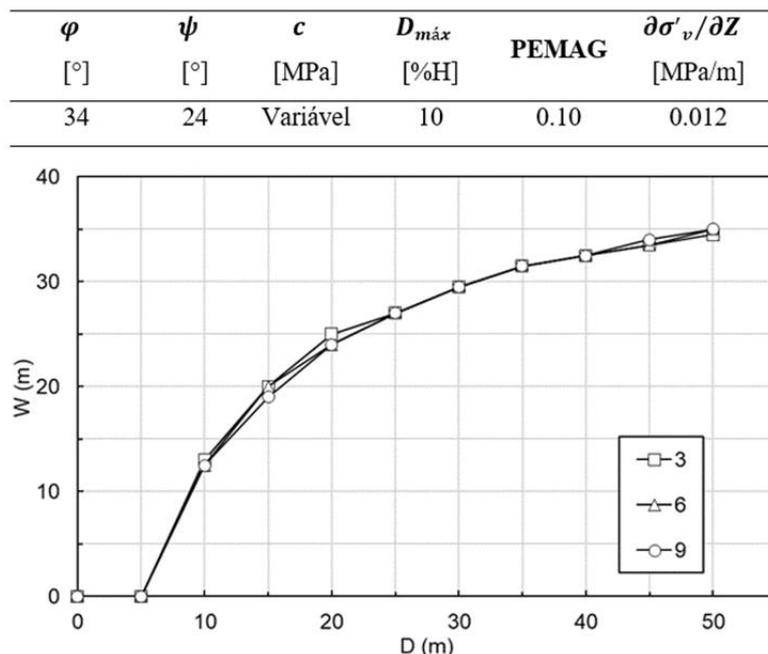


Figura 4.8 - Relação DxW para variação da coesão na modelagem com o MHC.

Um segundo conjunto de testes é aplicado para verificar o impacto dos demais parâmetros do modelo (gradiente de tensões efetivas vertical deslocamento máximo e PEMAG) na modelagem de zonas de dano com MHC. Nas análises do impacto do gradiente de tensões efetivas vertical ($\partial\sigma'_v/\partial Z$) na resposta da zona de dano, se assumem os seguintes valores: 0,010 MPa/m, 0,011 MPa/m, 0,012 MPa/m, 0,013 MPa/m e 0,014 MPa/m. De forma semelhante à resposta obtida com a variação da coesão, a variação do gradiente de tensões efetivas vertical não afeta a resposta plástica do modelo de MHC (Figura 4.9). A variação entre o maior e o menor valor de zona de dano obtida nos modelos é de 1,4%.

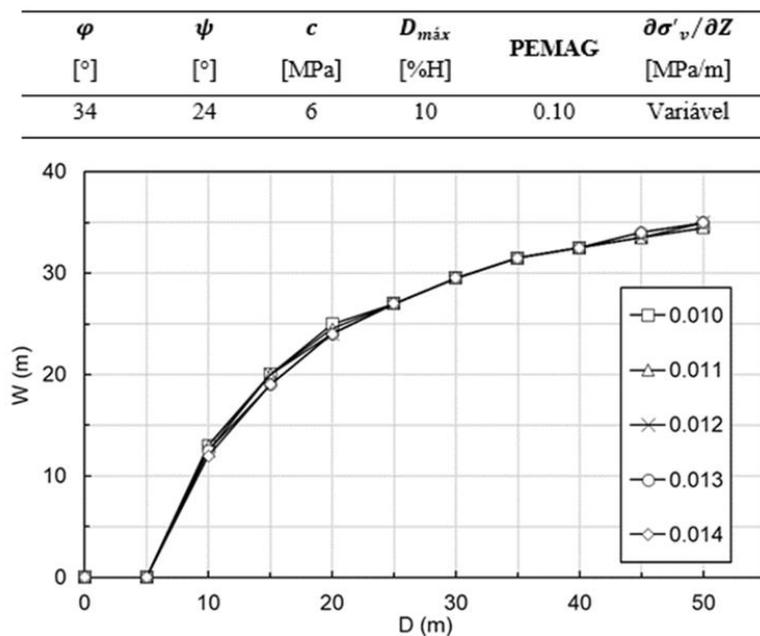


Figura 4.9 - Relação $D \times W$ para variação do gradiente de tensões efetivas vertical na modelagem com o MHC.

O gradiente de tensões efetivas vertical determina o estado de tensão inicial ao qual a falha está submetida. No entanto, nota-se que logo no início da análise, ou seja, em pequenos deslocamentos, o modelo já apresenta deformações plásticas. Ainda que o estado inicial de tensões inicialmente influencie de certa forma nas propriedades do material, o modelo de MHC passa a se deformar indefinidamente ao se atingir o estado de tensão de plastificação, fazendo com que o comportamento plástico seja predominante no modelo. Com isso, o resultado da largura de zona de dano entre os modelos estudados não apresentou variações.

A análise da influência do deslocamento máximo ($D_{m\acute{a}x}$) considera valores da ordem de 2%H, 5%H, 10%H, 15%H e 20%H, o que corresponde a $D_{m\acute{a}x}$ de 10 m, 25 m, 50 m, 75 m e 100 m para a falha com altura de 500 m. O conjunto de parâmetros utilizados nas análises e a relação $D \times W$ considerando a variação dos deslocamentos são apresentados na (Figura 4.10). Observa-se que maiores deslocamentos geram maiores valores de largura de zona de dano. No entanto, há uma maior variação de W para menores valores de D . À medida que o deslocamento aumenta, a evolução da zona de dano é caracterizada por uma curva assintótica. Enquanto a largura da zona de dano entre os valores de $D_{m\acute{a}x}$ de 10 m e 25 m varia em 53,7%, a diferença da largura de zona de dano entre $D_{m\acute{a}x}$ de 75 m e 100 m é apenas 7,14%. Com o acréscimo dos deslocamentos, os elementos adjacentes à

falha perdem rigidez por já estarem plastificados e as tensões se dissipam, causando uma diminuição da propagação das deformações, e com isso uma diminuição do acréscimo da largura da zona de dano.

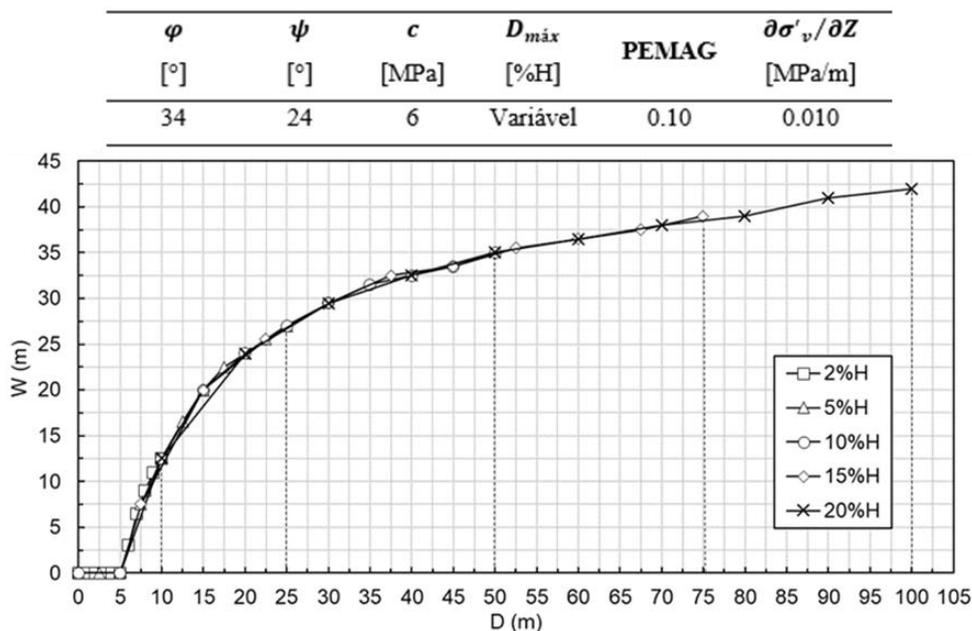


Figura 4.10 - Relação $D \times W$ para a variação do deslocamento máximo na modelagem com o MHC.

Por fim, é verificada a influência da variação do limite mínimo da variável PEMAG utilizado para delimitação da zona de dano. Consideram-se os seguintes valores: 0.05, 0.10 e 0.15. Os demais parâmetros invariáveis do modelo são apresentados juntamente com os resultados das análises em uma relação $D \times W$ na Figura 4.11. Observa-se que o PEMAG mínimo no valor de 0.10 e 0.15 desconsidera pequenas deformações plásticas que surgem nos incrementos iniciais de deslocamento e com isso também limita a largura da zona de dano a valores menores. No caso de se adotar o valor de 0.05, a falha apresenta zona de dano com pequenos deslocamentos e é considerada uma maior abrangência das deformações plásticas na caracterização da largura da zona de dano. A largura da zona de dano medida pelo valor de 0.15 diverge do valor de 0.05 em 33,33%. Com isso, tem-se que, adotando menores valores de PEMAG mínimo, é considerada uma hipótese mais conservadora para delimitação da zona de dano.

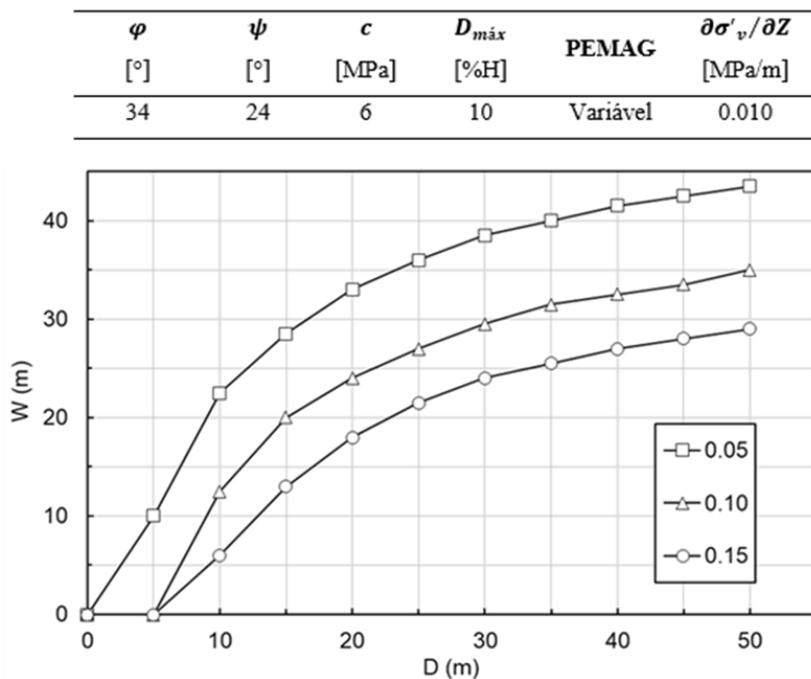


Figura 4.11 – Relação DxW para variação do PEMAG mínimo na modelagem com o MHC.

4.2.2. Influência dos parâmetros usando o modelo SR3

Através de um conjunto de simulações, é verificada a influência dos parâmetros geomecânicos (ângulo de atrito, ângulo de dilatância e coesão) na modelagem de zonas de dano com SR3. Inicialmente, é verificada a variação do ângulo de atrito (φ) para os seguintes valores de φ : 29°, 34° e 38°. Os demais parâmetros do modelo não se alteram e são apresentados juntamente com o resultado das análises na Figura 4.12. Analisando a relação DxW , nota-se que esta variação pouco interfere no resultado da formação da zona de dano, ou seja, no comportamento plástico do modelo. O que é esperado, visto que não há influência do ângulo de atrito na formulação da superfície potencial plástico do SR3. Com isso, não há variação no incremento de deformação plástica. As pequenas diferenças nos resultados entre os modelos podem ser justificadas nas aproximações numéricas na convergência do modelo.

φ [°]	ψ [°]	c [MPa]	$D_{m\acute{a}x}$ [%H]	PEMAG	$\partial\sigma'_v/\partial Z$ [MPa/m]	p_c [MPa]
Variável	24	6	10	0.10	0.012	120

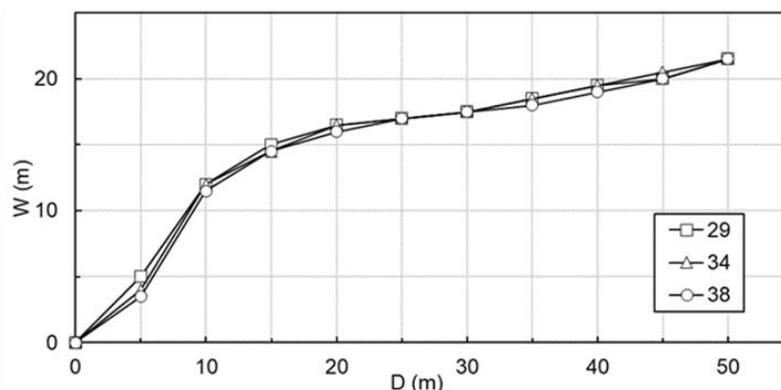


Figura 4.12 – Relação $D \times W$ para variação do ângulo de atrito na modelagem com SR3.

A verificação do comportamento do modelo em decorrência da variação do ângulo de dilatância (ψ) é feita considerando os seguintes valores de ψ : 19°, 24° e 29°. Os demais parâmetros invariáveis do modelo são apresentados juntamente com o resultado das análises na Figura 4.13. Com isso, observa-se na relação $D \times W$ um comportamento inversamente proporcional entre o valor de ψ e W . Ou seja, menores valores de ângulo de dilatância apresentam maiores valores de largura de zona de dano. A diferença entre a largura da zona de dano gerada pelo maior e pelo menor valor de ψ utilizados nesta análise é de 22%.

φ [°]	ψ [°]	c [MPa]	$D_{m\acute{a}x}$ [%H]	PEMAG	$\partial\sigma'_v/\partial Z$ [MPa/m]	p_c [MPa]
34	Variável	6	10	0.10	0.012	120

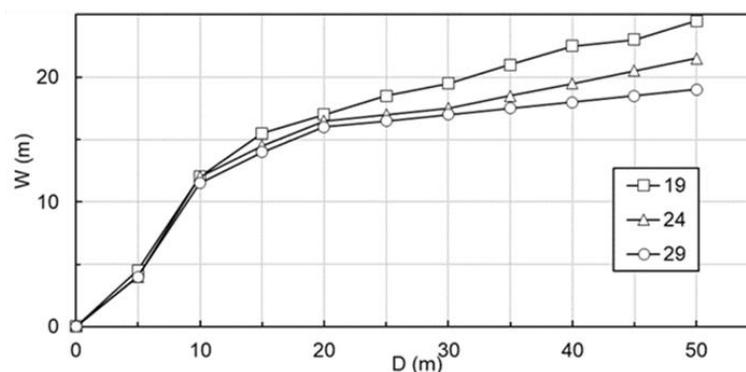


Figura 4.13 – Relação $D \times W$ para variação do ângulo de dilatância na modelagem com SR3.

A superfície potencial plástico no SR3 é definida com base no ângulo de dilatância. Quanto menor o ângulo de dilatância, menor será a inclinação da

superfície potencial plástico e maior será a influência da componente cisalhante no incremento de deformação plástica (Figura 4.14), resultando em maiores deformações e uma maior zona de dano para menores valores de (ψ) .

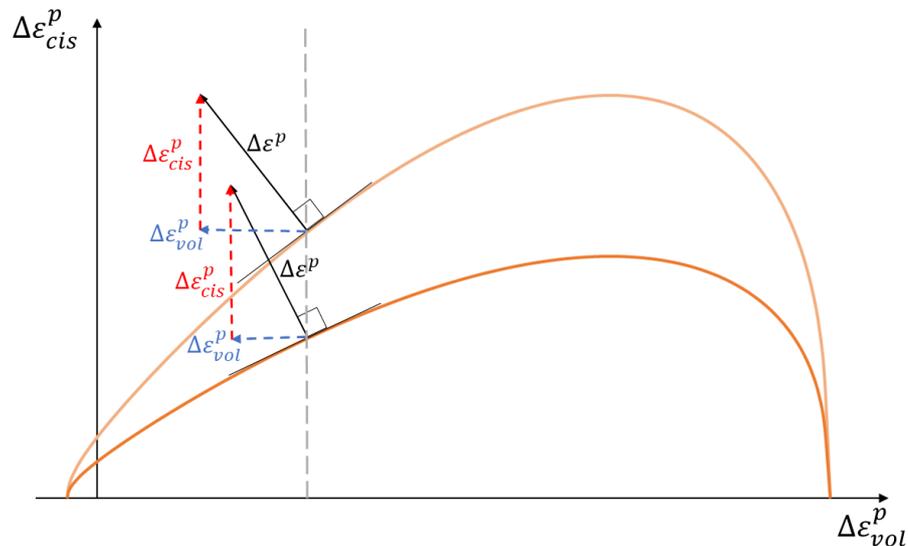


Figura 4.14 – Variação das componentes de deformação plástica com a variação da inclinação da superfície potencial plástico do SR3.

Ao se verificar a resposta do modelo para diferentes valores de coesão (3 MPa, 6 MPa e 9 MPa), nota-se que este parâmetro não afeta o comportamento plástico dos modelos, conforme Figura 4.15, pois apresentam valores de largura de zona de dano equivalentes para os mesmos valores de deslocamento. Esse comportamento era esperado, visto que a coesão não afeta a formulação da superfície potencial plástico no SR3.

φ [°]	ψ [°]	c [MPa]	$D_{m\acute{a}x}$ [%H]	PEMAG	$\partial\sigma'_v/\partial Z$ [MPa/m]	p_c [MPa]
34	24	Variável	10	0.10	0.012	120

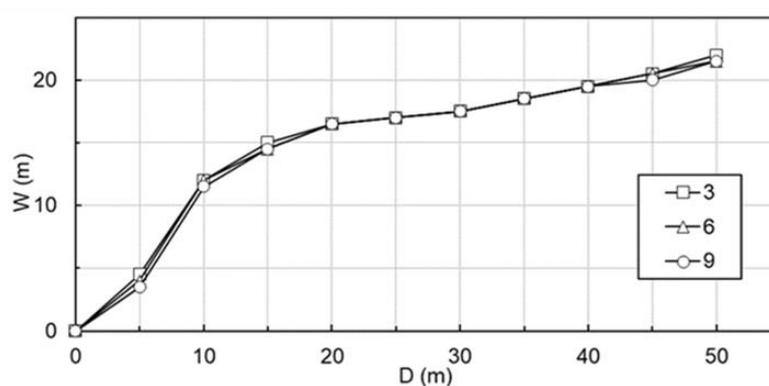


Figura 4.15 – Relação $D \times W$ para variação da coesão na modelagem com SR3.

Um segundo conjunto de testes é aplicado para verificar o impacto dos demais parâmetros do modelo (gradiente de tensões efetivas vertical, deslocamento máximo, PEMAG e pressão crítica) na modelagem de zonas de dano com SR3. Nas análises do gradiente de tensões efetivas vertical ($\partial\sigma'_v/\partial Z$), se assumem os seguintes valores: 0,010 MPa/m, 0,011 MPa/m, 0,012 MPa/m, 0,013 MPa/m e 0,014 MPa/m. A variação de $\partial\sigma'_v/\partial Z$, que define as tensões iniciais do modelo, praticamente não influencia na resposta plástica do modelo para pequenos deslocamentos. No entanto, para deslocamentos acima de 30 m, apresenta uma maior propagação das deformações plásticas, ou seja, maior largura de zona de dano, para menores valores de tensões iniciais, conforme Figura 4.16. A variação entre o maior e o menor valor de largura de zona de dano obtida nos modelos é de 8,9%.

φ [°]	ψ [°]	c [MPa]	$D_{m\acute{a}x}$ [%H]	PEMAG	$\partial\sigma'_v/\partial Z$ [MPa/m]	p_c [MPa]
34	24	6	10	0.10	Variável	120

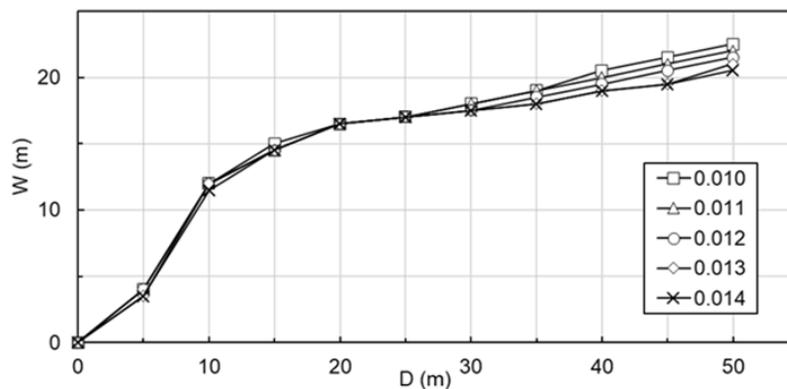


Figura 4.16 - Relação $D \times W$ para variação do gradiente de tensões efetivas vertical na modelagem com SR3.

A variável PEMAG é analisada considerando a variação do valor mínimo utilizado para delimitação da zona de dano, sendo estes: 0.05, 0.10 e 0.15. Os demais parâmetros invariáveis do modelo são apresentados juntamente com o resultado das análises na relação entre a largura da zona de dano e o deslocamento aplicado (Figura 4.17). Observa-se que o PEMAG mínimo no valor de 0.15 desconsidera pequenas deformações plásticas que surgem nos incrementos iniciais de deslocamento e com isso também limita a largura da zona de dano a valores menores. No caso de se adotar o valor de 0.05, a falha apresenta zona de dano nos incrementos iniciais de deslocamento e é considerada uma maior abrangência das

deformações plásticas na caracterização da largura da zona de dano. A largura da zona de dano medida pelo valor de 0.15 diverge do valor de 0.05 em 44%. Com isso, tem-se que, adotando menores valores de PEMAG mínimo, é considerada uma abordagem mais conservadora para delimitação da zona de dano.

