



Mario Alberto Ramirez Castaño

**Modelagens 2D e 3D para avaliação de reativação de falhas
geológicas em reservatórios de petróleo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Deane Mesquita Roehl
Coorientador: Dr. Roberto Quevedo Quispe

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016



Mario Alberto Ramirez Castaño

Modelagens 2D e 3D para avaliação de reativação de falhas geológicas em reservatórios de petróleo

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

Prof^a. Deane de Mesquita Roehl.

Orientadora
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Roberto Quevedo Quispe

Coorientador
Tecgraf – PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Leonardo Cabral Pereira

CENPES-PETROBRAS

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 09 de Dezembro de 2016

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

Mario Alberto Ramirez Castaño

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidad Nacional de Colômbia em 2010. Terminou a pós-graduação em Estruturas na Universidad Nacional de Colômbia (Sede Manizales). Em 2014 ingressou no curso de Mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Estruturas, onde vem desenvolvendo investigações na linha de pesquisa de geomecânica computacional

Ficha Catalográfica

Castaño, Mario Alberto Ramirez.

Modelagens 2D e 3D para avaliação de reativação de falhas geológicas em reservatórios de petróleo/ Mario Alberto Ramirez Castaño; orientador: Deane de Mesquita Roehl; Roberto Juan Quevedo Quispe. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2016,

105 f. : il;(color); 29,7 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Método dos elementos finitos. 3. Reativação de falhas. 4. Elemento de Interface. 5. Geomecânica de reservatórios I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Roberto Quevedo Quispe III. Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

A mi adorada madre Maria Judith y
a mis abuelitas Nohemy y Maria, a
mis tias Beti y Paty por el amor y
apoyo incondicional. Las amo

Agradecimentos

A Deus, pela força que sempre me dá nos momentos de fraqueza e por ser o motor para seguir conquistando cada dia mais novos sonhos.

À minha mãe Maria Judith, por ser a melhor do mundo, por sempre ser o meu apoio e sempre acreditar em mim. Mãe, obrigado por dar tudo à mim e ao meu irmão a quem também amo muito.

Às minhas tias Betico e Paty, por sempre estarem ao meu lado nos momentos difíceis dando o seu amor. À minha avó Nohemy, por ser sempre o motor e motivação da nossa família.

À minha orientadora, professora Deane Roehl, pela orientação e dedicação no desenvolvimento deste trabalho, por ter me dado confiança e oportunidade de trabalhar no grupo de geomecânica do Tecgraf.

Ao meu coorientador, senhor Roberto Quevedo, pelo apoio e supervisão deste trabalho que, além de coorientador, tornou-se meu guia e amigo.

Aos colegas e amigos do Tecgraf, senhor Francisco, Nilthson, Cristian, Maria Fernanda, por me ajudarem nas dúvidas que tive no começo desta dissertação. A Pedro, Marcelo, Fernandita, Joana, Helvio, Nuno, Marko, Marlene, Leo e Luis por compartilhar comigo o tempo que estive no Tecgraf.

Aos meus amigos e família no Rio, Juancho el chatico, Jhonsito el Harrys, Rodri, Chechito, Renatico, Eliot, Willi, Danielito, Juaco, Jesse, Lorenita, Dalmita, Diliecita, Luisita, Margarita, Moni, Leidicita, Jenny Jenny, com vocês aprendi

muitas coisas e compartilhei os melhores momentos no Rio. Obrigado pela força nos momentos difíceis e os sorrisos compartilhados.

À PUC-Rio, pela oportunidade de me permitir assumir este desafio.

Ao programa CAPES, pelo apoio financeiro durante o mestrado.

Ao Instituto Tecgraf, pela oportunidade de trabalhar com um tema de grande relevância e desafios.