φ [°]	ψ [°]	c [MPa]	$D_{m\acute{a}x}$ [%H]	PEMAG	$\partial\sigma'_v/\partial Z$ [MPa/m]	p_c [MPa]
34	24	6	10	Variável	0.010	120

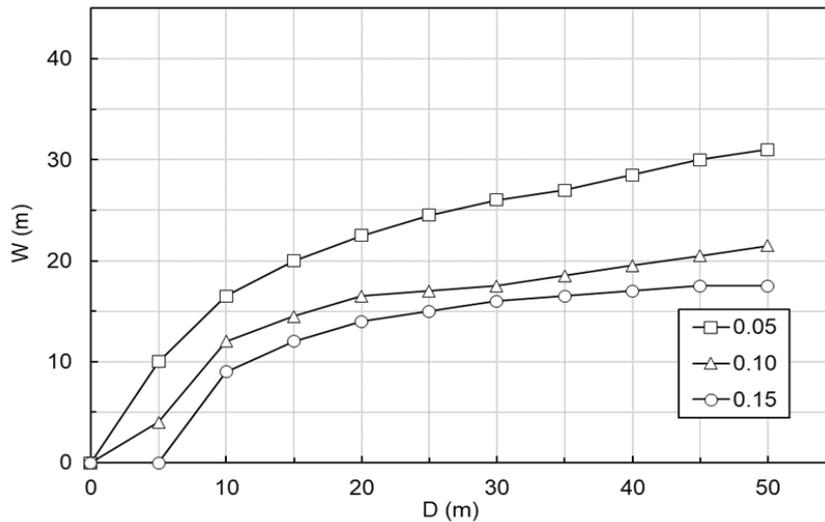


Figura 4.17 - Relação $D \times W$ para variação do PEMAG mínimo na modelagem com SR3.

A análise da influência do deslocamento máximo ($D_{m\acute{a}x}$) considera deslocamentos da ordem de: 2%H, 5%H, 10%H, 15%H e 20%H. O que corresponde a deslocamentos máximos de 10 m, 25 m, 50 m, 75 m e 100 m, visto que os modelos representam uma falha de 500 m de altura. A relação $D \times W$, obtida para o mesmo conjunto de parâmetros na variação do deslocamento é ilustrada na Figura 4.18. Nota-se que um dos resultados de medição da largura de zona de dano para a curva do deslocamento máximo de 20%H diverge dos demais.

φ	ψ	c	$D_{m\acute{a}x}$	PEMAG	$\partial\sigma'_v/\partial Z$	p_c
[°]	[°]	[MPa]	[%H]		[MPa/m]	[MPa]
34	24	6	Variável	0.10	0.010	120

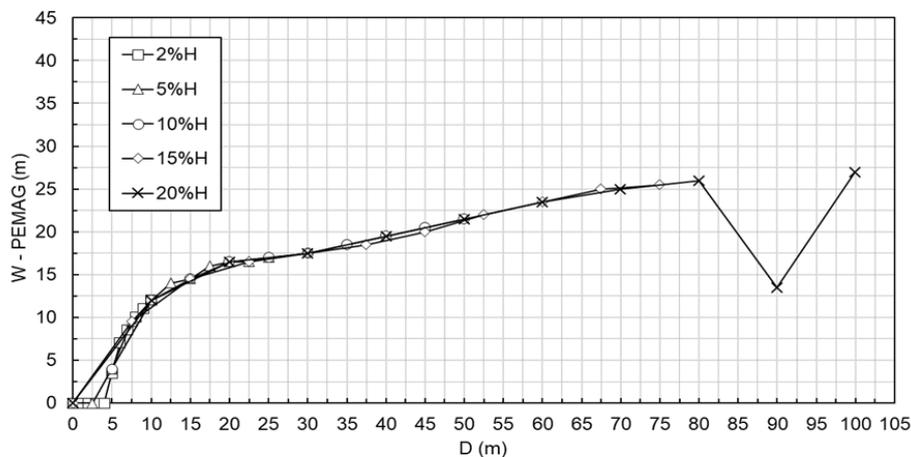


Figura 4.18 - Relação DxW obtida com variável PEMAG para variação do $D_{m\acute{a}x}$ na modelagem com SR3.

O resultado de largura de zona de dano divergente ao comportamento da curva DxW , referente ao deslocamento de 90m, se dá pela leitura da variável PEMAG na extração de dados. Uma vez que, devido à magnitude de deslocamento aplicada, a malha sofre maior distorção, implicando em variações nas deformações desviadoras. Nos passos (steps) iniciais de análise a variável PEMAG aumenta, mas a partir do step 5 passa a diminuir na região central, gerando picos em cada lado da falha, conforme Figura 4.19

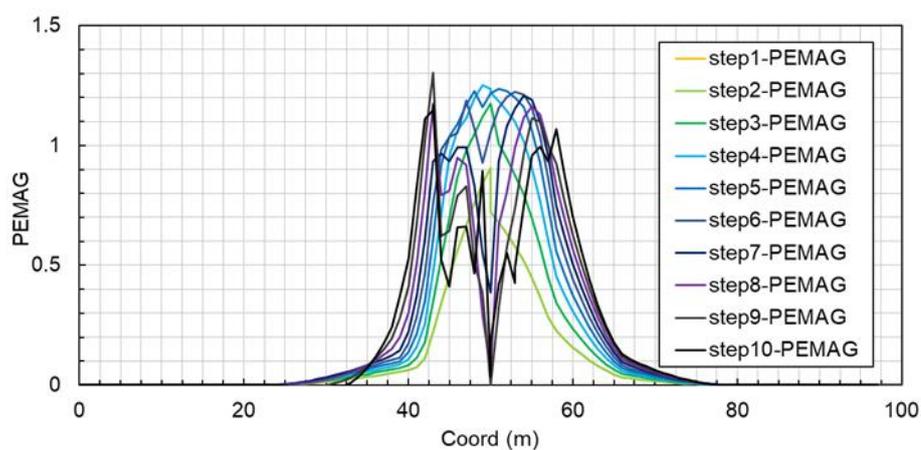


Figura 4.19 – Evolução da variável PEMAG ao longo da análise.

Consequentemente, ocorreram erros ao se aplicar a rotina de medição da largura da zona de dano, por esta ler apenas a largura da distribuição de PEMAG

com valores acima de 0.10 do primeiro pico, não lendo o valor total de abrangência da variável. Com isso, neste caso, por ser um procedimento mais simples e não requerer alterações no código de extração dos resultados, optou-se por utilizar a variável PEEQ, que representa o acúmulo do módulo dos incrementos de deformação plástica equivalente. (Ghanemnia, 2012). Já a variável PEMAG trabalha com as deformações plásticas principais acumuladas, levando em conta o sinal. A evolução da variável PEEQ ao longo da análise é representada na Figura 4.20.

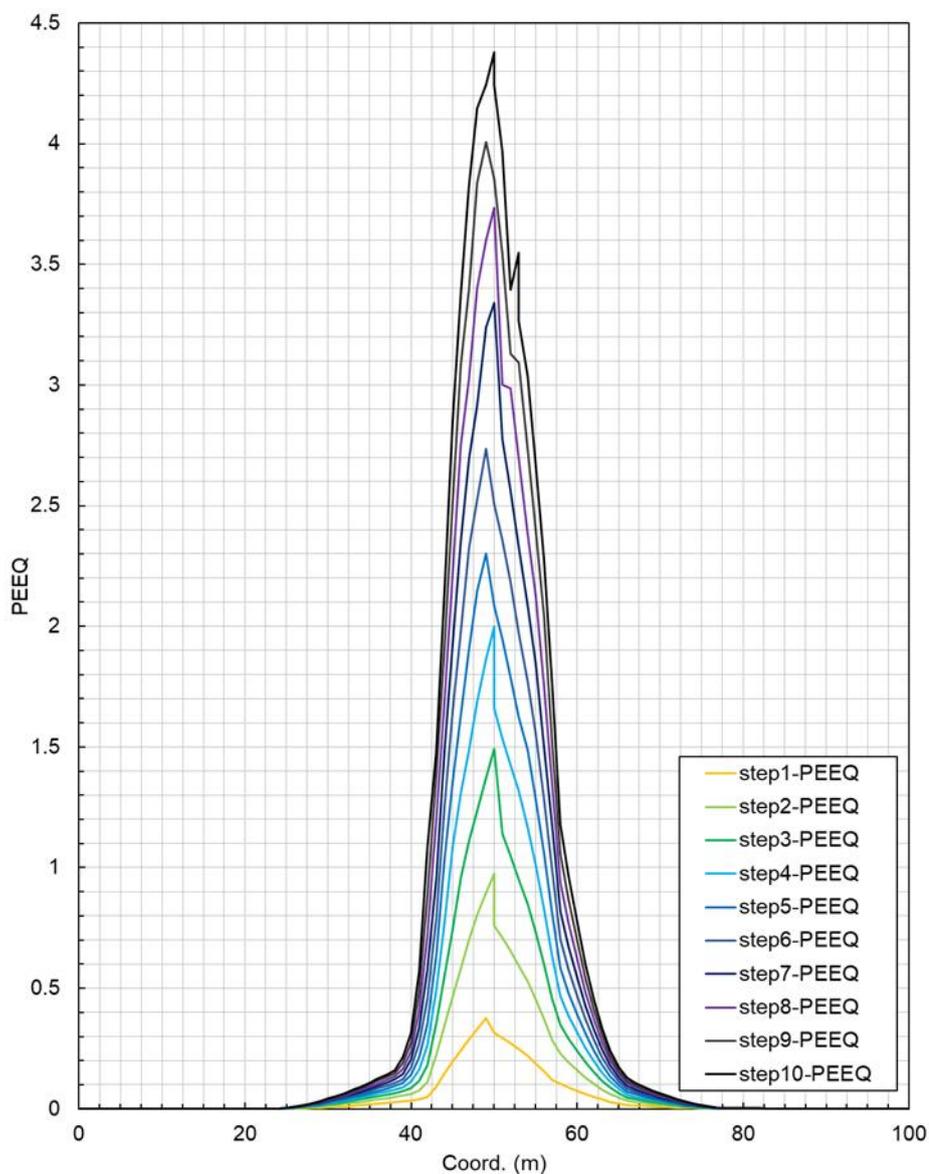


Figura 4.20 - Evolução da variável PEEQ ao longo da análise.

Apesar de as variáveis apresentarem comportamentos diferentes na região central da falha, a medição da largura da zona de dano considerando um limite

mínimo de 0.10, tanto para o PEEQ quanto para o PEMAG, se mostra similar para as duas variáveis, com diferenças desprezíveis, principalmente para deslocamentos menores, conforme Tabela 4. Nessa região limite da zona de dano há uma menor distorção da malha e o carregamento é monotônico, levando a respostas semelhantes.

Tabela 4 - Medição da largura da zona de dano considerando um limite mínimo de 0.10 para as variáveis PEMAG e PEEQ.

$D_{m\acute{a}x}$ [%H]	$W - PEMAG$ [m]	$W - PEEQ$ [m]	Diferença de W em [%]
2	12.00	12.00	0.00
5	17.00	17.00	0.00
10	21.50	22.00	2.27
15	25.50	25.50	0.00
20	27.00	28.50	5.26

A relação $D \times W$ obtida com a variável PEEQ é ilustrada na Figura 4.21. Nota-se um comportamento assintótico da curva $D \times W$ para o caso das duas variáveis. Ou seja, há uma maior variação no valor da largura da zona de dano para menores deslocamentos. Enquanto a largura da zona de dano entre o $D_{m\acute{a}x}$ de 10 m e de 25 m varia em 29,41%, a diferença da largura de zona de dano entre o $D_{m\acute{a}x}$ de 75 m e de 100 m varia apenas 10,53%. Esta relação se justifica na dissipação das tensões entre os elementos finitos e, com isso, a diminuição da propagação das deformações plásticas.

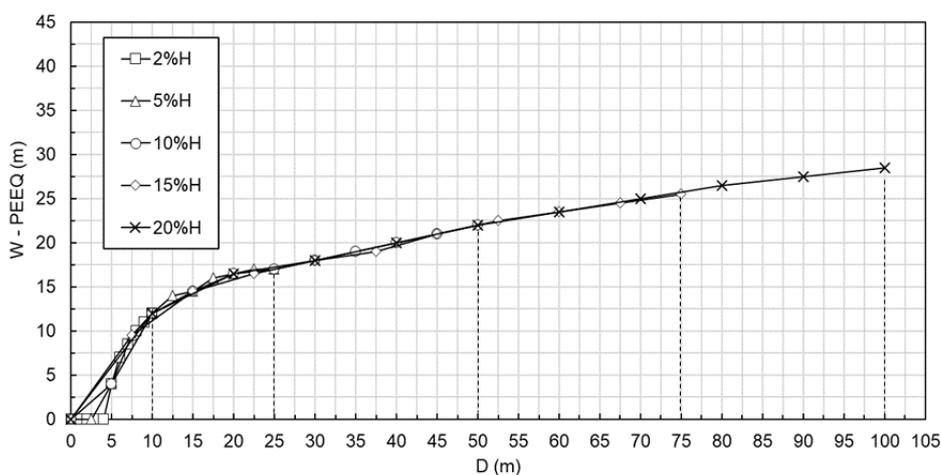


Figura 4.21 - Relação $D \times W$ com obtida com variável PEEQ para variação do $D_{m\acute{a}x}$ na modelagem com SR3

Por fim, é verificada a influência da pressão crítica (p_c) nas respostas da largura da zona de dano dos modelos com SR3. Visto que este parâmetro está relacionado à porosidade da rocha, na análise é considerada uma rocha carbonática de baixa porosidade (5%) e de alta porosidade (20%), resultando em materiais com p_c de 240 MPa e de 70 MPa, respectivamente (Schultz e Siddharthan, 2005). Visto que o p_c delimita o CAP do modelo, ou seja, a região de compressão/compactação, é verificada a distribuição da zona de dano em todo o comprimento de falha, não apenas em uma trajetória (*path*) na região central, para avaliar o impacto nas regiões de compressão geradas pelo mecanismo de deformação da falha. A resposta da distribuição da zona de dano é representada na Figura 4.22.

φ [°]	ψ [°]	c [MPa]	$D_{m\acute{a}x}$ [%H]	PEMAG	$\partial\sigma'_v/\partial Z$ [MPa/m]	p_c [MPa]
34	24	6	10	0.10	0.010	Variável

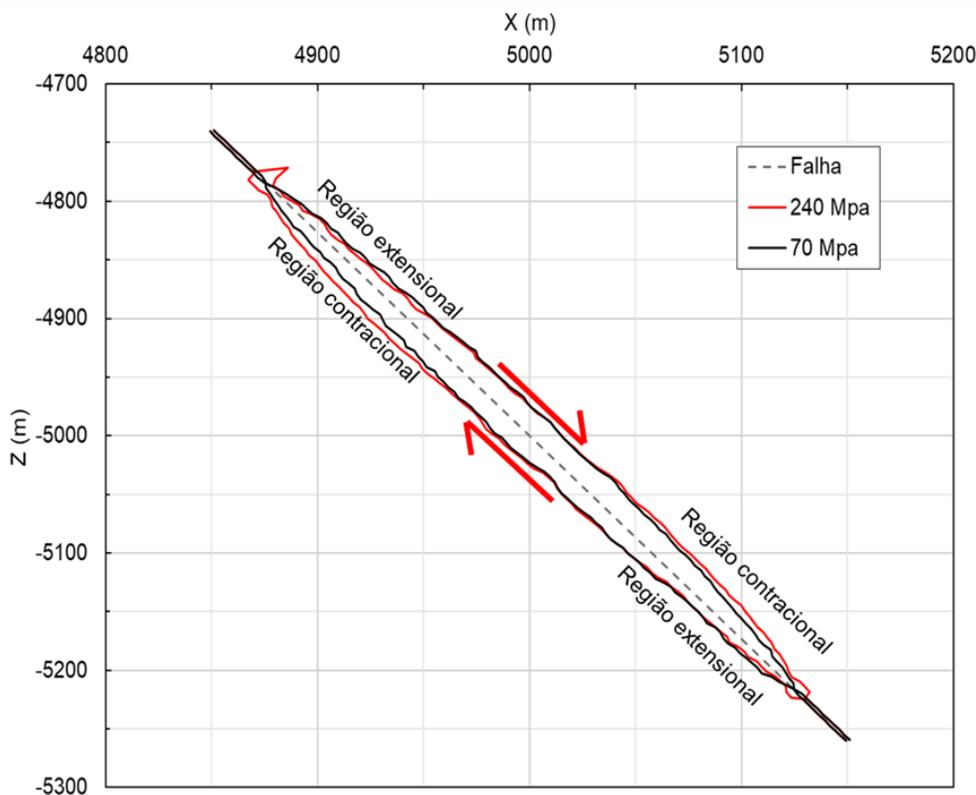


Figura 4.22 – Distribuição da zona de dano ao longo da falha considerando os valores de p_c de 240 MPa e 70 MPa com esquematização do mecanismo de deformação de uma falha normal.

Pode-se verificar que as regiões extensionais e a região de cisalhamento no centro da falha sofrem pouca alteração com a mudança do p_c limite. No entanto, a região contracional apresenta diferenças de até 22% na largura da zona de dano.

Menores valores de p_c (maior porosidade) resultam em uma menor envoltória, tanto de plastificação como potencial plástico, controlando a propagação das tensões e das deformações. Por outro lado, maiores valores de p_c (menor porosidade), resultam em envoltórias maiores, possibilitando uma maior propagação das tensões e deformações cisalhantes, e maiores valores de zona de dano. Algumas análises considerando a variação deste parâmetro em comparação à resposta obtida com o modelo de MHC são discutidas no tópico 4.3 a seguir.

4.3.

MHCxSR3: Comparação da zona de dano resultante de uma falha isolada

As modelagens numéricas com o modelo constitutivo SR3 são analisadas considerando uma rocha carbonática de baixa porosidade (5%) e outra de alta porosidade (20%), resultando em materiais com p_c de 240 MPa e de 70 MPa, respectivamente (Schultz e Siddharthan, 2005). Estes modelos são comparados com o modelo numérico de MHC a fim de se ter uma melhor compreensão da simulação do comportamento das rochas na formação de zonas de dano considerando os dois modelos constitutivos.

As simulações feitas considerando MHC e SR3 apresentam respostas diferentes de distribuição da variável PEMAG utilizada na definição da zona de dano, conforme Figura 4.23. A zona de dano gerada pelo MHC apresenta uma concentração das deformações na região central, mas possui uma maior distribuição dessas deformações ao longo da falha, enquanto os modelos que utilizam o CAP (SR3) mostram uma maior intensidade dessa concentração na região central.

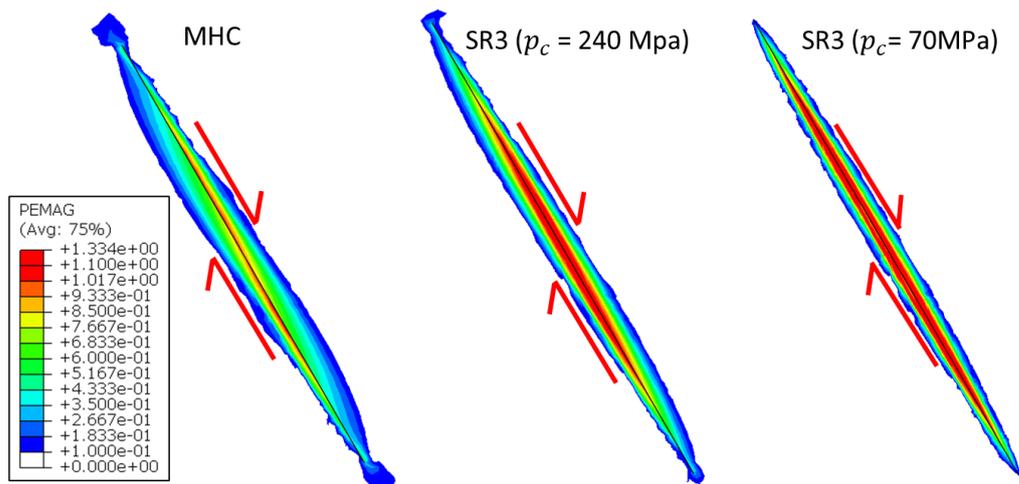


Figura 4.23 – Distribuição da variável PEMAG em uma falha isolada para o MHC e para o SR3 com valor de pressão crítica de 240 MPa e de 70 MPa.

A Figura 4.24 ilustra a delimitação da zona de dano em todo o comprimento da falha para cada modelo, considerando um PEMAG mínimo de 0.10. A diminuição do p_c limita as deformações das regiões contracionais geradas pelo mecanismo de formação da zona de dano da falha. Ou seja, enquanto no MHC essas regiões deformam indefinidamente (diminuindo a concentração das deformações na região central da falha), no SR3 a deformação da região contracional é limitada. Com isso, a zona de dano gerada será menor que a do MHC. Ou seja, quanto menor o valor de p_c maior será a diferença entre a largura da zona de dano gerada pelo MHC e pelo SR3.

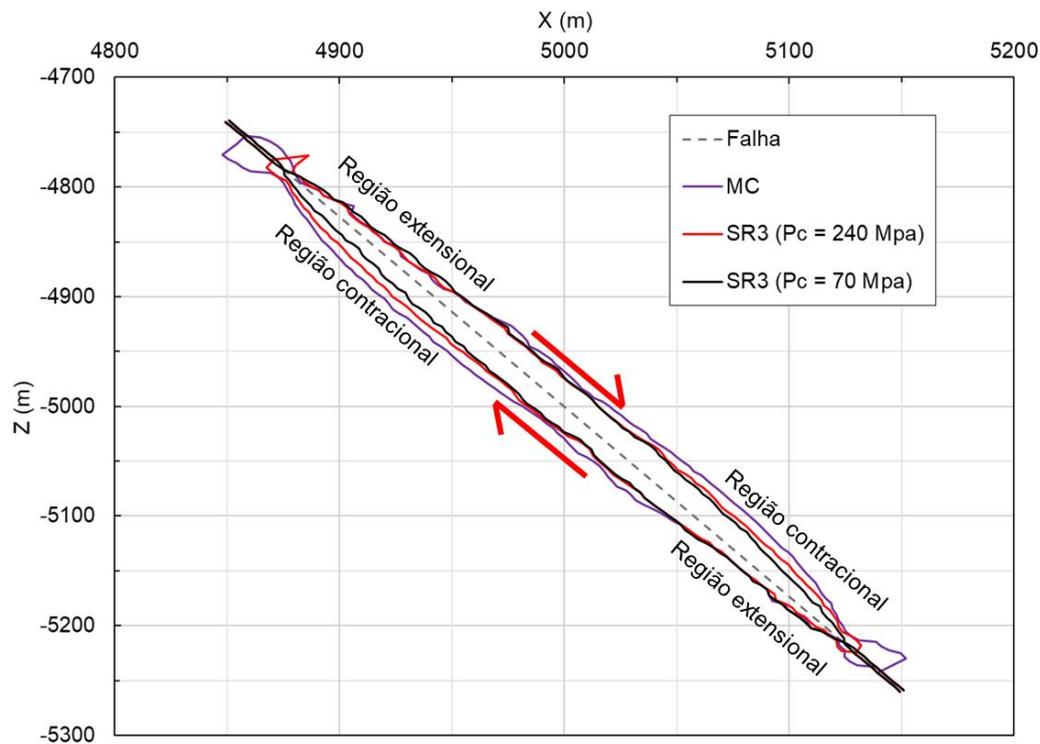


Figura 4.24 – Delimitação da zona de dano ao longo da falha para diferentes modelos.

Analisando as trajetórias de tensão e deformação, pode-se ter uma melhor compreensão do comportamento da zona de dano. Com isso, é traçada a trajetória de tensão de um ponto de Gauss na extremidade superior, no centro e na extremidade inferior das falhas simuladas em cada modelo. As trajetórias são apresentadas no plano $p - q^*$ considerando o valor da tensão desviadora normalizada (q^*), ou seja, sem influência do ângulo de Lode, para que haja compatibilidade da trajetória das tensões obtidas do Abaqus® com as envoltórias plotadas nos gráficos. De forma equivalente às tensões, a trajetória das deformações é apresentada no plano $\varepsilon_{dev} - \varepsilon_{vol}$.

A Figura 4.25 ilustra a trajetória de tensões no modelo de MHC. A trajetória das tensões da extremidade superior aponta um comportamento de tração, pois as tensões partem de uma região elástica, atingem a envoltória de plastificação e caminham para valores negativos de p' , indicando uma região sob tração, propensa à formação de fraturas. No entanto, na região central, ao atingir a envoltória de plastificação, as tensões caminham para valores positivos de p' , caracterizando uma região de cisalhamento. Na extremidade inferior, observa-se que as tensões caminham na superfície de plastificação de MHC até atingir elevados valores de p' ,

aproximadamente 1150 MPa, o que indica que estruturas de cisalhamento/compactação podem se formar na zona de dano.

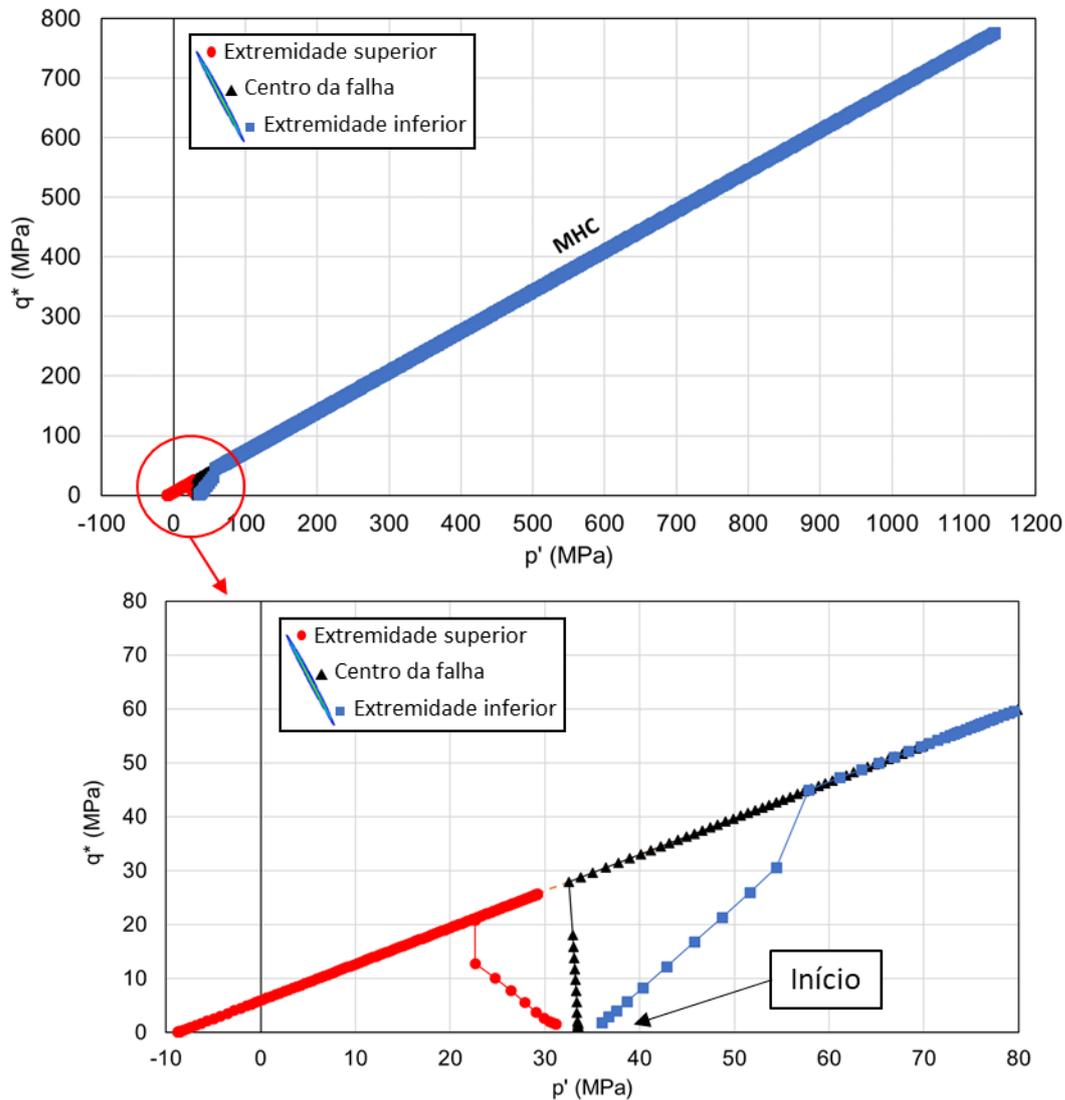


Figura 4.25 - Trajetória de tensões do modelo de MHC para uma falha.

Devido aos elevados valores de p' na trajetória das tensões da extremidade inferior na superfície de plastificação de MHC, supõe-se que há um comportamento de compressão/compactação na zona de dano. No entanto, o modelo constitutivo de MHC não é capaz de simular este tipo de deformação, visto que não há alteração na direção dos incrementos de deformação plástica na superfície potencial plástico, sendo estes sempre incrementos extensionais. Conforme observado na Figura 4.26, independentemente do valor de p' percorrido na trajetória das tensões, a trajetória das deformações indica apenas incrementos de deformação plástica volumétrica negativo (extensional). Observa-se também que as deformações resultantes no

centro da falha e na extremidade inferior (correspondentes às tensões que caminham para valores positivos de p') são muito superiores às da extremidade superior.

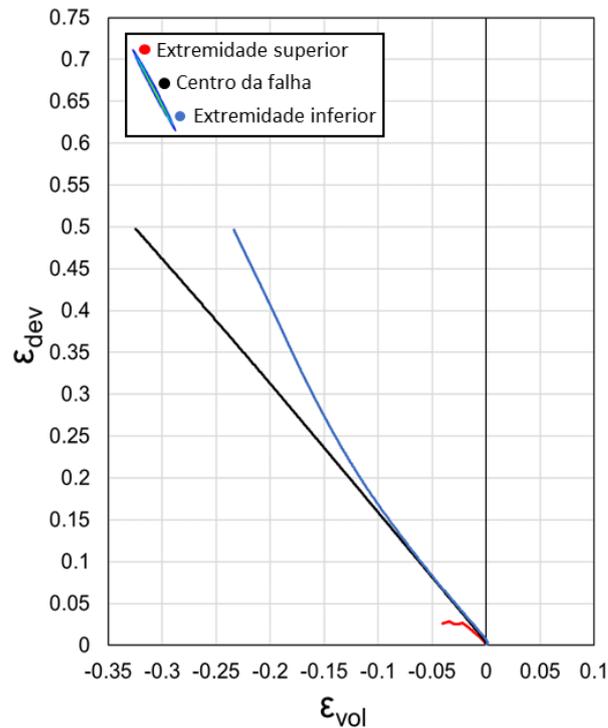


Figura 4.26 - Trajetória de deformações do modelo de MHC para uma falha.

As trajetórias das tensões para o modelo do SR3 com p_c de 240 MPa são apresentadas na Figura 4.27, incluindo as envoltórias de plastificação, tanto do SR3 como a do MHC. Apesar de apresentar a limitação do CAP, o comportamento das tensões é bastante similar. Na extremidade superior, a trajetória das tensões caminha para região de tração (valores negativos de p'). Enquanto que, no centro da falha e na extremidade inferior, os elementos plastificam e caminham na envoltória em valores positivos de p' que caracterizam uma região de cisalhamento. Diferentemente do MHC, a trajetória das tensões simula o cisalhamento sem atingir elevados valores de p' , visto que a região que caracteriza o cisalhamento é limitada pelo CAP. As trajetórias das deformações do modelo que adota o SR3 com p_c de 240 MPa são apresentadas na Figura 4.28. As trajetórias representam o comportamento extensional da zona de dano nos pontos escolhidos, ou seja, deformações negativas. Este comportamento condiz com o comportamento das trajetórias de tensões, as quais apontaram apenas regiões de tração e cisalhamento, que são caracterizadas pela formação de fraturas e estruturas de dilatação.

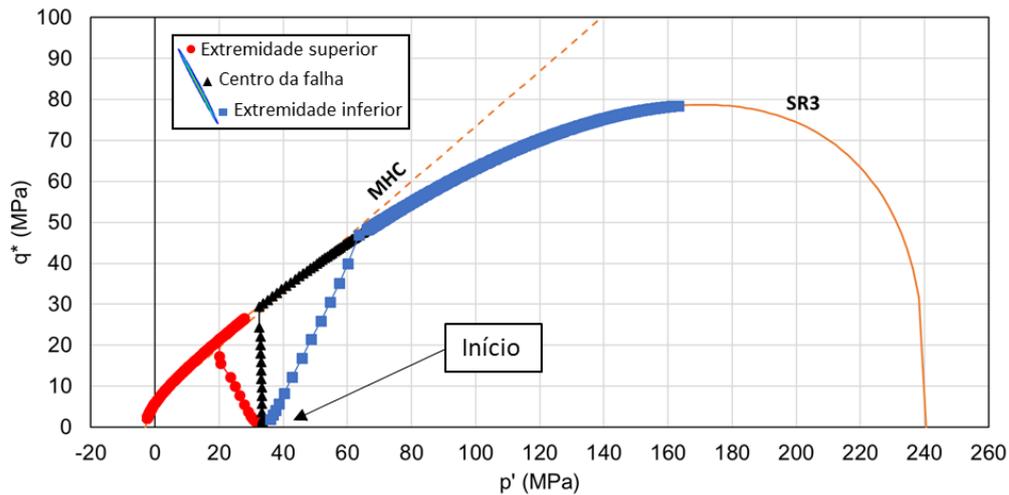


Figura 4.27 - Trajetória de tensões do modelo SR3 com pressão crítica de 240 MPa para uma falha.

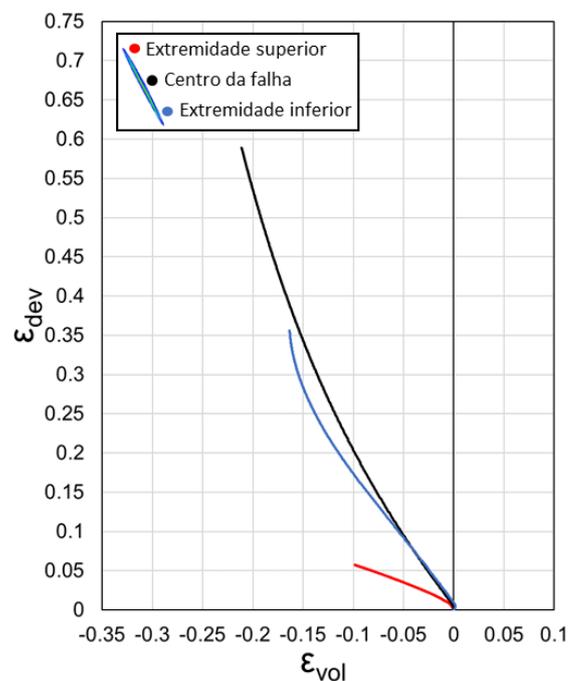


Figura 4.28 - Trajetória de deformações do modelo SR3 com pressão crítica de 240 MPa para uma falha.

Por meio da equivalência de parâmetros, a envoltória de plastificação do SR3 com p_c de 70 MPa e do MHC é representada na Figura 4.29, bem como a trajetória das tensões do SR3. As trajetórias de deformação para o mesmo modelo são apresentadas na Figura 4.30. De forma similar aos modelos anteriores, ao se analisar as trajetórias referentes à extremidade superior, as tensões indicam uma região de tração com deformações extensionais, ou seja, uma região passível de apresentar fraturas. As tensões no ponto da região central da falha plastificam em uma região

de cisalhamento e, com o aumento de p' , caminham para em direção a região de transição do cisalhamento para compactação. Este comportamento é condizente com a resposta das deformações deste ponto, que apresenta grande influência da deformação desviadora, visto que, na superfície potencial plástico, nesta região o incremento de deformação plástica desviadora possui maior influência do que o incremento de deformação volumétrica. O comportamento da extremidade inferior neste modelo é diferente daquele dos modelos apresentados anteriormente, pois inclui deformações plásticas de compressão, devido à limitação mais restritiva do CAP. Ao se analisar a trajetória das tensões deste ponto, nota-se que a plastificação ocorre na região de transição cisalhamento/compactação e, à medida que o valor de p' aumenta, passa a caminhar para o CAP, caracterizando uma região de compactação. De forma equivalente, as deformações iniciam apresentando um comportamento extensional, mas depois os incrementos de deformação plástica volumétrica passam a indicar deformações de compressão (positivas).

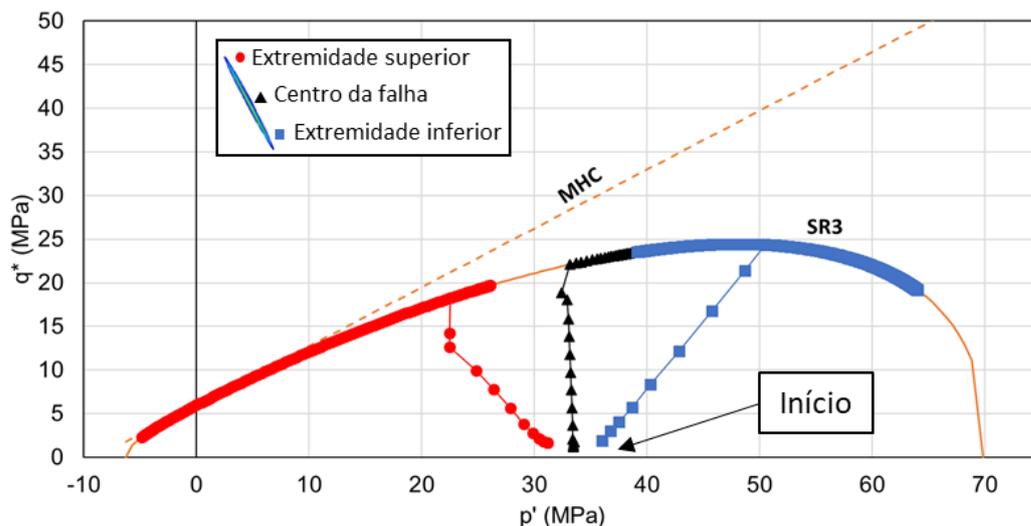


Figura 4.29 - Trajetória de tensões do modelo SR3 com pressão crítica de 70 MPa para uma falha.

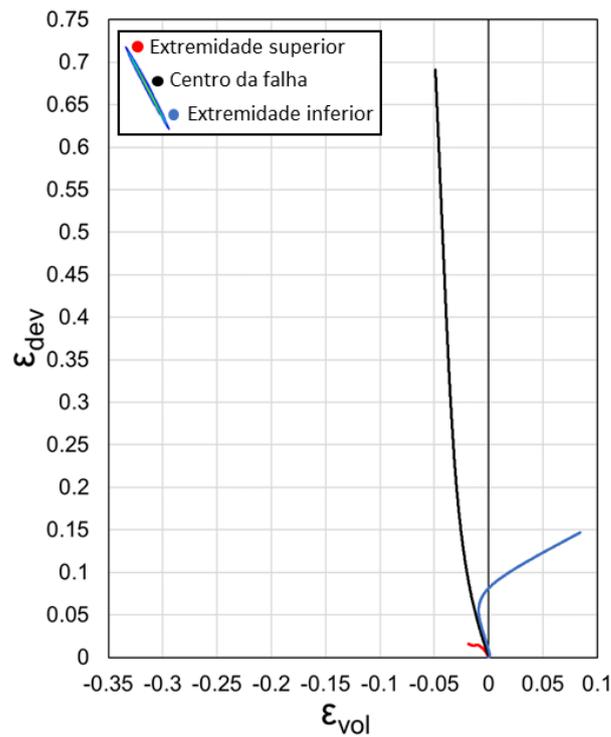


Figura 4.30 - Trajetória de deformações do modelo SR3 com pressão crítica de 70 MPa para uma falha.

De forma geral, tem-se então que, para a região de tração da zona de dano, os modelos constitutivos apresentam respostas semelhantes, mesmo com a variação do valor da pressão crítica, independente da rocha possuir baixa porosidade (Figura 4.31), ou alta porosidade (Figura 4.32). Ao se comparar o MHC com cada modelo do SR3, observa-se que as tensões iniciam juntas na fase elástica e possuem um comportamento plástico das tensões semelhante na superfície de plastificação. Com menores diferenças para alta porosidade.

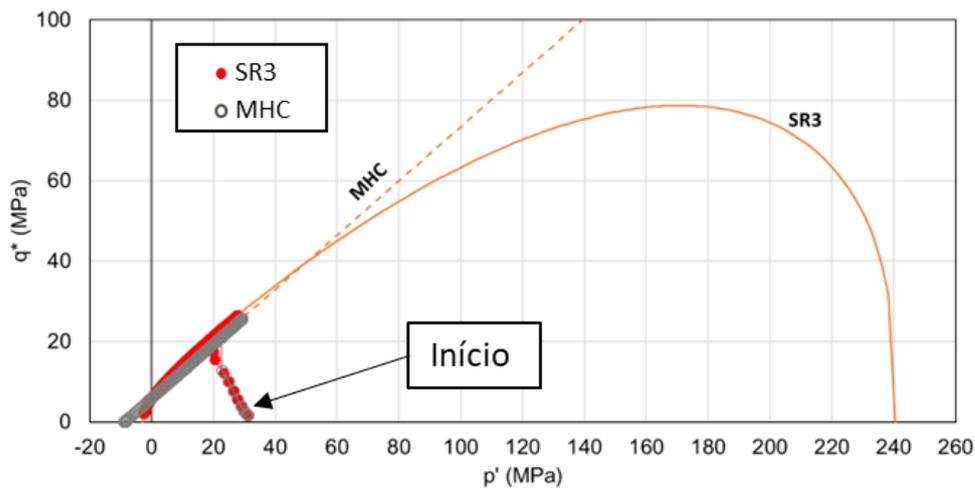


Figura 4.31 – Trajetória das tensões da extremidade superior considerando MHC e SR3 de baixa porosidade.

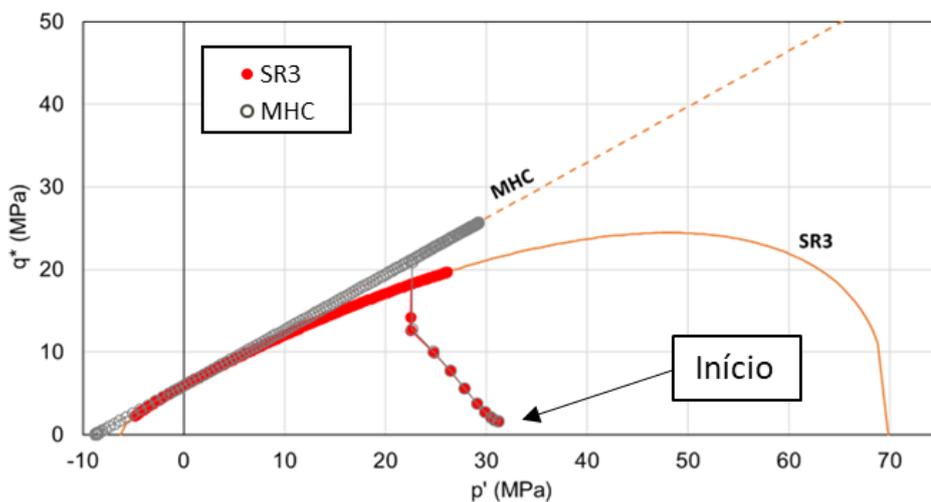


Figura 4.32 - Trajetória das tensões da extremidade superior considerando MHC e SR3 de alta porosidade.

No entanto, em regiões de cisalhamento puro, a porosidade da rocha passa a ter certa influência na trajetória das tensões. Para valores menores de porosidade (maior p_c), as superfícies de plastificação são próximas, fazendo com que a trajetória das tensões se propague de forma semelhante (Figura 4.33). Contudo, uma maior porosidade (menor p_c), apresenta uma maior limitação na região de cisalhamento e afasta as superfícies, fazendo com que as tensões caminhem mais rapidamente para a região de transição no SR3 e apresente um comportamento mais divergente do MHC, conforme Figura 4.34.