Resumo

Castaño, Mario Alberto Ramirez; Roehl, Deane de Mesquita; Quispe, Roberto Quevedo. **Modelagens 2D e 3D para avaliação de reativação de falhas geológicas em reservatórios de petróleo.** Rio de Janeiro, 2016. 105p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Reservatórios de petróleo e gás estruturalmente compartimentados por falhas geológicas selantes são encontrados em diversas regiões do mundo. Durante a fase de exploração, a integridade do selo destas falhas pode ser comprometida pelas deformações decorrentes dos processos de depleção e/ou injeção de fluidos. Estas deformações, em conjunto com as propriedades físicas e geométricas das rochas e falhas presentes, podem alterar significativamente o estado de tensões do maciço rochoso fazendo com que uma falha reative e se torne hidráulicamente condutora. A esse fenômeno estão associados riscos de exsudação, perda de integridade de poços e outros potenciais problemas geomecânicos. Na literatura, diversas modelagens numéricas têm sido utilizadas a fim de caracterizar e prever os fenômenos de reativação e/ou abertura de falhas geológicas. A maior parte de estas abordagens faz uso de modelos bidimensionais considerando seções críticas na hipótese de estado plano de deformação. Essas simplificações são adotadas a fim de evitar a complexidade geométrica e o alto custo computacional de uma modelagem tridimensional. No entanto, a configuração tridimensional dos planos de falha pode induzir a reativação em direção a zonas mais críticas do que aquelas contidas numa única seção. Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para análise de reativação de falhas geológicas e discute-se a importância do uso dos modelos 3D na previsão do comportamento geomecânico de reservatórios compartimentados por falhas geológicas. São apresentados 3 modelos diferentes. O primeiro exemplo traz um modelo bidimensional apresentado na literatura, faz-se uma comparação dos resultados com representação por meio do elemento de interface, por meio do continuo equivalente e por meio de um elemento sólido com fraturas embutidas. O segundo exemplo faz-se um comparativo entre a utilização de elementos quadriláteros e triangulares para a representação da falha em modelos

3D. Para o terceiro modelo foram realizadas simulações numéricas considerando modelos 2D e 3D em um simulador *in-house* baseado no método dos elementos finitos. Para a representação do meio contínuo foram utilizados elementos quadriláteros para o caso 2D, e elementos hexaédricos e tetraédricos para o caso 3D. Para a representação das falhas geológicas foram utilizados elementos de interface de espessura nula segundo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Da comparação dos resultados, constata-se que as análises 2D e 3D forneceram previsões de reativação similares. No entanto, as previsões de pressões de abertura foram distintas em ambos os modelos devido às diferentes trajetórias de migração de fluido. Particularmente em modelos com geometria irregular confirma-se a importância do emprego de modelo 3D.

Palavras-chave

Método dos elementos finitos; reativação de falhas; elemento de interface; geomecânica de reservatórios.

Abstract

Castaño, Mario Alberto Ramirez; Roehl, Deane de Mesquita (Advisor); Quispe, Roberto Quevedo (Co-advisor). **2D and 3D modeling to evaluate reactivation of geological faults in oil reservoirs**. Rio de Janeiro, 2016. 105p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Oil and gas reservoirs that are structurally compartmented by sealing geological faults are common in several areas around the world. During production, the deformations from the processes of fluid depletion and/or injection can compromise the integrity of the seal of the faults. This deformation, together with the physical and geometrical properties from the rocks and faults can significantly change the stress state. Therefore, it might cause fault reactivation, turning it in a hydraulic conduit. Related to this phenomenon, are the exudation, loss of wellbore integrity and other potential geomechanical problems. There are several numerical modelling techniques available in literature to characterize and predict the reactivation and/or opening of geological faults. In most of these modelling approaches, bi-dimensional models are used for critical sections through the assumption of plane strain conditions. The reason for using 2D models is to avoid the geometrical complexity and the high computational costs associated to three-dimensional modeling. On the other hand, the fault planes in the three-dimensional approach can show fault reactivation in a more critical direction e than the one represented by the bi-dimensional model. In this work, a methodology is presented in order to assess geological fault reactivation. In addition, the importance of using 3D models in the prediction of the geomechanical behavior of reservoirs compartmented by geological faults is discussed. Three different models are presented. The first example is based on a two dimensional model from the literature. A comparison between approaches using interface elements, equivalent continuum elements and solid element with fractures is carried out in the first example. The second example brings a comparison between the quadrilateral and triangular elements to represent faults in a 3D model. In addition, an analysis was carried out considering 2D and 3D models using an *in house* software based on the finite element method. To simulate the continuum medium, quadrilateral elements