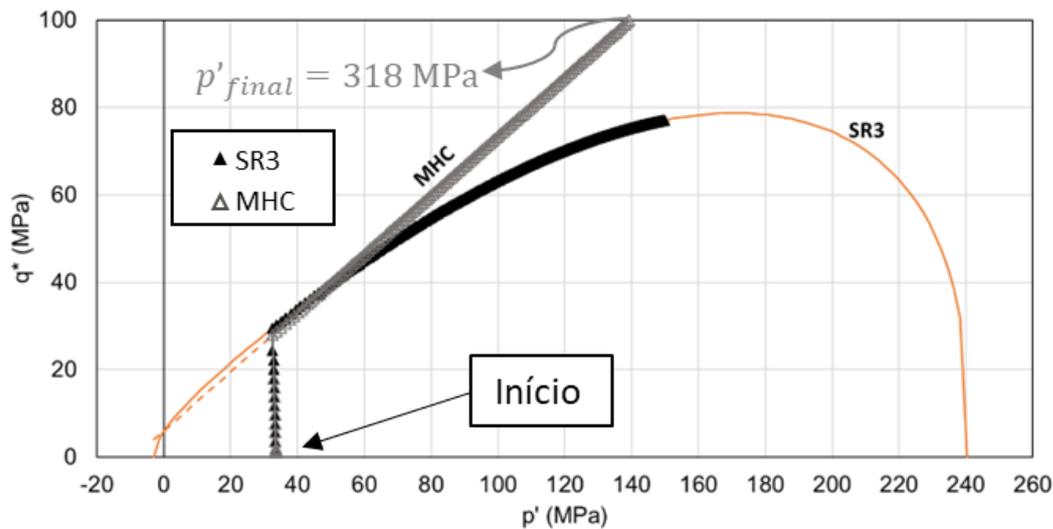


Figura 4.33 - Trajetória das tensões do centro da falha considerando MHC e SR3 de baixa porosidade.

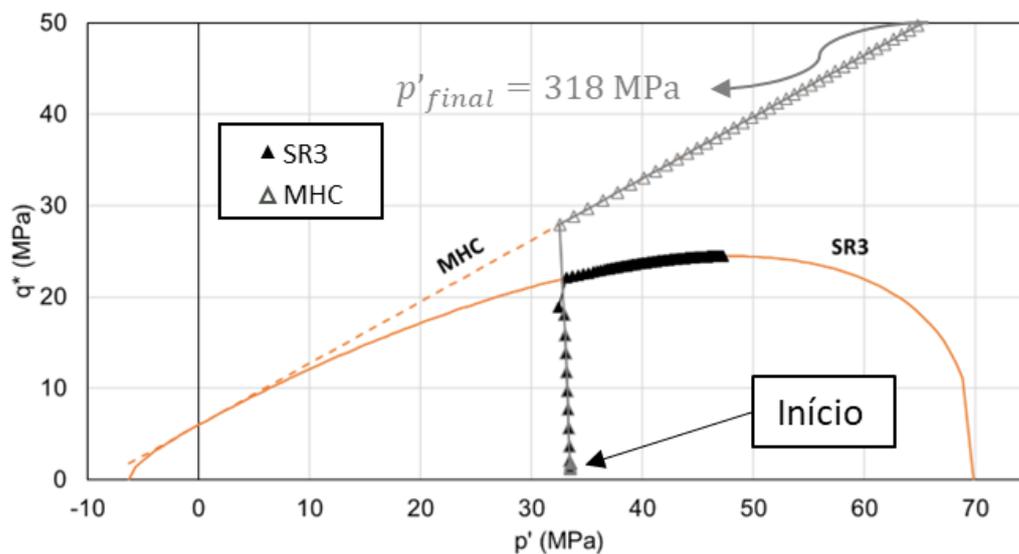


Figura 4.34 - Trajetória das tensões do centro da falha considerando MHC e SR3 de alta porosidade.

A caracterização da região de compressão da zona de dano, ainda que com a utilização do CAP, apresentou um comportamento aproximado entre o MHC e o SR3 para rochas de baixa porosidade (Figura 4.35). No entanto, em rochas de alta porosidade, devido ao efeito da compactação que não pode ser representada pelo MHC, as respostas dos modelos se divergiram (Figura 4.36).

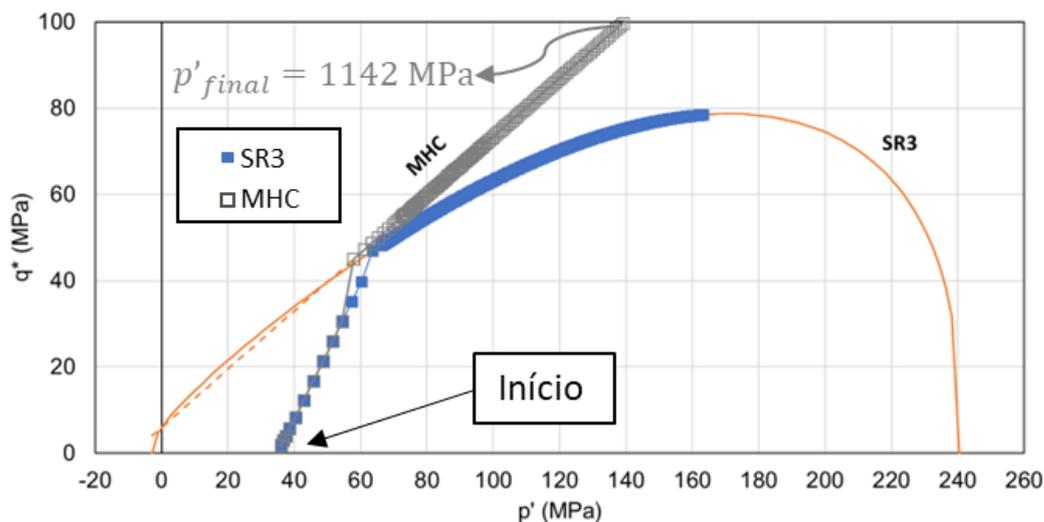


Figura 4.35 - Trajetória das tensões da extremidade inferior considerando MHC e SR3 de baixa porosidade.

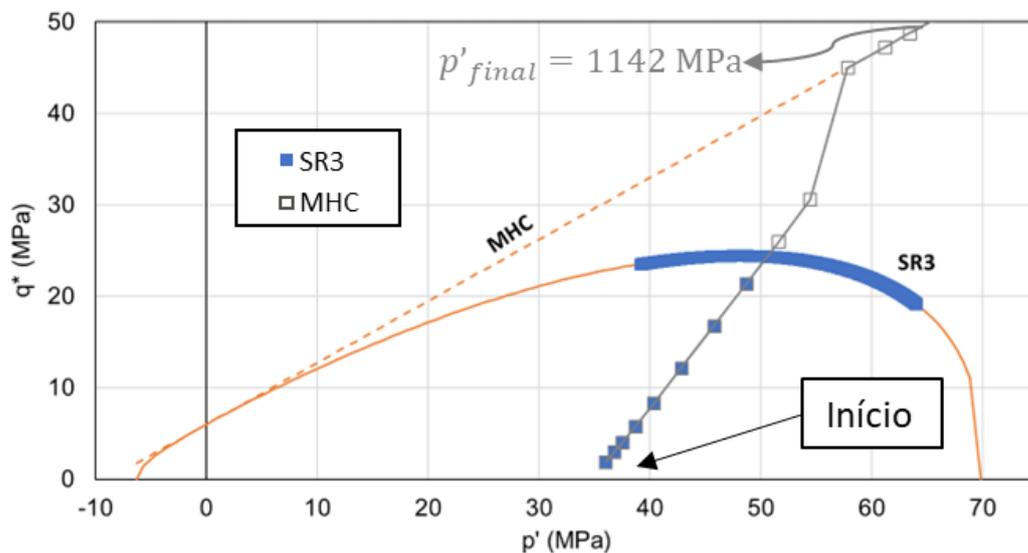


Figura 4.36 - Trajetória das tensões da extremidade inferior considerando MHC e SR3 de alta porosidade.

4.4.

MHCxSR3: Comparação da zona de dano resultante da conexão entre duas falhas

Os testes realizados para a simulação da zona de dano de conexão entre duas falhas geológicas consideram os parâmetros de material e a geometria de falha apresentados anteriormente nas Tabelas Tabela 1 e Tabela 2. É feita uma análise paramétrica em três grupos de modelos com duas falhas normais de rochas carbonáticas. Esta análise utiliza o MHC e o SR3 para simular o comportamento do material. Varia-se a distância entre as falhas (A) e a sobreposição (B) conforme

Figura 4.37. No primeiro grupo, o valor de B é fixado em 100 m, variando apenas o valor de A. No segundo e terceiro grupo, o valor de A é fixado em -50 m e 50 m, respectivamente, enquanto o valor de B varia. As falhas possuem o mesmo comprimento (500 m) e mesma inclinação (60°).

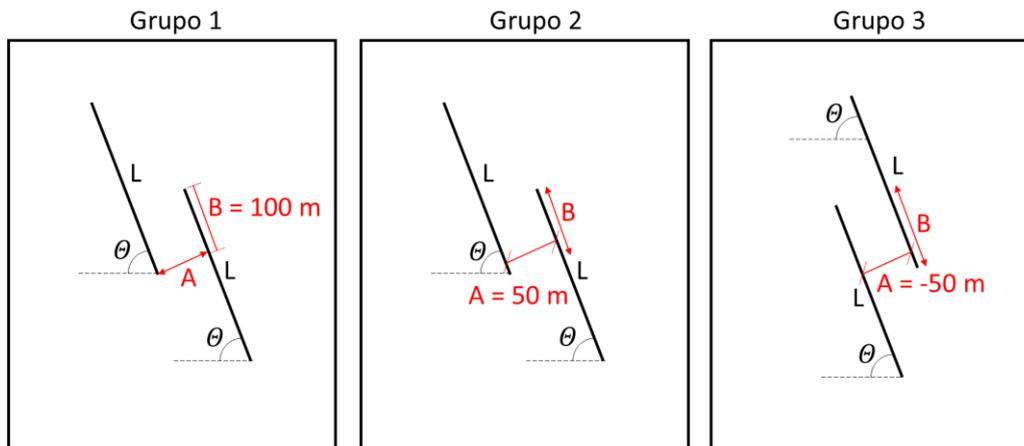
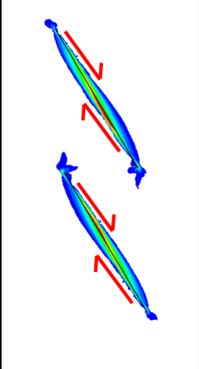
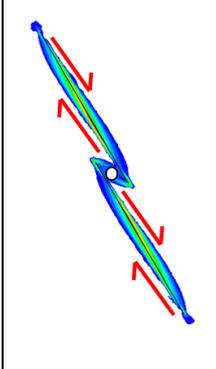
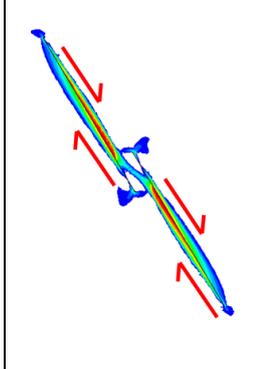
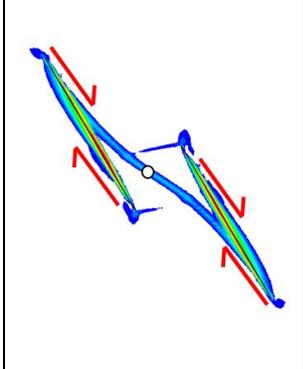
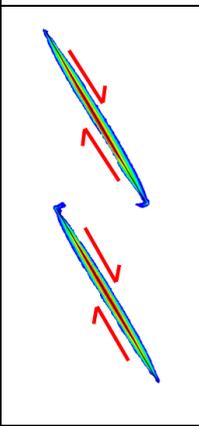
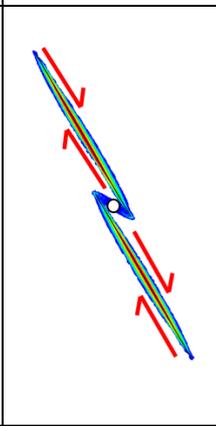
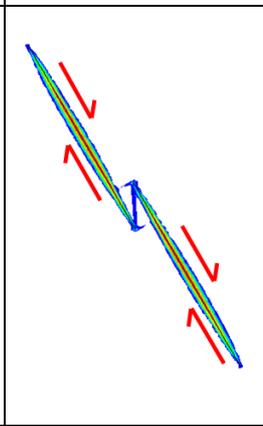
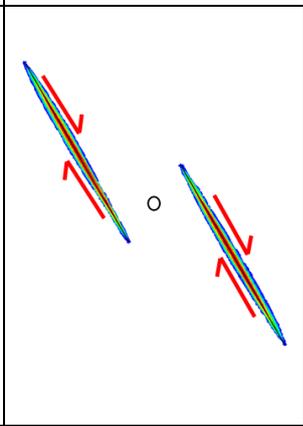


Figura 4.37 – Configuração geométrica dos grupos de análise do estudo paramétrico da interação entre duas falhas considerando $L = 500$ m e $\theta = 60^\circ$.

Os primeiros 4 modelos (M1 à M4), referentes ao Grupo 1, consideram os valores de A igual a -200 m, -50 m, 50 m, e 200 m. A Tabela 5 mostra os resultados da variável PEMAG para cada caso. Nota-se que, para valores de $A = -200$ m, não há uma formação clara da zona de dano de conexão. Quando $A = -50$ m, a zona de dano de conexão formada pelo SR3 e pelo MHC são semelhantes, variando apenas a intensidade das deformações. No entanto, para valores positivos de A, a zona de dano de conexão apresenta diferentes distribuições da variável PEMAG. Vale ressaltar que valores negativos ou positivos de A levam à extensão ou compressão da região entre as falhas, respectivamente.

Tabela 5 – Resultados da variável PEMAG para o grupo 1.

B = 100 m				
	M1	M2	M3	M4
	A = - 200 m	A = - 50 m	A = 50 m	A = 200 m
MHC				
SR3				

A fim de se analisar melhor os resultados, são traçadas as trajetórias de tensão e deformação nos pontos brancos indicados para os modelos M2 e M4. As trajetórias das tensões e deformações do modelo M2 são apresentadas na Figura 4.38 e Figura 4.39, respectivamente. Nota-se que, como indicado pelo mecanismo de formação das falhas, a região é propensa à formação de estruturas de dilatação/fraturas favoráveis ao fluxo de fluidos, pois as tensões caminham para baixos valores de p' e as deformações são extensionais (negativas). Ademais, as envoltórias na região percorrida pelas tensões se assemelham, justificando a geometria semelhante da zona de dano de conexão formada pelo MHC e pelo SR3.

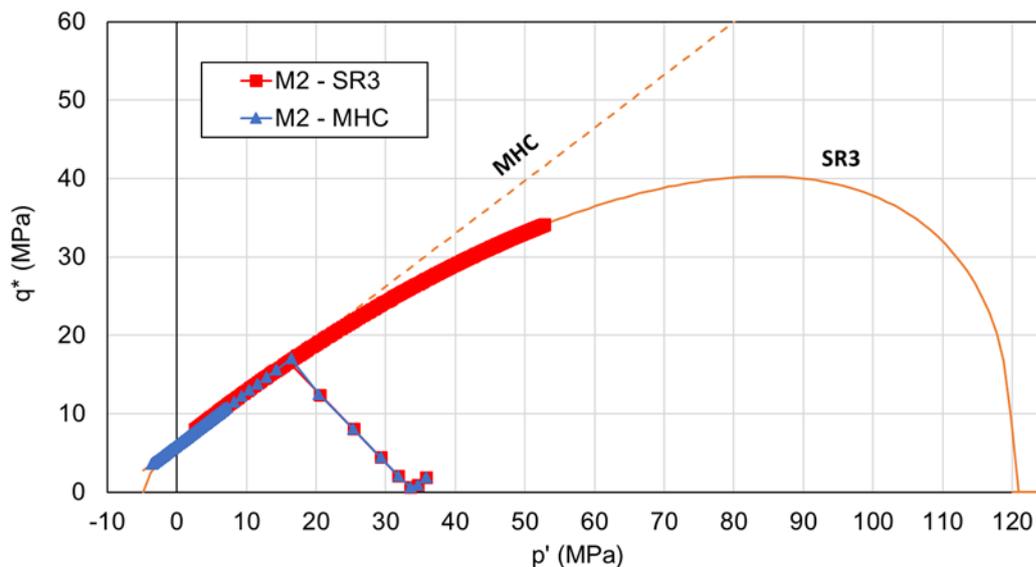


Figura 4.38 – Trajetórias de tensão referente ao modelo M2.

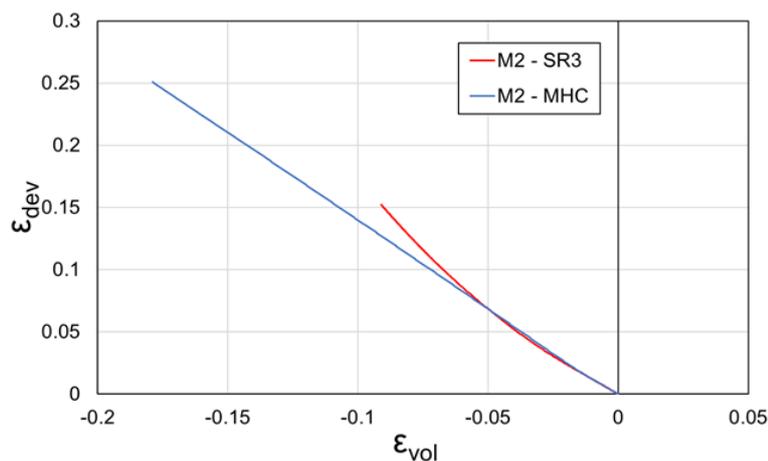


Figura 4.39 - Trajetórias de deformação referente ao modelo M2.

No M4, o movimento relativo das falhas gera zonas de dano de conexão em uma região de compressão. A diferença entre as zonas de dano do MHC e do SR3 geradas pelo M4 se justifica pelo acúmulo de deformações que o modelo de MHC apresenta em regiões de compressão (elevado p'). A trajetória das tensões do M4 caminha na envoltória de MHC até um p'_{final} de 537 MPa, enquanto as tensões no SR3 são restritas pelo CAP (Figura 4.40). Apesar de as tensões e o mecanismo de deformação da falha indicarem uma região de compressão/compactação (propensa à formação de estruturas de compactação), o MHC apresenta apenas deformações extensionais após a plastificação do modelo. Essas deformações se acumulam e se tornam muito superiores às deformações do SR3 (Figura 4.41).

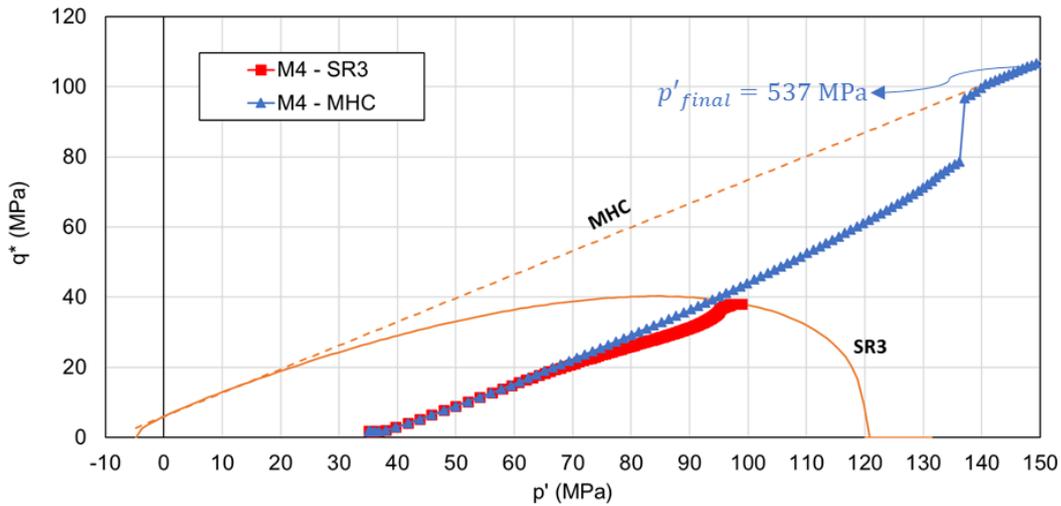


Figura 4.40 - Trajetórias de tensão referente ao modelo M4.

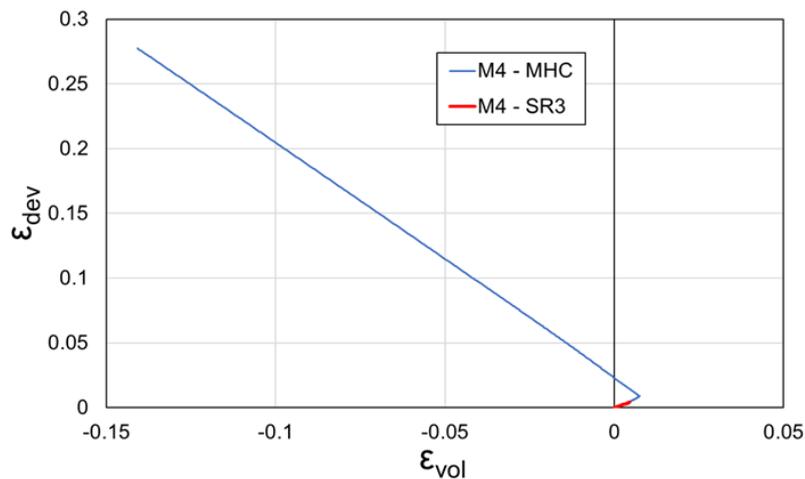


Figura 4.41 - Trajetórias de deformação referente ao modelo M4.

No segundo grupo de análise são simulados mais quatro modelos (M5 a M8), variando o valor de B em -200 m, -100 m, 100 m e 200 m, mantendo a distância de A fixa em 50 m. O resultado do PEMAG para cada configuração é apresentado na Tabela 6. Observa-se que, mais uma vez, a posição relativa entre as falhas gera diferentes formatos de zona de dano. Valores negativos de B formam zonas de dano de conexão estreitas e similares em uma região compressiva, ao passo que valores positivos de B têm diferentes formatos de zona de dano de conexão.

Tabela 6 - Resultados da variável PEMAG para o grupo 2.

		A = 50 m			
		M5	M6	M7 = M3	M8
		B = - 200 m	B = - 100 m	B = 100 m	B = 200 m
MHC					
SR3					

Valores positivos de B implicam em uma maior proximidade entre as falhas. Com isso, há uma concentração de tensão na região de interação das falhas, formando uma região de alta compressão. Ao se analisar a trajetória das tensões do M7 (equivalente ao M3), nos pontos brancos indicados, nota-se que o modelo de MHC chega a valores muito elevados de p' , terminando a simulação com o valor de 1794 MPa (Figura 4.42). Já o SR3 limita as tensões na compactação. O que indica que a região é passível de formação de barreiras para o fluxo de fluidos. Em termos de deformações plásticas, o MHC apresenta deformações extensionais, como é característico do modelo, enquanto surgem deformações de compressão no SR3 (Figura 4.43). Como os modelos deformam de forma diferente em regiões com valores elevados de p' , a formação da zona de dano de conexão possui geometrias diferentes.

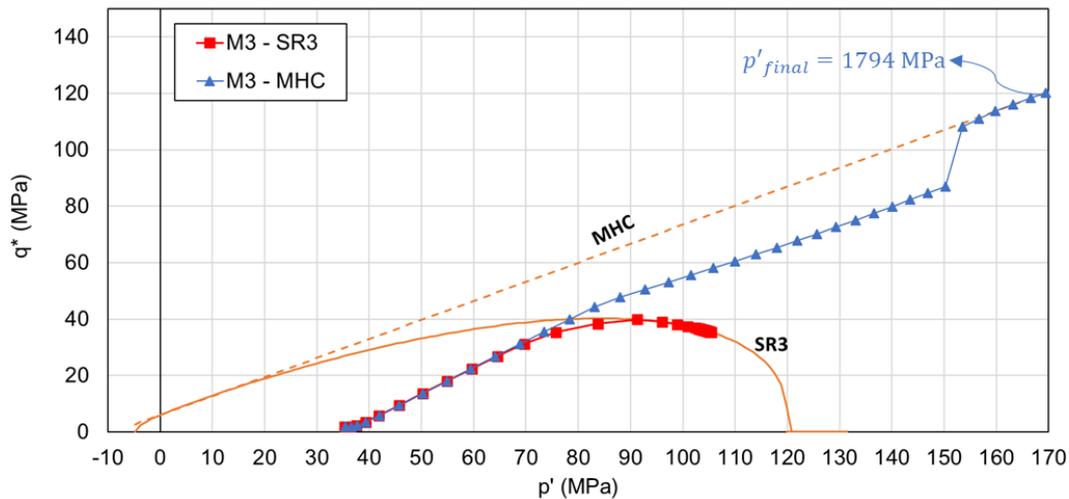


Figura 4.42 - Trajetórias de tensão referente ao modelo M3.

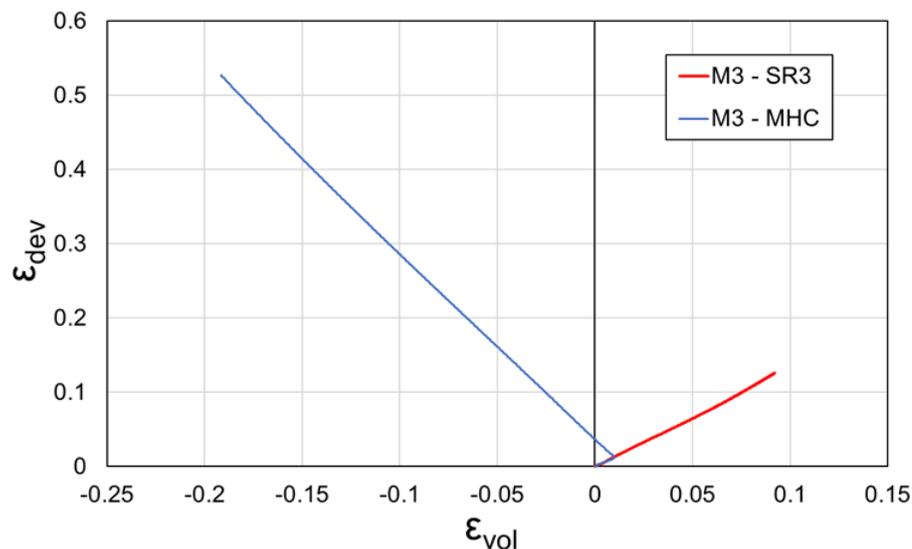
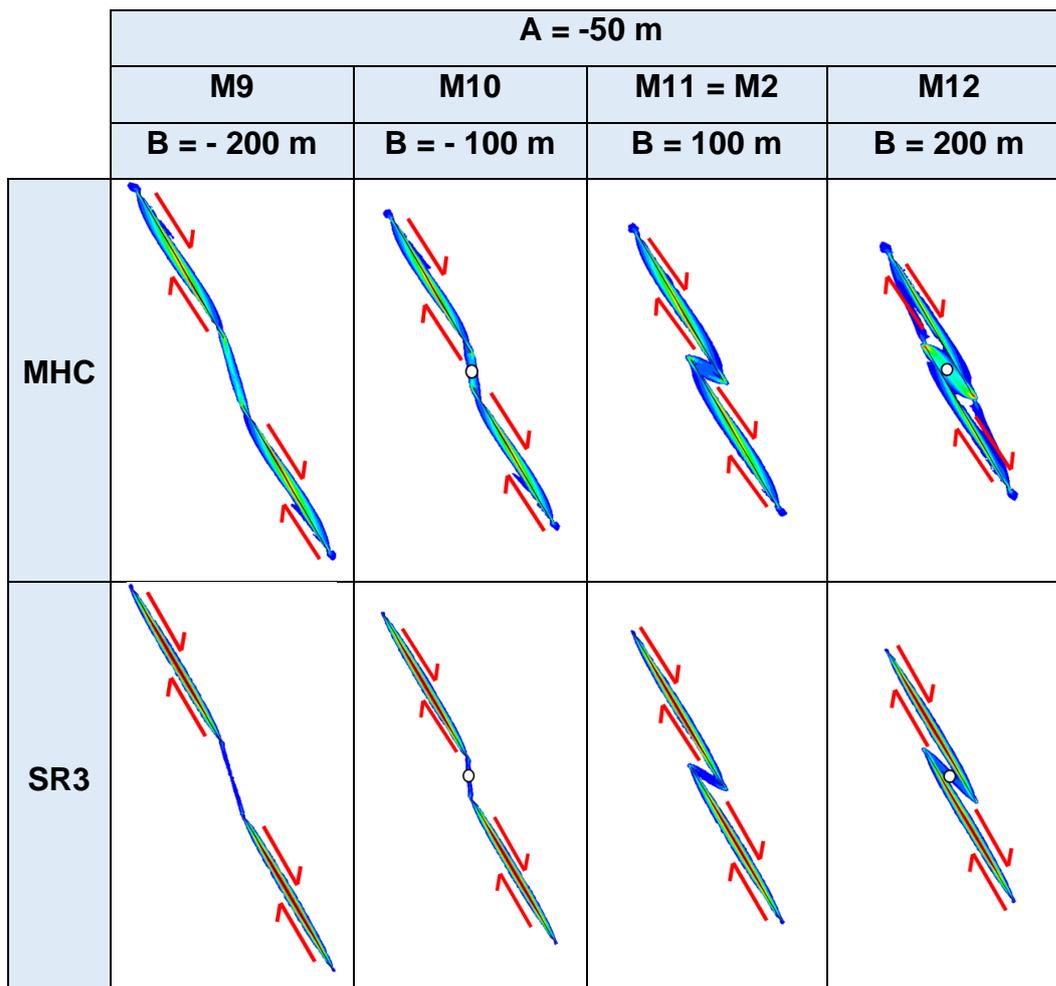


Figura 4.43 - Trajetórias de deformação referente ao modelo M3.

O terceiro grupo de análises considera a formação da zona de dano em uma região extensional, visto que A é fixado em um valor negativo de -50 m. A variação de B assume os seguintes valores: -200 m, -100 m, 100 m e 200 m. A Tabela 7 mostra os resultados da variável PEMAG ao final da simulação. Valores negativos de B formam zonas de dano de conexão estreitas e similares em uma região extensional, ao passo que valores positivos de B geram formatos de zona de dano de conexão similares com maior intensidade de deformação plástica para maiores valores de B .

Tabela 7 - Resultados da variável PEMAG para o grupo 3.



A trajetória de tensões do M10, nos pontos brancos indicados, caminha para valores negativos de p' (Figura 4.44), indicando uma região de tração com deformações extensionais, tanto para o MHC, quanto para o SR3 (Figura 4.45). Ou seja, a zona de dano de conexão do modelo se comporta como uma região favorável ao fluxo de fluidos, propensa a formação de fraturas.

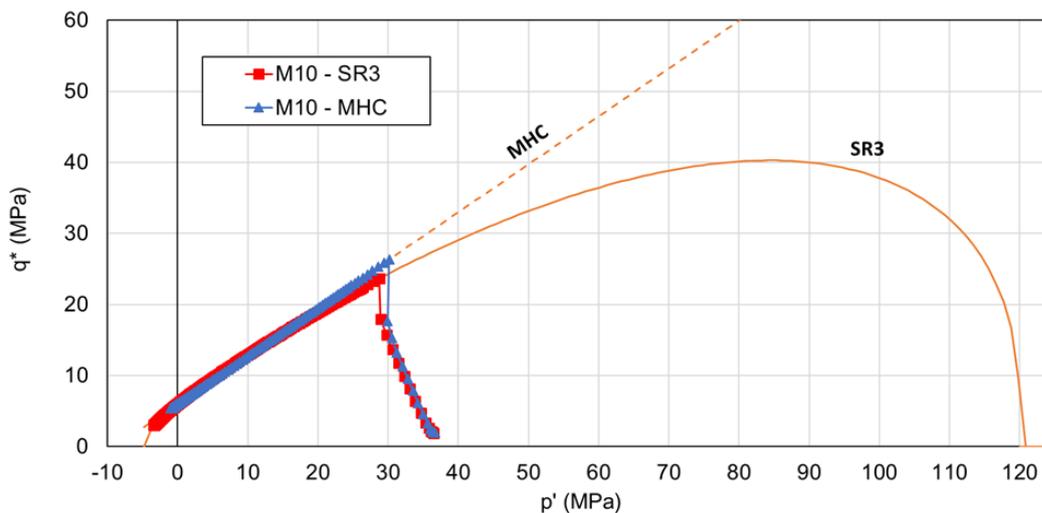


Figura 4.44 - Trajetórias de tensão referente ao modelo M10.

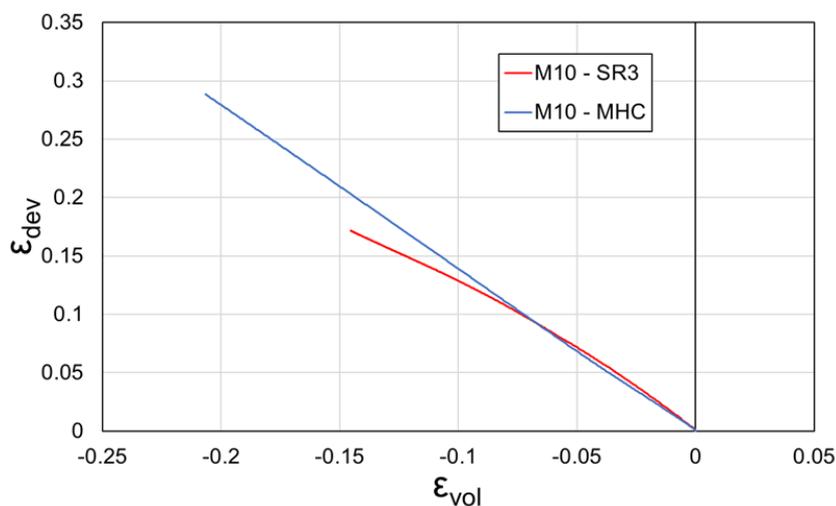


Figura 4.45 - Trajetórias de deformação referente ao modelo M10.

A trajetória de tensões do modelo M12 atinge elevados valores de p' na envoltória de MHC e, na envoltória do SR3, caminha da região de cisalhamento para a região de transição (Figura 4.46). Apesar de apresentar elevados valores de tensão média efetiva no MHC, a região possui comportamento extensional favorável ao fluxo de fluidos, conforme simulado pelo SR3. Isto se dá devido ao mecanismo de deformação da falha. Quanto à trajetória das deformações, tanto o MHC quanto o SR3 apresentaram deformações extensionais (Figura 4.47).

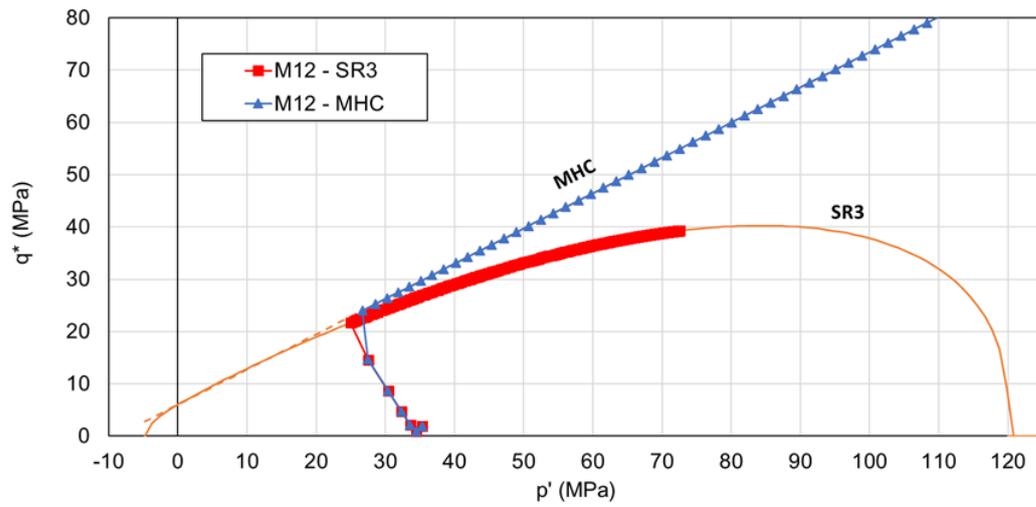


Figura 4.46 - Trajetórias de tensão referente ao modelo M12.

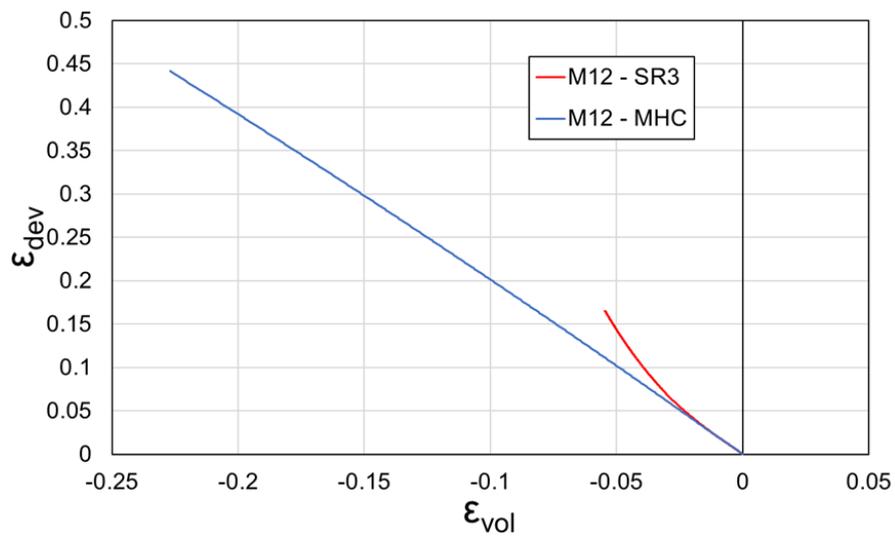


Figura 4.47 - Trajetórias de deformação referente ao modelo M12.

5

Estudo de caso

5.1.

Descrição do problema

As falhas geológicas podem ter uma grande implicação na definição das trajetórias de poços exploratórios ou de desenvolvimento. Problemas relacionados com perda do fluido de perfuração e o aprisionamento da ferramenta são mais susceptíveis a ocorrer durante a perfuração de uma zona de falha. Deste modo, as trajetórias dos poços tendem a evitar as zonas de falha.

Neste sentido, a metodologia proposta neste trabalho é aplicada para caracterizar a região de um campo sintético do pré-sal brasileiro em que um poço de produção é perfurado em uma região adjacente a três falhas geológicas. Análises similares podem ser utilizadas como auxílio na definição das trajetórias do poço próximas a zonas de falhas geológicas.

5.2.

Dados

Um conjunto de dados representados por nuvens de pontos (coordenadas x, y e z) foram obtidos através da sísmica para mapear a geometria de uma região composta por dois horizontes que definem a região do reservatório, três superfícies irregulares que definem as falhas geológicas, e uma trajetória que define o traçamento do poço. As nuvens de pontos são importadas no software GiD e utilizadas como referência para definição das superfícies e da trajetória do poço, como apresenta a Figura 5.1.

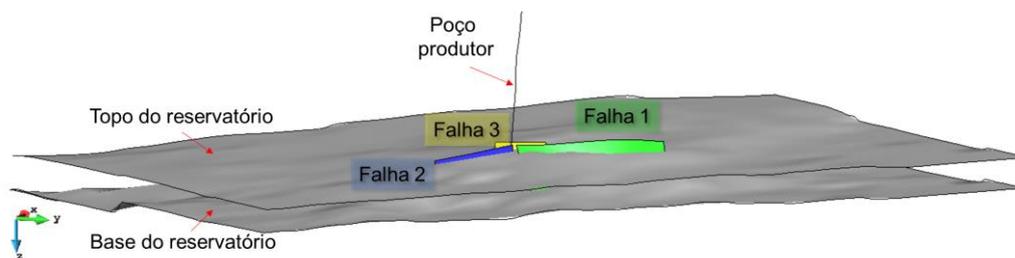


Figura 5.1 – Superfície das falhas, dos horizontes, e trajetória do poço do estudo de caso.

A região de maior interesse do estudo é situada entre as superfícies das falhas, onde é traçado o poço produtor (Figura 5.2a). Esta é uma região de muitas incertezas, dado que, como se pode observar na Figura 5.2b, as falhas possuem uma geometria complexa com superfícies irregulares. Cada superfície apresenta diferentes valores de inclinação, comprimento e altura, apesar das simplificações da extração dos dados pela sísmica.

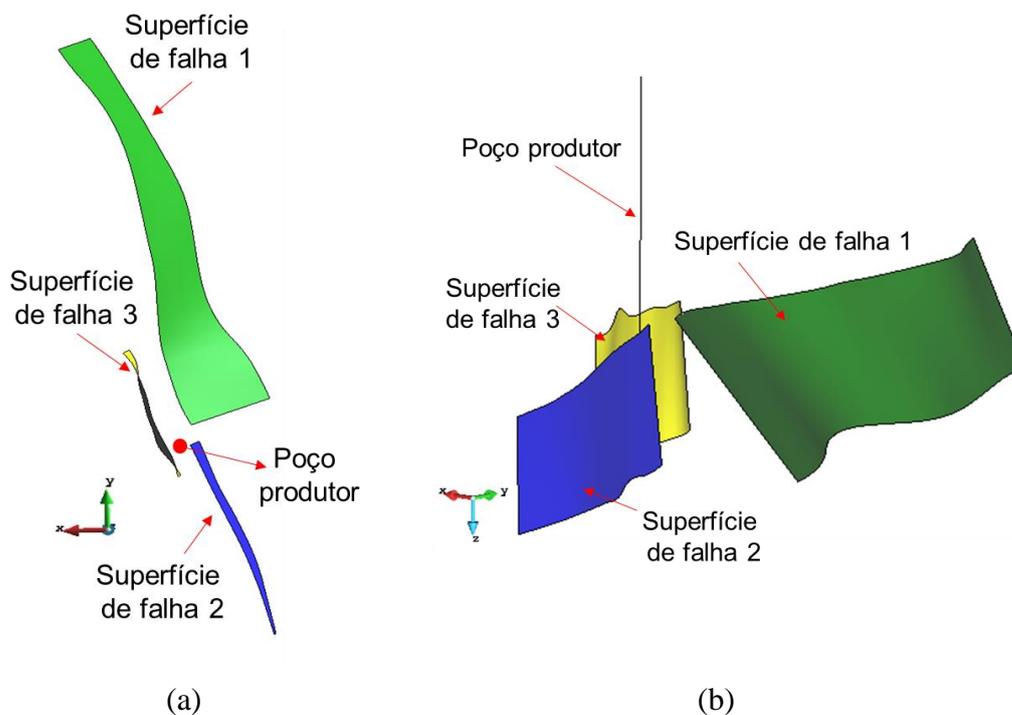


Figura 5.2 – (a) Trajetória do poço na região entre falhas e (b) representação da irregularidades nas superfícies das falhas.

As falhas estão a uma profundidade média de aproximadamente 5200 m. A rocha é simulada através do modelo constitutivo SR3 e considera os mesmos parâmetros de rochas carbonáticas utilizados nas análises paramétricas deste trabalho (Tabela 2).

5.3. Definição dos cenários

O estudo da região do poço entre as falhas é realizado a partir de diversos cenários. Com base em observações obtidas pela sísmica, as falhas possuem um deslocamento oblíquo com movimento normal dominante. Desta forma, como a metodologia se baseia em análises 2D, analisa-se a componente normal em seções verticais e a componente transcorrente em seções horizontais.