are used in the 2D case and in the 3D case hexahedral and tetrahedral elements are employed. In addition, to represent the geological faults, interface elements with zero thickness are used in association with the Mohr-Coulomb failure criterion. In the case study, predictions of fault reactivation were similar in the 2D and 3D models. However, fault opening pressures were different in both models, due to the 3D fluid migration path. It also confirmed the importance of using 3D models when simulating irregular geometries.

Keywords

Finite element method; fault reactivation; interface element; reservoir geomechanics.

Sumário

1	Introdução	20
1.1.	Relevância e motivação	20
1.2.	Objetivos e Metodologia	22
1.3.	Estrutura da dissertação	23
2	Revisão Bibliográfica	25
2.1.	Falhas geológicas e propriedades da zona da falha	25
2.2.	Análise de tendência de reativação de falhas	28
2.2.1.	Solução analítica e semianalítica	28
2.2.2.	Soluções numéricas	31
3	Análise 3D de reativação de falhas pelo método dos elementos finitos	38
3.1.	Relações constitutivas	38
3.1.1.	Lei de Hooke generalizada	38
3.1.2.	Definição da matriz constitutiva	39
3.1.3.	Modelo Constitutivo de Mohr-Coulomb com Cut-off	43
3.1.4.	Integração numérica das tensões	47
3.2.	Formulação pelo método dos elementos finitos	53
3.2.1.	Equação de equilíbrio	53
3.2.2.	Discretização espacial	54
3.2.3.	Avaliação dos deslocamentos	57
3.2.4.	Avaliação das deformações	57
3.2.5.	Avaliação da matriz de rotação	58
3.2.6.	Avaliação da matriz de rigidez	61
3.3.	Validação em modelos 3D	63
3.3.1.	Elemento de interface sob tração	63
3.3.2.	Elemento de interface sob cisalhamento	64
3.3.3.	Elemento de interface sob tração e cisalhamento	65

4 Exemplos de aplicação	67
4.1. Simulações 2D	67
4.1.1. Descrição dos modelos	67
4.1.2. Análise e discussão de resultados	71
4.2. Simulações 3D	78
4.2.1. Descrição dos modelos	78
4.2.2. Análise e discussão de resultados	81
4.3. Comparação entre simulações 2D e 3D	84
5 Conclusões e Sugestões	88
5.1. Conclusões	88
5.2. Sugestões	90
Referências bibliográficas	91
Apêndice A	102

Lista de figuras

Figura 2-1 Orientação das tensões principais e seus tipos de falhas associadas (adaptado de Burg, 2013)	25
Figura 2-2 Núcleo e zona de dano em uma falha, adaptado de (Gudmundsson et al., 2010).	26
Figura 2-3 (a) Diagrama esquemático da estrutura transversal da zona da falha (b) permeabilidade (c) modulo de elasticidade. Cappa & Rutqvist (2010)	28
Figura 2-4 (a) Tensões atuantes na falha; (b) efeito pelo o incremento de poropressão na estabilidade da falha (Streit et al., 2004)	29
Figura 2-5 Esboço para explicar as posições dos pontos A, B, C. (Altmann et al., 2013)	30
Figura 2-6 Elemento 2D do continuo equivalente (a) rocha intata cruzada por uma falha (b).	32
Figura 2-7 Representação do fluxo através de meios fraturados	34
Figura 2-8 (a) Horizontes das superfícies que cortam a falha (SMB Fault) e (b) malha de elementos finitos (Vidal-Gilbert et al., 2009)	36
Figura 2-9 Evolução da poropressão nos poços injetores no reservatório D	37
Figura 3-1 Representação da superfície de escoamento no sistema de eixos principais de tensões	41
Figura 3-2 Comportamento perfeitamente plástico	41
Figura 3-3 Superfície de potencial plástico	42
Figura 3-4 Envoltória de Mohr-Coulomb no espaço $\sigma_1 - \tau$ (adaptado de Sørensen 2012)	44
Figura 3-5 Representação das componentes de tensão	44
Figura 3-6 Definição ângulo β	45
Figura 3-7 Envoltória de Mohr-Coulomb com cut-off no espaço $\sigma_1 - \tau$	46
Figura 3-8 Regiões para o retorno perpendicular fonte: Manual de reativação de falhas Instituto TecGraf 2014.	48
Figura 3-9 Elementos de interface 2D	55
Figura 3-10 Elementos de Interface triangulares	56
Figura 3-11 Elementos de Interface quadrilaterais.	56
Figura 3-12 Ângulos de Euler para definir a matriz de rotação no espaço 3D. Fonte: S. Widnall 16.07 Dynamics Fall 2009	59