O movimento normal é simulado com a definição de um conjunto de quatro seções verticais: A, B, C e D (Figura 5.3a). Os planos verticais, definidos no GiD, interceptam as superfícies das falhas para obter as coordenadas de cada falha, bem como da região do poço, em suas respectivas seções (Figura 5.3b). Os planos são rotacionados e trasladados para que as coordenadas das falhas e do poço sejam expressas em termos dos eixos x e z, facilitando a geração dos modelos no Abaqus. Vale ressaltar que, devido à disposição das falhas, não é possível obter uma seção que interceptasse as superfícies das três falhas simultaneamente.

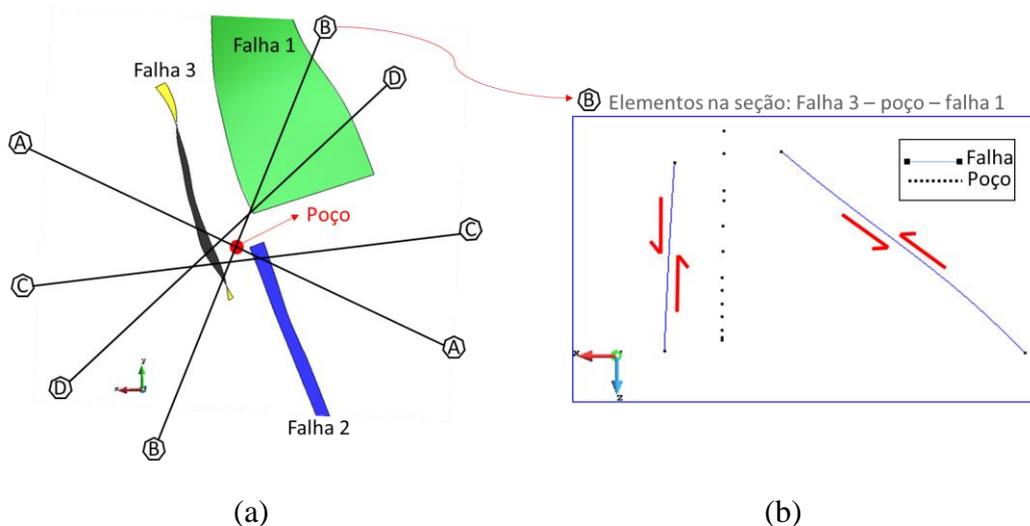


Figura 5.3 – (a) Esquema com conjunto de seções verticais para definição dos (b) planos de análise do estudo de caso.

As seções horizontais de análise do movimento transcorrente são definidas com base nos dois horizontes do reservatório. Cada seção de análise é planejada a partir da média das coordenadas na direção z, fornecidas na nuvem de pontos. Com isso, são feitas 3 seções: uma seção de topo (S1), uma seção intermediária (S2) e uma seção de base (S3). Conforme ilustrado na Figura 5.4, a seção S3 resultante não intercepta nenhuma das falhas, sendo desconsiderada na análise.

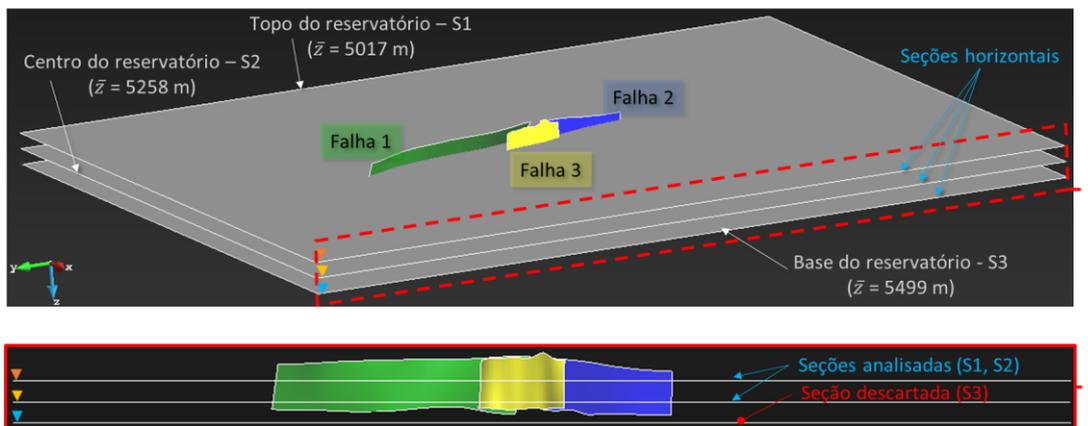


Figura 5.4 – Seções horizontais para análise do movimento transcorrente do estudo de caso.

O movimento transcorrente é analisado tanto para o caso destral, como sinistral, conforme Figura 5.5. Devido ao mecanismo de formação das falhas, no caso destral, a região do poço parece estar sujeita à compressão, enquanto que, no caso sinistral, o poço parece estar em uma região de extensão.

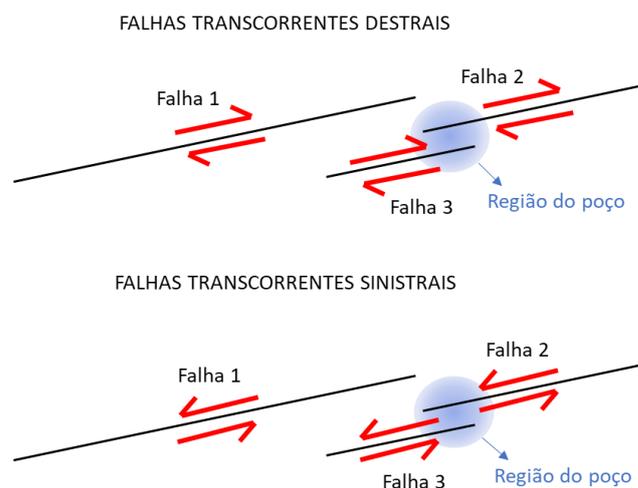


Figura 5.5 - Movimento transcorrente destral e sinistral na configuração de falhas do estudo de caso.

5.4. Resultados e discussões

A simulação dos modelos considera o deslocamento máximo prescrito no valor de 10% do traço da altura da falha (H') correspondente a cada seção, conforme descrito na Figura 3.4. No resultado da zona de dano gerada pela seção vertical A, apresentado na Figura 5.6a, é possível observar que o PEMAG mínimo de 0.10 limita a zona de dano na região adjacente à falha. No entanto, visando analisar a possível formação de deformações, ou zonas de dano de conexão, na região do

poço, adotou-se um PEMAG mínimo de 0.001, para exibir melhor a distribuição das deformações plásticas causadas pela interação das falhas (Figura 5.6b). A partir da definição da região plastificada, são definidos os pontos de análise das trajetórias de tensão e de deformação em cada modelo. Os pontos são sempre definidos na região que envolve a trajetória do poço produtor.

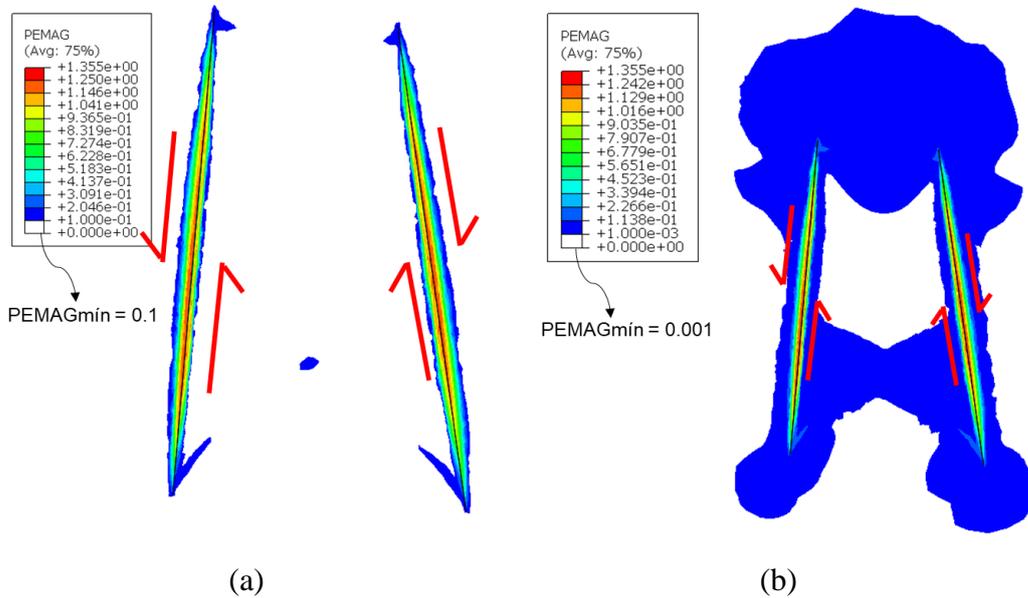


Figura 5.6 – Representação das deformações na seção vertical A, através da variável PEMAG com limite mínimo de (a) 0.1 e (b) 0.001.

5.4.1.

Seções verticais: Simulação do rejeito normal da falha

A distribuição da variável PEMAG da seção A é ilustrada na Figura 5.7, juntamente com os pontos de análise das trajetórias de tensão e deformação, as quais são traçadas com as cores dos pontos indicados. A seção intercepta as falhas 3 e 2, bem como a região do poço. Nesta seção de análise, são aplicados deslocamentos máximos de 60,7 m e 61,2 m nas falhas 3 e 2, respectivamente.

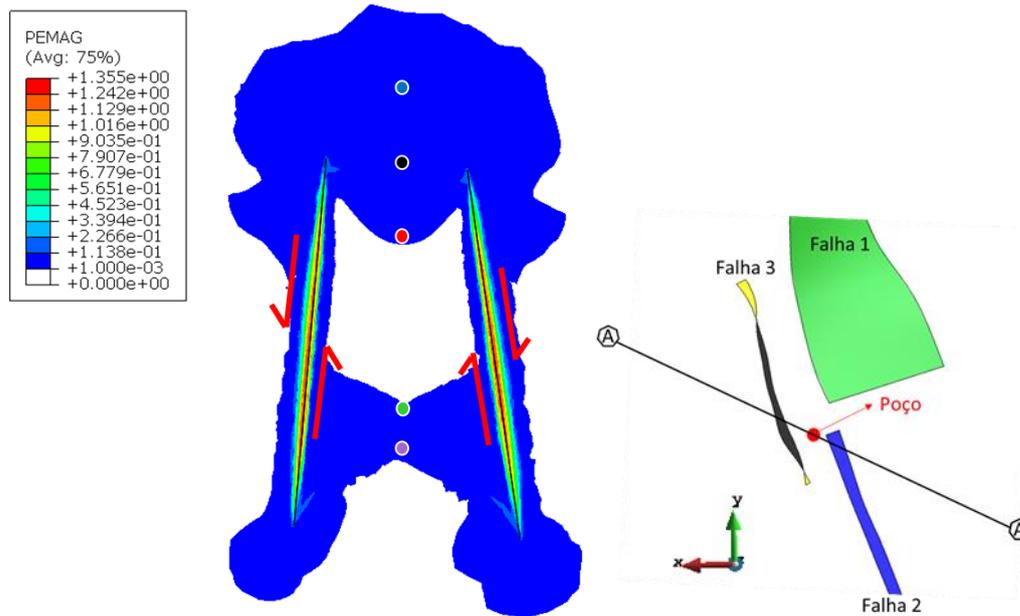


Figura 5.7 – Distribuição da variável PEMAG na seção vertical A.

De acordo com as trajetórias de tensão apresentadas na Figura 5.8, observa-se que a região próxima às extremidades superiores da zona danificada (pontos preto e vermelho) plastifica em uma região de compactação, enquanto a região acima (ponto azul), plastifica em uma região de transição entre o cisalhamento e a compactação. As trajetórias de deformação indicam zonas de compressão para os três pontos (Figura 5.9), sendo o ponto próximo às extremidades superiores (preto) o mais deformado. A região danificada próxima às extremidades inferiores é caracterizada por cisalhamento com deformações extensionais. A região superior apresenta certo nível de compactação que pode propiciar a ocorrência de bandas de compactação que podem funcionar como barreiras ao fluxo de fluidos. Por outro lado, o cisalhamento observado na região inferior pode propiciar a ocorrência de fraturas e bandas de cisalhamento que favorecem esse fluxo.

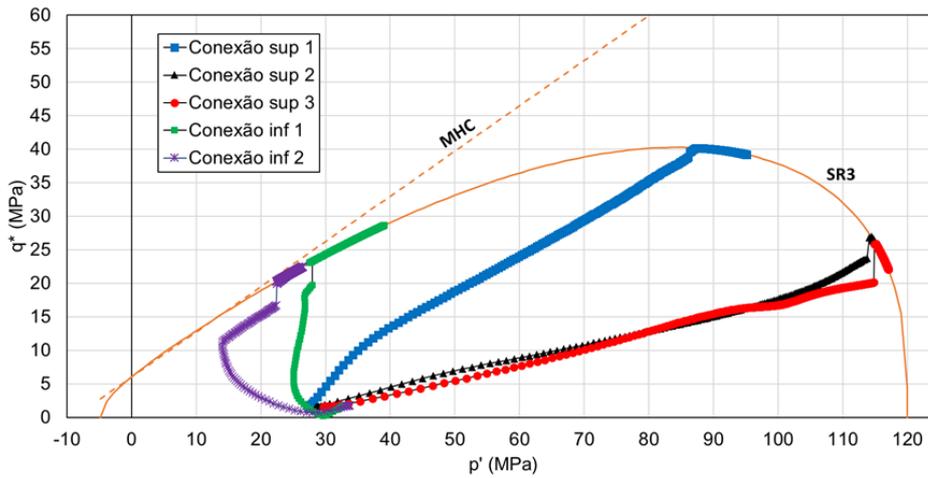


Figura 5.8 – Trajetória das tensões dos pontos definidos na seção A.

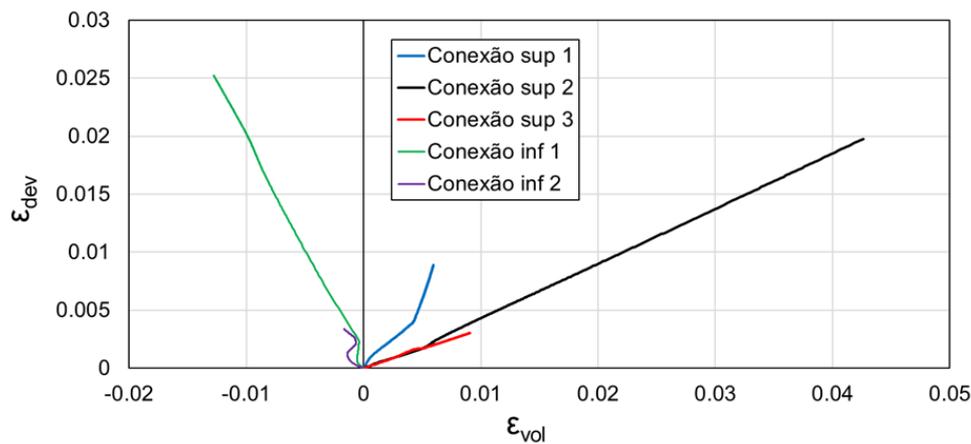


Figura 5.9 - Trajetória das deformações dos pontos definidos na seção B

A região danificada resultante dos mecanismos de deformação das falhas na seção B é representada pela Figura 5.10. São prescritos deslocamentos máximos de 55,8 m e 93,4 m nas falhas 3 e 1, respectivamente. As trajetórias de tensão indicam um comportamento cisalhante na plastificação dos dois pontos indicados na área danificada da região central (Figura 5.11). A partir da trajetória das deformações, nota-se que o modelo inicialmente apresenta deformações de compressão, mas ao plastificar em uma região de cisalhamento, passa a apresentar deformações extensionais (Figura 5.12). No entanto, as deformações são muito pequenas, podendo ser desprezíveis, quanto à influência para a perfuração do poço.

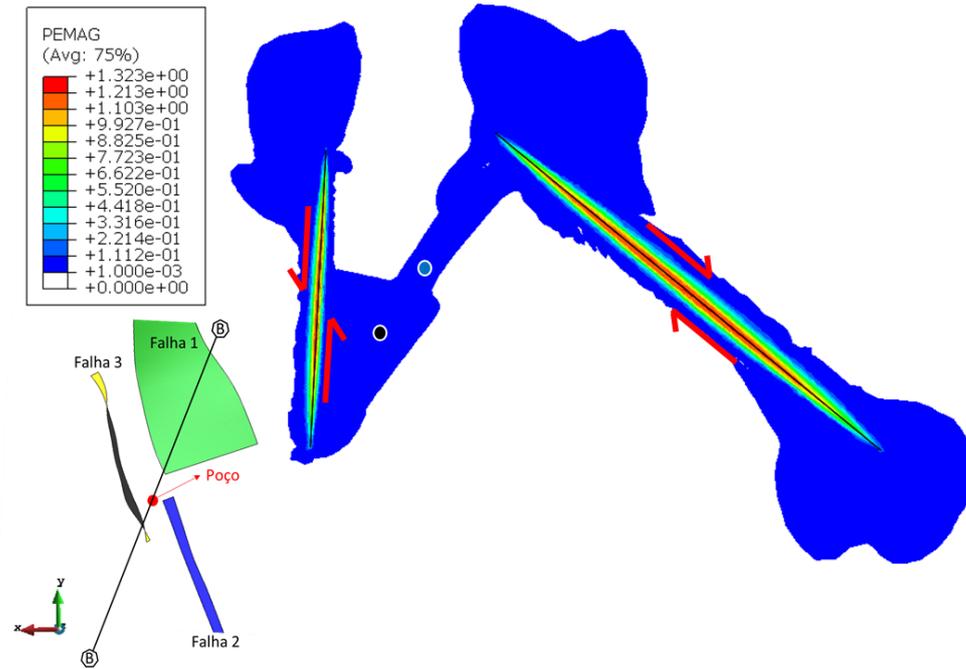


Figura 5.10 - Distribuição da variável PEMAG na seção vertical B.

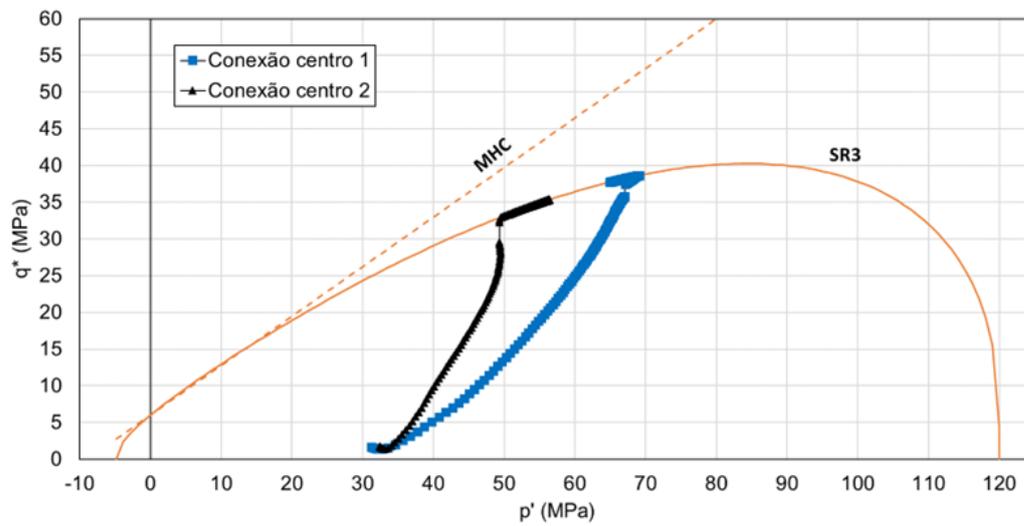


Figura 5.11 - Trajetória das tensões dos pontos definidos na seção B.

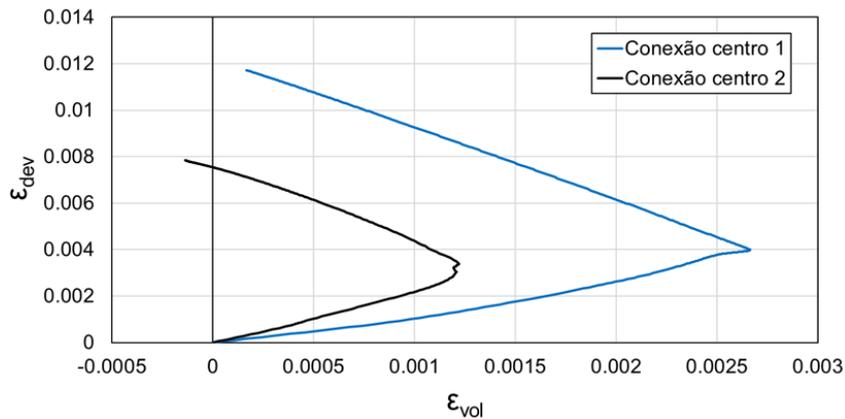


Figura 5.12 - Trajetória das deformações dos pontos definidos na seção B.

A seção C intercepta as superfícies das falhas 3 e 2, nas quais são aplicados deslocamentos máximos de 60,4 m e 60,3m, respectivamente. A distribuição de PEMAG da seção é ilustrada na Figura 5.13. As trajetórias de tensão indicam regiões de compactação próximas às extremidades superiores das falhas, enquanto nas regiões próximas às extremidades inferiores as tensões caminham para uma região de tração propensa à formação de fraturas. Os demais pontos indicam cisalhamento (Figura 5.14). Na trajetória de deformações (Figura 5.15), nota-se que as deformações de maior intensidade acontecem próximas às extremidades superiores e inferiores das falhas, apresentando deformações de compressão e tração, respectivamente. A seção indica uma região propensa a formação de diversos tipos de estruturas geológicas, desde fraturas a bandas de cisalhamento ou compactação. Ou seja, o modelo indica uma região não favorável à trajetória do poço.