Figura 3-13 Definição geométrica de strike, dip e dip direction.	60
Figura 3-14 Vetores no plano de falha	60
Figura 3-15 Modelo sintético submetido à tração	64
Figura 3-16 Trajetória de tensões para elemento de interface sometido a tensão normal	64
Figura 3-17 Elemento de interface sometido a tensão cisalhante	65
Figura 3-18 Trajetória de tensões para elemento de interface sometido a esforços cisalhantes.	65
Figura 3-19 Modelo sintético com falha inclinada	66
Figura 3-20 Trajetória de tensões	66
Figura 4-1 Geometria do modelo 2D com falha inclinada.	68
Figura 4-2 Malha para o modelo com representação da falha por meio de elementos de interface	69
Figura 4-3 Representação das falhas com os diferentes tipos de elementos (adaptado de Cappa and Rutqvist, 2010).	70
Figura 4-4 Variação das tensões ao longo do comprimento da falha no início do processo da reativação.	73
Figura 4-5 Trajetória de tensões para os pontos inferior (base do reservatório) e superior (topo do reservatório).	74
Figura 4-6 Resultados ao longo do comprimento da falha no final das simulações	75
Figura 4-7 Variação da poropressão ao longo do comprimento da falha.	76
Figura 4-8 Variação das tensões ao longo do comprimento da falha sem consideração de rotação das tensões principais.	77
Figura 4-9 Descrição das camadas e das falhas geológicas para as simulações 3D.	78
Figura 4-10 Malha de elementos finitos empregada no modelo 1.	80
Figura 4-11 Malha de elementos finitos empregada no modelo 2.	80
Figura 4-12. Primeiros pontos de reativação nas simulações 3D após um incremento de poropressão de 2,5MPa.	81
Figura 4-13 Evolução do índice de reativação com o incremento de poropressão no ponto A para os modelos 1 e 3.	81
Figura 4-14 Evolução das tensões, normal efetiva e cisalhante, com o incremento de poropressão no ponto A para os modelos 1 e 3.	82
Figura 4-15 Regiões que indicam os primeiros pontos de reativação nos modelos 1 e 2.	82

Figura 4-16 Evolução da migração da poropressão em todo o modelo 1 (esquerda) e em todo o modelo 2 (direita)	83
Figura 4-17 Geometria e malha de elementos finitos para a modelo 2D.	84
Figura 4-18 Regiões que indicam os primeiros pontos de reativação no modelo 2D	84
Figura 4-19 Evolução do índice de reativação com o incremento de poropressão no ponto A.	85
Figura 4-20 Evolução das tensões, cisalhante e normal efetiva, com o incremento de poropressão no ponto A	85
Figura 4-21 Evolução da migração da poropressão em todo o modelo 2D. Malha deformada em 60 vezes.	86
Figura 4-22 Migração de fluido através da falha F2 no final da simulação do modelo 3D.	87
Figura 4-23 a) Evolução do índice de reativação com a pressão de injeção e b) Evolução da tensão normal efetiva com a pressão de injeção, ambos na região indicada na Figura 4-22.	87