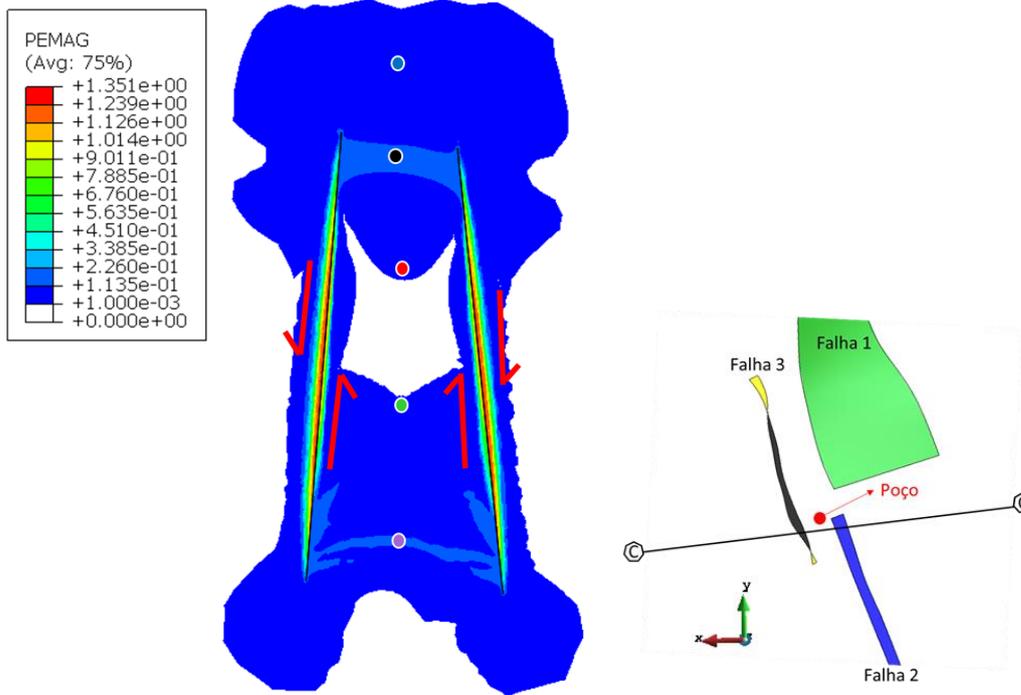


Figura 5.13 - Distribuição da variável PEMAG na seção vertical C.

PUC-Rio - Certificação Digital N° 2111990/CA

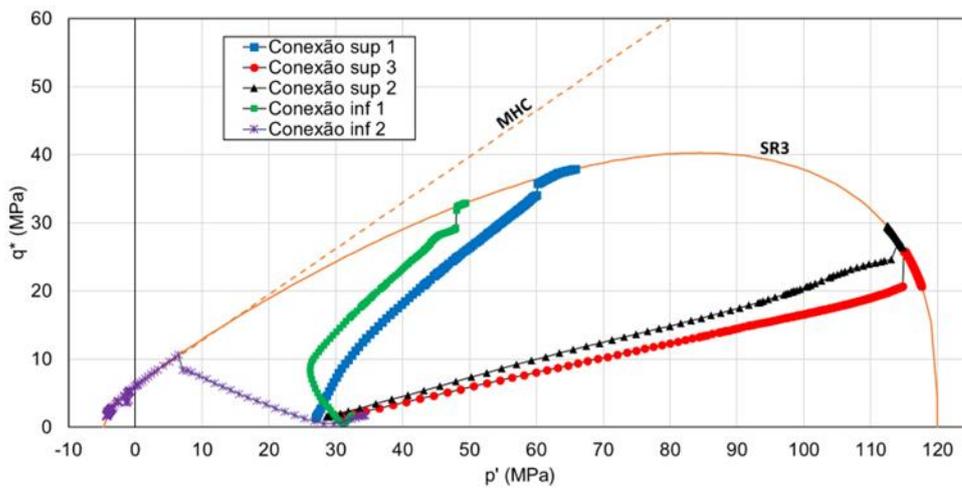


Figura 5.14 - Trajetória das tensões dos pontos definidos na seção C.

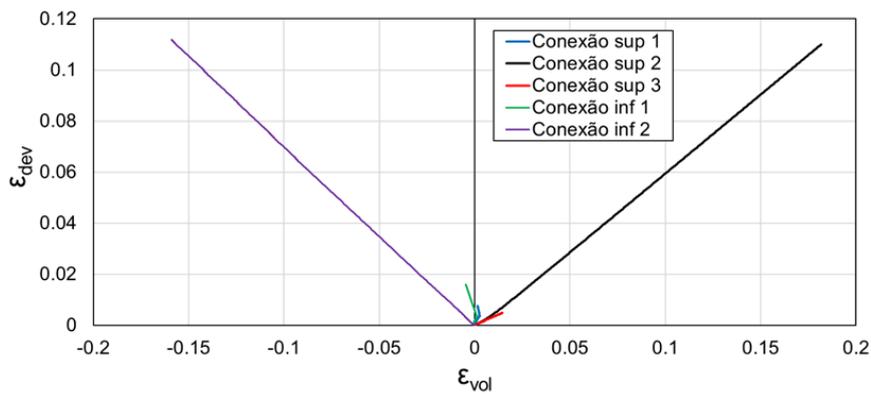


Figura 5.15 - Trajetória das deformações dos pontos definidos na seção C.

Por fim, a Figura 5.16 ilustra a delimitação do PEMAG para a seção vertical D, a qual intercepta as falhas 1 e 3. Nesta seção de análise, são aplicados deslocamentos máximos de 63,8 m e 87,8 m nas falhas 1 e 3, respectivamente. As trajetórias de tensão (Figura 5.17) são traçadas para os pontos azul e preto, indicados com as respectivas cores. Da mesma forma, são analisadas as trajetórias das deformações (Figura 5.18). As trajetórias das tensões atingem a envoltória de plastificação em uma região de cisalhamento, propensa à formação de estruturas de dilatação. As deformações iniciam compressionais, devido ao mecanismo de formação das falhas, mas ao atingir a plastificação passam a ser extensionais de baixa intensidade, que podem não influenciar a perfuração do poço produtor.

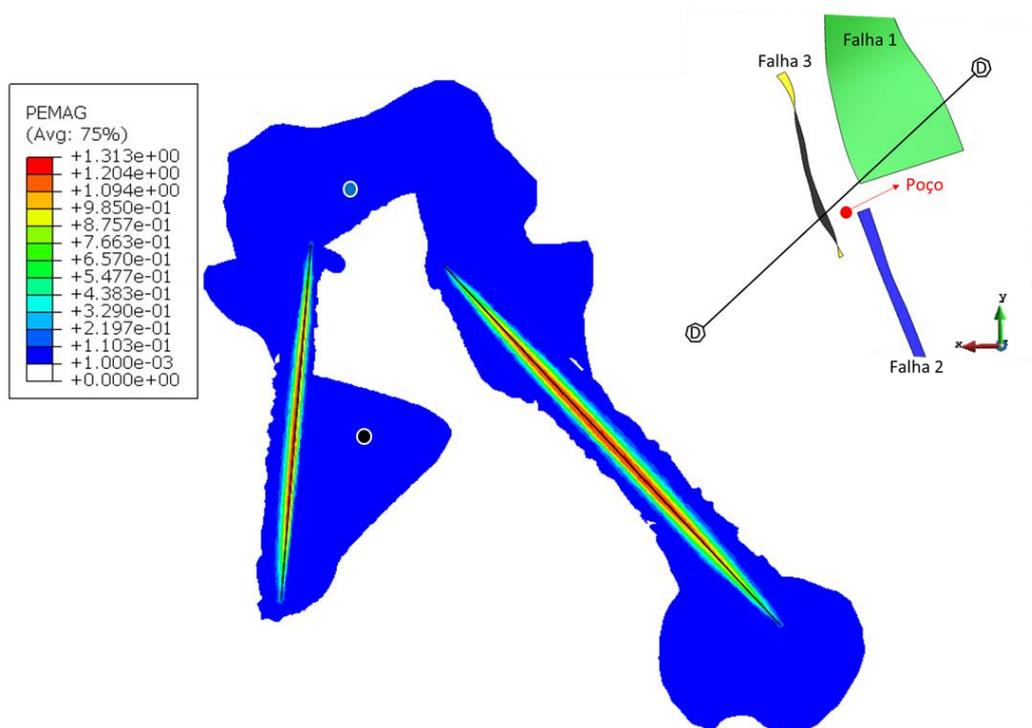


Figura 5.16 - Distribuição da variável PEMAG na seção vertical D.

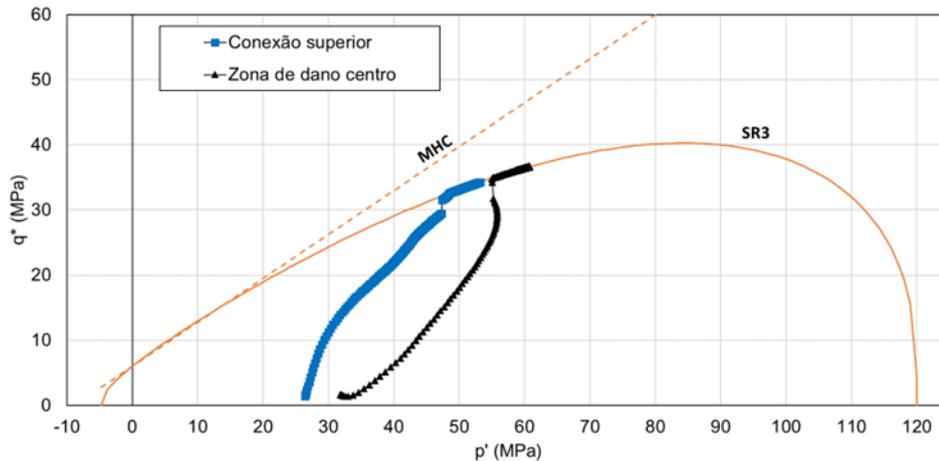


Figura 5.17 - Trajetória das tensões dos pontos definidos na seção D.

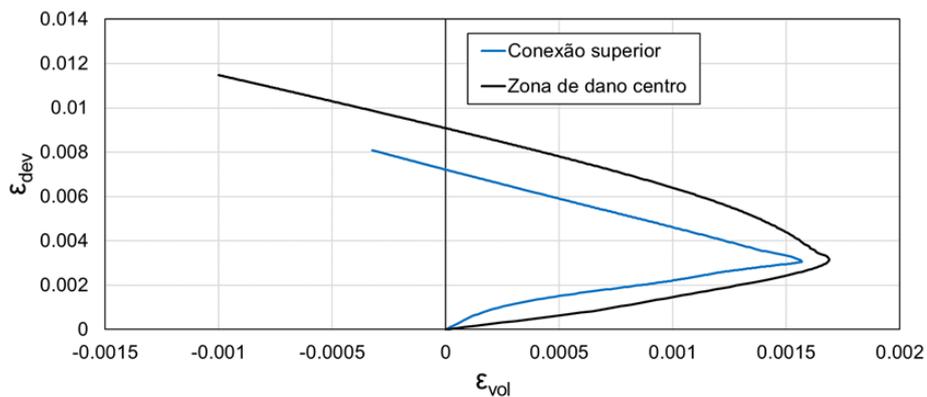


Figura 5.18 - Trajetória das deformações dos pontos definidos na seção D.

Com isso, tem-se que, para a simulação do deslocamento normal entre as falhas, as seções que simulam as regiões entre as falhas 3 e 2 (A e C) apresentam um nível de deformação mais intenso que pode prejudicar a trajetória de perfuração do poço, mas em uma região de reservatório, pode favorecer ou prejudicar o fluxo de fluidos, a depender do tipo de estrutura geológica que se forme. Ao contrário, as seções B e D, que simulam a região entre as falhas 3 e 1, apresentaram níveis de deformação inferiores, apesar de a falha 1 ser a maior em comprimento e aparentar ter maior influência. Essa observação pode se justificar pela proximidade das falhas 3 e 2, tanto pelo espaçamento quanto pela inclinação, e apresentarem maior interação dos deslocamentos dos blocos rochosos, formando zonas de dano de conexão.

5.4.2. Seções horizontais: Simulação do rejeito horizontal da falha

A delimitação da variável PEMAG nas simulações para a seções de topo (S1) e intermediária (S2) considerando o deslocamento transcorrente destal são apresentadas nas Figura 5.19 e Figura 5.20, respectivamente. Em cada seção, é traçada a trajetória de tensões e deformações de um ponto referente ao poço produtor. Na seção S1, são aplicados deslocamentos máximos de 307,4 m, 169,6 m e 110,5 m nas falhas 1, 2 e 3, respectivamente. Na seção S2, é aplicado um deslocamento máximo de 307,9 m na falha 1, enquanto as falhas 2 e 3 possuem o mesmo valor de deslocamento de S1.

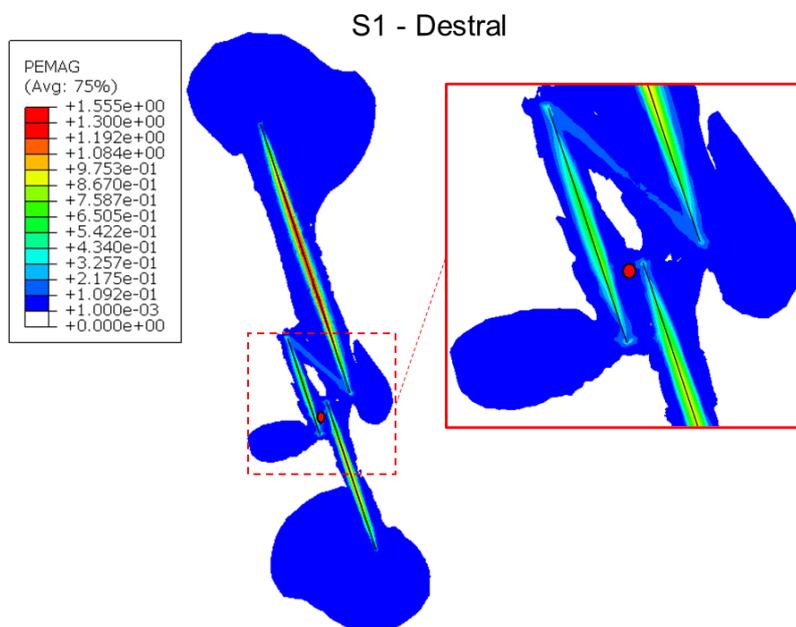


Figura 5.19 - Distribuição da variável PEMAG na seção horizontal S1 para deslocamento transcorrente destal.

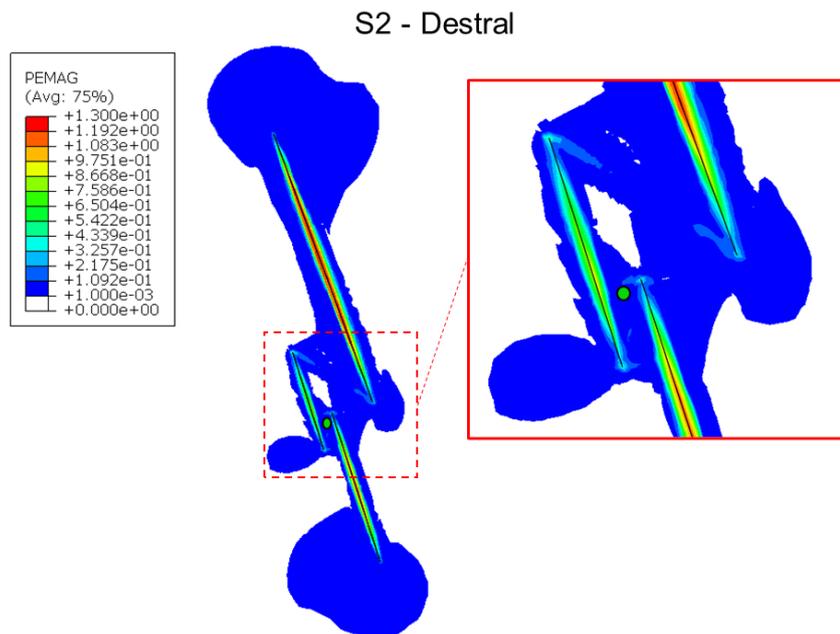


Figura 5.20 - Distribuição da variável PEMAG na seção horizontal S2 para deslocamento transcorrente destal.

Ao se observar a trajetória das tensões, nota-se que S1 plastifica em uma região de cisalhamento e então as tensões caminham para a compressão. No entanto, S2 plastifica na compressão e as tensões caminham em direção ao CAP, indicando a possível formação de estruturas compactacionais (Figura 5.21). Em termos das trajetórias de deformação, as seções apresentam deformações plásticas predominantemente contracionais (Figura 5.22).

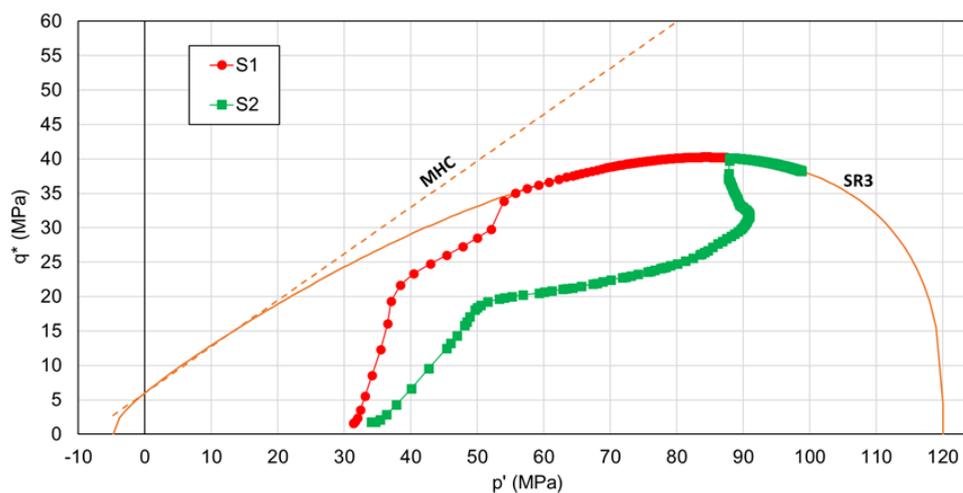


Figura 5.21 - Trajetória das tensões dos pontos definidos nas seções horizontais S1 e S2 para deslocamento destal.

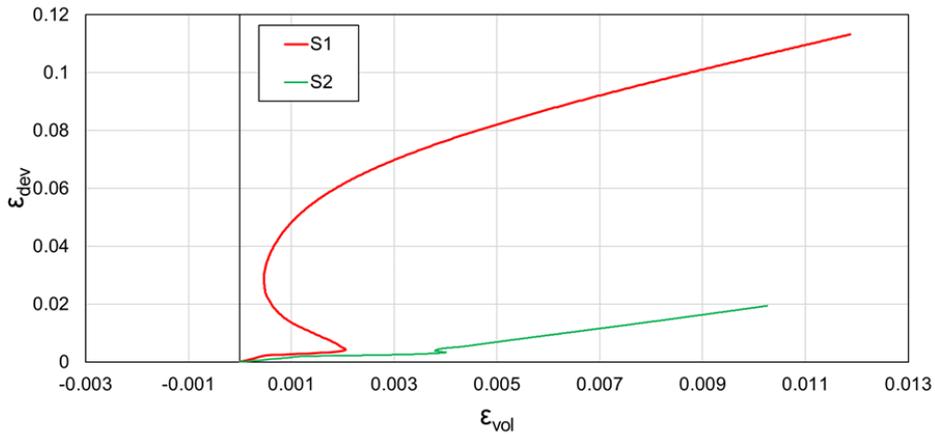


Figura 5.22 - Trajetória das deformações dos pontos definidos nas seções horizontais S1 e S2 para deslocamento destal.

Uma última análise é feita nestas mesmas seções considerando o deslocamento transcorrente sinistral. Nas seções S1 e S2 são aplicados os mesmos valores dos deslocamentos prescritos para cada falha no caso destal, porém, em direções opostas. A resposta da variável PEMAG no final da simulação para este tipo de carregamento pode ser observada nas Figura 5.23 e Figura 5.24, respectivamente, nas quais, são definidos os pontos equivalentes ao poço para análise dos resultados.

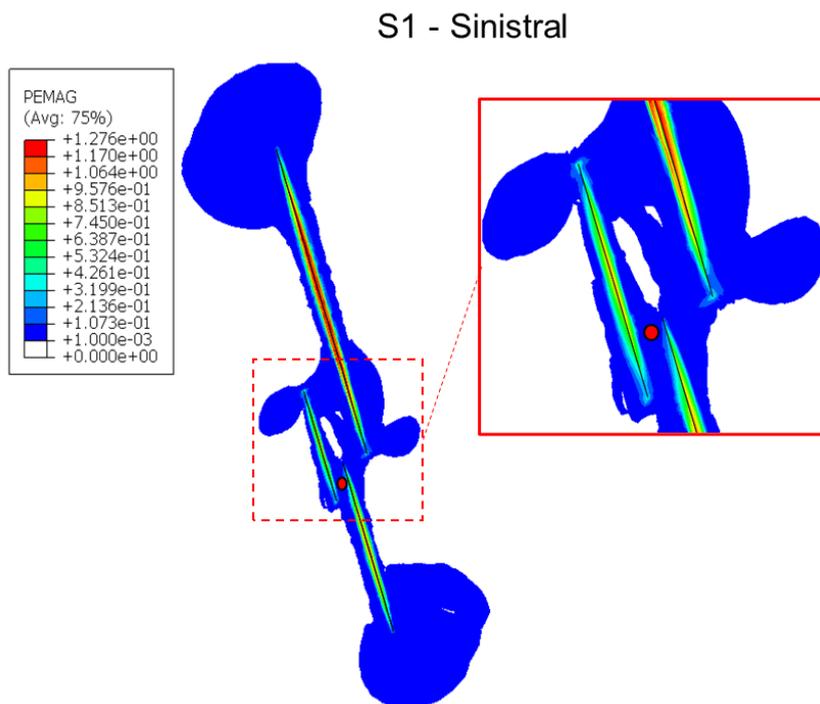


Figura 5.23 - Distribuição da variável PEMAG na seção horizontal S1 para deslocamento transcorrente sinistral.