Lista de tabelas

Tabela 3.1. Condição de instabilidade	46
Tabela 3.2. Propriedades do modelo sintético para avaliação das tensões	63
Tabela 4.1 Propriedades utilizadas nos modelos 2D (Cappa & Rutqvist, 2010)	68
Tabela 4.2 Resultados comparativos de pressão de reativação na falha.	71
Tabela 4.3. Propriedades da rocha para os elementos sólidos	79
Tabela 4.4. Propriedades da falha para os elementos de interface	79

Lista de símbolos

B	Matriz que relaciona os deslocamentos com as deformações
C^R	Tensor elastico do continuo equivalente
CI	Condição de instabilidade
C_x	Componente do vetor Z''
C_y	Componente do vetor Z''
C_z	Componente do vetor Z''
D	Matriz constitutiva da falha
D^e	Matriz constitutiva elastica
D^{ep}	Matriz constitutiva elasto plastica
E	Módulo de Elasticidade
F	Superfície de escoamento
F_1	Função de plastificação de Mohr-Coulomb
F_2	Função de corte ("Cut-off")
F_{ext}	Vetor de forças externas
G	Modulo de cisalhamento
IR	Índice de reativação
K	Matriz de rigidez
L	Matriz de acoplamento
N_{noel}	Numero de nós do elemento de interface
N_p	Funções de forma para descrição da variação da porpressão
N_i	Funções de forma para os graus
P	Poropressão
R	Matriz de rotação do sistema de coordenadas global para o local
T	Resistência à tração da falha
u_G^{topo}	Deslocamentos a nivel global no topo do elemento de interface
u_G^{base}	Deslocamentos a nivel global na base do elemento de interface
u_L^{topo}	Deslocamentos a nivel local no topo do elemento de interface
u_L^{base}	Deslocamentos a nivel local na base do elemento de interface
u_X^{topo}	Deslocamento no topo do elemento de interface na direção X
u_Y^{topo}	Deslocamento no topo do elemento de interface na direção Y
u_Z^{topo}	Deslocamento no topo do elemento de interface na direção Z

u_X^{base}	Deslocamento na base do elemento de interface na direção X
u_Y^{base}	Deslocamento na base do elemento de interface na direção Y
u_Z^{base}	Deslocamento na base do elemento de interface na direção Z
Z''	Vetor perpendicular ao plano de falha
b	Abertura da fratura
b_0	Abertura inicial da fratura
c	Coesão
e	Espessura equivalente da falha geologica
k	Permeabilidade intrínseca
k_N	Coefficiente de rigidez normal da falha
k_S	Coefficiente de cisalhante da falha
m	vetor que introduz a influência da poropressão na direção normal do tensor de tensões
s	Espaçamento entre fraturas
s_0	Espaçamento inicial entre fraturas
Λ	Multiplicador plastico
u	Deslocamentos nodais
α	Coefficiente de Biot
β	Ângulo entre a resulante das tensoes cisalhantes e τ_1
δ_i^F	Deslocamento relativo no plano de falha
δ_i^R	Deslocamento na rocha intata
Δ	Incremento / Variação
ε^p	Deformação plastica
ε^R	Vetor de deformações para o continuo equivalente
θ	Ângulo entre o vetor normal ao plano de falha
ν	Coefficiente de Poisson
μ	Coefficiente de atrito
σ	Vetor de Tensão
σ_1	Tensão principal máxima
σ_2	Tensão principal intermediária
σ_3	Tensão principal mínima
σ_n	Tensão normal
σ'_n	Tensão normal efetiva
σ_{n+1}^{trial}	Tensão preditora
τ	Tensão cisalhante

τ_1	Tensão cisalhante ao plano da falha
τ_2	Tensão cisalhante ao plano de falha
τ_{res}	Resistência ao cisalhamento no plano de falha
ϕ	Ângulo de atrito
Ω_e	Domínio do elemento de interface
$\{k\}$	Parametro de amolecimento/encruamento
$ J $	Determinante Jacobiano