S2 - Sinistral

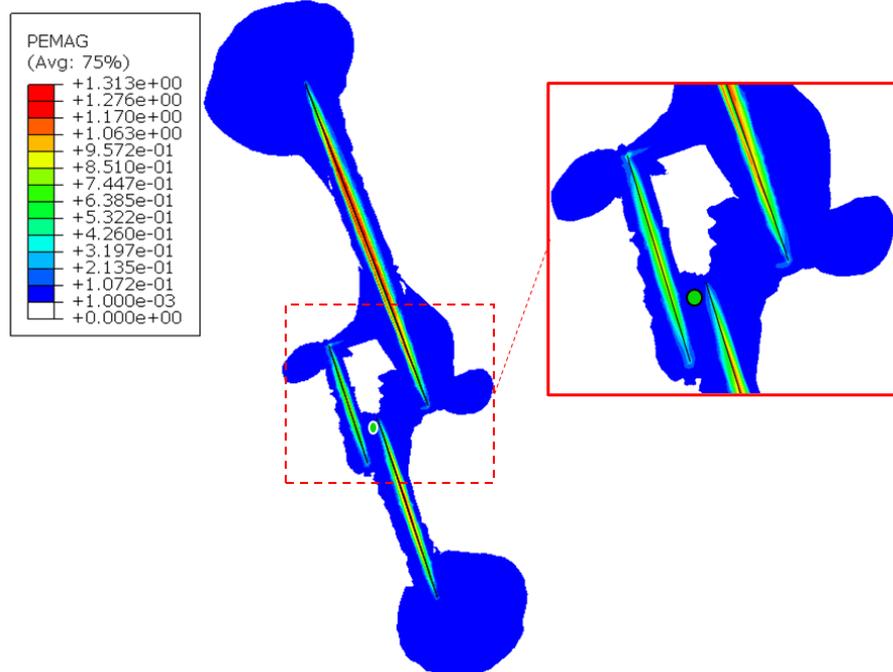


Figura 5.24 - Distribuição da variável PEMAG na seção horizontal S1 para deslocamento transcorrente sinistral.

As trajetórias das tensões e das deformações são apresentadas nas Figura 5.25 e Figura 5.26, respectivamente. Nota-se que, as duas seções plastificam por cisalhamento, aproximando-se da região de transição. Nas deformações, as duas seções apresentam as deformações plásticas extensionais. Ou seja, para o carregamento transcorrente sinistral, de acordo com as análises numéricas, a região do poço estaria propensa à formação de estruturas dilatacionais. Dados obtidos em campo com o poço indicaram que, na região do estudo, predomina esse tipo de estrutura. Com isso, pode-se dizer que a componente referente ao deslocamento transcorrente é sinistral.

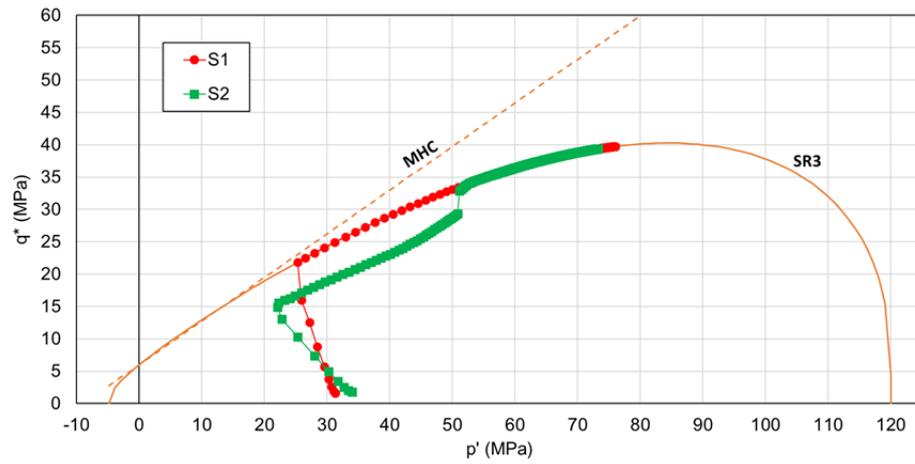


Figura 5.25 - Trajetória das tensões dos pontos definidos nas seções horizontais S1 e S2 para deslocamento sinistral.

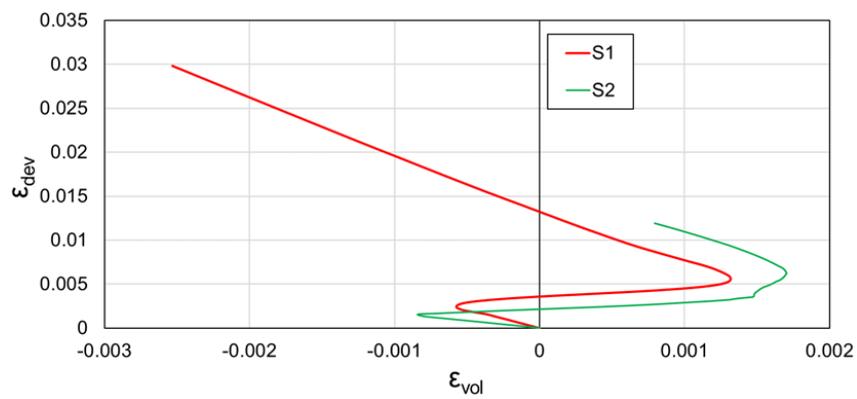


Figura 5.26 - Trajetória das deformações dos pontos definidos nas seções horizontais S1 e S2 para deslocamento sinistral.

6 Considerações finais

6.1. Conclusões

Este trabalho apresenta uma metodologia para modelagem geomecânica da formação e evolução de zonas de dano em falhas geológicas. A metodologia aplica modelagem 2D na hipótese de estado plano de deformação em meio homogêneo. A descontinuidade das falhas é simulada por duas linhas independentes sobrepostas. Foram aplicados deslocamentos diferenciais com direções opostas nos nós de cada lado da falha, simulando o processo de formação de zonas de falha. As zonas de dano, por sua vez, são definidas como as regiões plastificadas e caracterizadas pelas variáveis que medem a deformação plástica no modelo.

Os resultados mostram um comportamento variável da distribuição da zona de dano ao longo da falha, com diferentes níveis de deformação entre a região central e as extremidades. O estudo paramétrico mostra que a largura da zona de dano depende dos parâmetros adotados, tanto no modelo constitutivo de Mohr-Coulomb (MHC) quanto no Soft Rock Plasticity (SR3).

As análises paramétricas realizadas com MHC mostram que maiores valores de ângulo de atrito e menores ângulos de dilatação geram maiores zonas de dano. No entanto, verifica-se que a variação da coesão e das tensões iniciais não influenciam significativamente nas respostas do modelo. Em relação à análise da variação do rejeito ($D_{máx}$), a taxa de evolução da largura da zona de dano é maior na mobilização inicial do processo e se torna praticamente constante para maiores níveis de deslocamento. A definição de um limite mínimo da deformação plástica equivalente tem grande impacto na medição da largura de zona de dano, apresentando zonas mais estreitas para maiores valores desse limite.

As análises paramétricas com SR3 mostram que o ângulo de atrito, a coesão e o gradiente de tensões efetivas pouco influenciam nas respostas de largura de zona

de dano dos modelos, enquanto menores valores de ângulo de dilatância apresentam zonas de dano mais largas. Assim como no MHC, a consideração de uma deformação plástica equivalente mínima limita a largura da zona de dano. Também de forma similar ao MHC, a taxa da evolução da largura da zona de dano é praticamente constante para maiores deslocamentos. Quanto ao estudo da pressão crítica, verifica-se que a adoção de menores valores deste parâmetro gera menores zonas de dano. Além disso, o SR3 limita a propagação das deformações plásticas, concentrando-as ao redor do plano de falha.

Para avaliar e comparar melhor a resposta dos modelos, são analisadas as trajetórias de tensão e deformação em diferentes posições ao longo da falha. Inicialmente, se realizaram estudos considerando uma falha isolada em rochas carbonáticas de alta e baixa porosidade. Em regiões de tração, os modelos apresentaram trajetórias similares, mesmo com a variação da pressão crítica. Em regiões de cisalhamento por compressão, as trajetórias divergem, pois o CAP do SR3, definido em função da porosidade, limita esta região. A caracterização da região de compressão da zona de dano, ainda que com a utilização do CAP, apresentou um comportamento aproximado entre o MHC e o SR3 para rochas de baixa porosidade. No entanto, em rochas de alta porosidade, devido ao efeito da compactação, que não pode ser representada pelo MHC, a resposta dos modelos diverge. Com isso, o comportamento de rochas com baixa porosidade pode ser representado de forma aproximada pelo MHC.

A partir do estudo da interação de duas falhas, observa-se que o mecanismo de formação delas gera regiões de compressão e tração. Estas regiões podem ser intensificadas a depender da posição relativa entre as duas falhas. As zonas de dano de conexão que se formam pelo modelo de MHC possuem geometrias semelhantes às formadas pelo SR3, quando em região de tração. No entanto, para elevados valores de tensão média efetiva, são geradas geometrias de zona de dano diferentes, visto que o SR3 considera deformações volumétricas plásticas de compactação.

A metodologia é aplicada para caracterizar a região de um campo sintético do pré-sal brasileiro em que um poço de produção é perfurado entre três falhas geológicas. Os resultados são analisados com base nas trajetórias das tensões e deformações, bem como nos mecanismos de formação das zonas de dano. Assim, é possível definir as regiões favoráveis para as trajetórias do poço, pois as deformações causadas pela zona de dano podem afetar a integridade do poço e a

segurança do equipamento de perfuração. No reservatório, essas deformações podem funcionar como caminhos preferenciais ao fluxo de fluidos, quando predominam fraturas, ou como barreiras ao fluxo, quando há maior incidência de estruturas de compactação. Comparando as análises das seções analisadas com as informações de campo, o movimento da falha é identificado como oblíquo com componente transcorrente sinistral.

O MHC é comumente utilizado para representar o comportamento dos geomateriais por possuir uma formulação mais simples com parâmetros que apresentam significados físicos que facilitam a aplicação do modelo. No entanto, a utilização do modelo constitutivo SR3 com limitação da região de compactação se mostra mais realista na simulação do comportamento geomecânico. Este modelo possibilita a representação das deformações plásticas volumétricas de compactação e considera o efeito da porosidade na deformação do material. O SR3 não é amplamente aplicado por requerer mais parâmetros na definição do modelo. Alguns destes parâmetros são relacionados aos parâmetros geomecânicos conhecidos e aplicados no MHC, outros são parâmetros de forma referentes à superfície de plastificação. Por fim, tem-se que as estruturas que compõem a zona de dano podem ser inferidas com base nas trajetórias de tensão e deformação, que indicam regiões favoráveis ou não ao fluxo de fluidos e perfuração de poços. A metodologia proposta agrega como ferramenta para a caracterização e estudo da zona de dano em falhas geológicas.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Na continuação dessa pesquisa sugerem-se as seguintes atividades para trabalhos futuros:

- a) Aplicar a modelagem considerando as falhas como não sendo retilíneas, assumindo as irregularidades das superfícies de falha;
- b) Definir o critério para o qual as deformações plásticas passam a ser consideradas como zona de dano calibrando os resultados com dados de falhas exumadas;
- c) Representar a região das falhas com superfícies de contato, para que o movimento das falhas possa ser simulado não apenas com

deslocamentos prescritos nos nós da falha, mas também por outros tipos de carregamento, como o soterramento;

- d) Analisar a influência do soterramento sequencial na formação da zona de dano;
- e) Descrever de forma mais detalhada a geometria da zona de falha, delimitando não apenas os limites da zona de dano, mas também do núcleo;
- f) Aplicar a modelagem 3D para verificar o comportamento oblíquo das falhas.

Referências bibliográficas

ABREU, R. O. **Algoritmos para Integração e Calibração de Modelos Elastoplásticos com Múltiplas Superfícies de Plastificação**. 2019. 163 f. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

ANDRADE, T. J. **Modelagem computacional de formação e evolução de zonas de dano em falhas geológicas**. 2021. 124 f. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

ANDRADE, T. J. et al. **Computational modeling of formation and evolution of damage zones in reservoir scale**. 2020. Proceedings of the XLI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Foz do Iguaçu, 2020. p. 1–7.

ANDRADE, T. J. et al. **Numerical modeling of damage zones in rocks at reservoir scale using FEM**. 2021. Proceedings of the XLII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Rio de Janeiro, 2021. p. 1–7.

AYDIN, A.; BORJA, R. I.; EICHHUBL, P. **Geological and mathematical framework for failure modes in granular rock**. Journal of Structural Geology, vol. 28, no. 1, p. 83–98, 2006.

CAINE, J. S.; EVANS, J. P.; FORSTER, C. B. **Fault zone architecture and permeability structure**. Geology, vol. 24, no. 11, p. 1025–1028, 1996.

CHILDS, C. et al. **The growth and propagation of synsedimentary faults**. Journal of Structural Geology, vol. 25, no. 4, p. 633–648, 2002.

CHOI, J. H. et al. **Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach**. Earth-Science Reviews, vol. 152, p. 70–87, 2016.

CRIDER, J. G.; PEACOCK, D. C. P. **Initiation of brittle faults in the upper crust: a review of field observations**. Journal of Structural Geology, vol. 26, no. 4, p. 691–707, 2004.

CROOK, A. J. L. et al. **Predictive modelling of structure evolution in sandbox experiments**. Journal of Structural Geology, vol. 28, no. 5, p. 729–744, May 2006a. DOI 10.1016/j.jsg.2006.02.002.

CROOK, A. J. L. et al. **Benchmarks for the evolution of shear localisation with large relative sliding in frictional materials**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 195, no. 37–40, p. 4991–5010, Jul. 2006b. DOI 10.1016/j.cma.2005.11.016.

DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA. ABAQUS® **User Manual**. 2021. .

DAVIS, R. O.; SELVADURAI, A. P. S. **Plasticity and Geomechanics**. New York: Cambridge University Press, 2002.

FALEIDE, T. S. et al. **Impacts of seismic resolution on fault interpretation: Insights from seismic modelling**. *Tectonophysics*, vol. 816, no. February, 2021. DOI 10.1016/j.tecto.2021.229008.

FAULKNER, D. R. et al. O. **A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones**. *Journal of Structural Geology*, vol. 32, no. 11, p. 1557–1575, 2010. DOI 10.1016/j.jsg.2010.06.009.

FERRILL, D. A.; SMART, K. J.; MORRIS, A. P. **Fault failure modes, deformation mechanisms, dilation tendency, slip tendency, and conduits v. seals**. *Geological Society Special Publication*, vol. 496, no. 1, p. 75–98, 2020.

FISHER, Q. et al. **Impact of faults in carbonate reservoir**. CARBFAULT – Phase I, UK, 2018. .

FOSSSEN, H. **Structural Geology**. New York: Cambridge University Press, 2010. vol. 4, .

FOSSSEN, H.; ROTEVATN, A. **Fault linkage and relay structures in extensional settings-A review**. *Earth-Science Reviews*, vol. 154, p. 14–28, 2016. DOI 10.1016/j.earscirev.2015.11.014.

FOSSSEN, H. et al. **Deformation bands in sandstone: a review**. *Journal of the Geological Society*, vol. 164, no. 4, p. 755–769, 2007.

GHANEMNIA, N. **Non-Linear Finite Element Analysis of tubular X joint with selected geometry**. 2012. 105 f. University of Stavanger, 2012.

GRAY, G.G.; MORGAN, J. K.; SANZ, P. F. **Overview of continuum and particle dynamics methods for mechanical modeling of contractional geologic structures**. *Journal of Structural Geology*, vol. 59, p. 19–36, 2014. DOI 10.1016/j.jsg.2013.11.009.

HENNINGS, P. et al. **Relationship between fractures, fault zones, stress, and reservoir productivity in the Suban gas field, Sumatra, Indonesia**. *AAPG Bulletin*, vol. 96, no. 4, p. 753–772, 2012.

KIEWIET, M. C. D. **Comportamento hidromecânico de zonas de falha em travertino: Estudo Experimental e Numérico sobre o Impacto da Reativação Estrutural na Produção de Reservatórios**. 2015. 654 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

KIM, Y.; PEACOCK, D. C. P.; SANDERSON, D. J. **Mesoscale strike-slip faults and damage zones at Marsalforn, Gozo Island, Malta.** *Journal of Structural Geology*, vol. 25, no. 5, p. 793–812, 2003.

KIM, Y.; SANDERSON, D. J. **The relationship between displacement and length of faults: a review.** *Earth-Science Reviews*, vol. 68, no. 3–4, p. 317–334, Jan. 2005. DOI 10.1016/j.earscirev.2004.06.003.

KIM, Y.; PEACOCK, D.C.P.; SANDERSON, D.J. **Fault damage zones.** *Journal of Structural Geology*, vol. 26, no. 3, p. 503–517, 1 Mar. 2004. DOI 10.1016/j.jsg.2003.08.002.

MA, D. B. et al. **Seismic damage zone and width–throw scaling along the strike-slip faults in the Ordovician carbonates in the Tarim Basin.** *Petroleum Science*, vol. 16, no. 4, p. 752–762, 2019.

MATONTI, C. et al. **Structural and petrophysical characterization of mixed conduit/seal fault zones in carbonates: Example from the Castellias fault (SE France).** *Journal of Structural Geology*, vol. 39, p. 103–121, 2012.

MAYOLLE, S. et al. **Scaling of fault damage zones in carbonate rocks.** *Journal of Structural Geology*, vol. 124, no. April, p. 35–50, 2019. DOI 10.1016/j.jsg.2019.03.007.

MCGRATH, A. G.; DAVISON, I. **Damage zone geometry around fault tips.** *Journal of Structural Geology*, vol. 17, no. 7, p. 1011–1024, Jul. 1995. DOI 10.1016/0191-8141(94)00116-H.

MENETREY, P.; WILLAM, K. J. **Triaxial failure criterion for concrete and its generalization.** *ACI Structural Journal*, vol. 92, p. 311–318, 1995.

MICARELLI, L.; BENEDICTO, A.; WIBBERLEY, C. A. J. **Structural evolution and permeability of normal fault zones in highly porous carbonate rocks.** *Journal of Structural Geology*, vol. 28, no. 7, p. 1214–1227, 2006.

MYERS, R.; AYDIN, A. **The evolution of faults formed by shearing across joint zones in sandstone.** *Journal of Structural Geology*, vol. 26, no. 5, p. 947–966, 2004.

OLIVEIRA, K. N. et al. **Numerical modeling of the linking damage zone between geologic faults.** 2022. *Proceedings of the joint XLIII Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*. Foz do Iguaçu, 2022. p. 7.

PAUL, P.; ZOBACK, M.; HENNINGS, P. **Fluid Flow in a Fractured Reservoir Using a Geomechanically-Constrained Fault Zone Damage Model for Reservoir Simulation.** 2007. *Technical Conference and Exhibition*. California: Society of Petroleum Engineers, 2007. p. 22.

PEACOCK, D. C. P. et al. **A broader classification of damage zones**. *Journal of Structural Geology*, vol. 102, p. 179–192, Sep. 2017a. DOI 10.1016/j.jsg.2017.08.004.

PEACOCK, D. C. P.; SANDERSON, D. J. **Strike-slip relay ramps**. *Journal of Structural Geology*, vol. 17, no. 10, p. 1351–1360, 1995.

PEACOCK, D. C.P. et al. **Interacting faults**. *Journal of Structural Geology*, vol. 97, p. 1–22, 2017b.

PEACOCK, D. C.P.; SANDERSON, D. J. **Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones**. *Journal of Structural Geology*, vol. 13, no. 6, p. 721–733, 1991.

PERRIN, C.; WALDHAUSER, F.; SCHOLZ, C. H. **The Shear Deformation Zone and the Smoothing of Faults With Displacement**. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 126, no. 5, p. 88–100, 6 May 2021. DOI 10.1029/2020JB020447.

POLLARD, D. D.; FLETCHER, R. C. **Fundamentals of Structural Geology**. 2006. vol. 43.

POTTS, D. M.; ZDRAVKOVIC, L. **Finite element analysis in geotechnical engineering**. London: Thomas Telford Publishing, 1999. vol. 4, .

QU, D.; TVERANGER, J. **Incorporation of deformation band fault damage zones in reservoir models**. *AAPG Bulletin*, vol. 100, no. 03, p. 423–443, Mar. 2016. DOI 10.1306/12111514166.

ROCHE, V. et al. **Variability in the three-dimensional geometry of segmented normal fault surfaces**. *Earth-Science Reviews*, vol. 216, no. January, 2021. DOI 10.1016/j.earscirev.2021.103523.

ROHMER, J.; NGUYEN, T. K.; TORABI, A. **Off-fault shear failure potential enhanced by high-stiff/low-permeable damage zone during fluid injection in porous reservoirs**. *Geophysical Journal International*, vol. 202, no. 3, p. 1566–1580, 2015.

ROTEVATN, A.; BASTESSEN, E. **Fault linkage and damage zone architecture in tight carbonate rocks in the Suez Rift (Egypt): Implications for permeability structure along segmented normal faults**. *Geological Society Special Publication*, vol. 374, no. 1, p. 79–95, 2014.

SCHULTZ, R. A.; SIDDHARTHAN, R. **A general framework for the occurrence and faulting of deformation bands in porous granular rocks**. *Tectonophysics*, vol. 411, no. 1–4, p. 1–18, 2005.

TORABI, A.; BERG, S. S. **Scaling of fault attributes: A review**. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 28, no. 8, p. 1444–1460, 2011.

TORABI, A. et al. **Fault zone architecture and its scaling laws: where does the damage zone start and stop?** Geological Society, London, Special Publications, vol. 496, no. 1, p. 99–124, 2020.

WALSH, J. J. et al. **Formation of segmented normal faults: A 3-D perspective.** Journal of Structural Geology, vol. 25, no. 8, p. 1251–1262, 2003.

WIBBERLEY, C. A. J.; YIELDING, G.; DI TORO, G. **Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: A review.** Geological Society Special Publication, vol. 299, p. 5–33, 2008.

ZOBACK, M. D. **Reservoir geomechanics.** 1^a edição. [S. l.]: Cambridge University Press, 2007.