



Julio Alberto Rueda Cordero

**Reativação de falhas geológicas com modelos
numéricos discretos e distribuído**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do Departamento
Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Deane de Mesquita Roehl
Co-orientadora: Dr^a. Maria Fernanda Figueiredo de Oliveira

Rio de Janeiro
Abril de 2013



Julio Alberto Rueda Cordero

**Reativação de falhas geológicas com modelos
numéricos discretos e distribuído**

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

Profa. Deane de Mesquita Roehl

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC

Dr^a. Maria Fernanda Figueiredo de Oliveira

Co-orientadora

Tecgraf/PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil – PUC

Prof. Givanildo Alves de Azeredo

Universidade Federal da Paraíba

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de abril de 2013

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

Julio Alberto Rueda Cordero

Graduado em Engenharia Civil pela Universidad Industrial de Santander (UIS) Bucaramanga – Colômbia, em 2009. Durante a graduação, atuou como pesquisador de iniciação científica na área de geomecânica no grupo de estabilidade de poço do ICP-UIS. Em 2011, ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, onde vem desenvolvendo investigações na linha de pesquisa de geomecânica Computacional.

Ficha Catalográfica

Cordero, Julio Alberto Rueda

Reativação de falhas geológicas com modelos numéricos discretos e distribuído / Julio Alberto Rueda Cordero ; orientador: Deane de Mesquita Roehl ; co-orientadora: Maria Fernanda Figueirido de Oliveira. – 2013.
137 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.
Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Reativação de falhas. 3. elemento de interface. 4. fratura distribuída. 5. mecânica computacional. I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Oliveira, Maria Fernanda Figueirido de Oliveira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus adorados pais Maria e Reyes, pela
confiança e o amor incondicional. As minhas irmãs
Diana, Yenny e Leidy.

Agradecimentos

A Deus, pela força que me deu, pelo seu amor e acompanhamento em todos os momentos.

A meus orientadores, Deane Roehl pela confiança, dedicação e orientação para o desenvolvimento deste trabalho e à Maria Fernanda Figueiredo de Oliveira pelo acompanhamento em todos os momentos, orientação, dedicação e paciência na implementação numérica do trabalho, obrigado por todos os conhecimentos transmitidos.

A minha querida mãe Maria que me deu a oportunidade da vida e que teve completa confiança em minhas decisões. A meu Pai Reyes que me deu apoio em todos os momentos da minha vida.

As minhas irmãs pelo apoio e inspiração, pelo carinho e incentivo em todos os momentos.

À Nathaly, que veio para me dar seu apoio incondicional, incentivo e carinho para conseguir o objetivo.

A meus amigos Juan, Giovanni, Alexandre, Nicolas, Marko, Roberto e Fabio que foram um grande apoio e incentivo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – Faperj – pela concessão da bolsa de mestrado.

Agradeço ao laboratório Tecgraf pela oportunidade de trabalhar com um tema de grande relevância e desafios.

Resumo

Rueda, Julio Alberto Cordero; Roehl, Deane de Mesquita; Figueiredo, Maria Fernanda de Oliveira. **Reativação de falhas geológicas com modelos numéricos discretos e distribuído**. Rio de Janeiro, 2013. 137p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em reservatórios complexos com descontinuidades geológicas como falhas, os riscos na produção de petróleo e gás pelos métodos de injeção frequentemente utilizados são maiores. Um dos fenômenos que pode acarretar graves problemas de perda de produção e acidentes ambientais é a reativação de falhas geológicas. Isto ocorre devido às variações de tensões induzidas na formação, as quais podem ser suficientemente altas para reativar as falhas e modificar significativamente o comportamento do reservatório, gerando uma das situações mais críticas na indústria de petróleo. Nessa dissertação investiga-se através do método dos elementos finitos o fenômeno de reativação de falhas com base em modelos de representação explícita da falha através de elementos de interface. Adota-se ainda para efeitos de comparação uma modelagem da falha por meio de uma zona de falha através do conceito de contínuo equivalente. Uma metodologia com base em uma análise poro-elastoplástica desacoplada que permite estimar as pressões limite para a reativação durante a produção em reservatórios de petróleo de uma maneira versátil e eficiente foi empregada nas situações investigadas através do simulador Abaqus®. Para tal, foram implementadas uma série de rotinas para incorporar ao programa Abaqus® novos elementos de interface, governados pelo modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. A metodologia apresentada foi avaliada e verificada através da simulação de um modelo sintético com falha normal comparando os resultados com uma solução analítica simplificada e com os resultados obtidos com o simulador de elementos finitos AEEPECD® (Costa, 1984). São apresentados alguns exemplos de aplicação representando a falha com elementos de interface e como um contínuo equivalente. Os resultados obtidos nas análises demonstram a aplicabilidade da metodologia a problemas de campos reais.

Palavras-chave

Reativação de falhas; elemento de interface; fratura distribuída; mecânica computacional.

Abstract

Rueda, Julio Alberto Cordero; Roehl, Deane de Mesquita (Advisor); Figueiredo, Maria Fernanda de Oliveira (Co-advisor). **Reactivation of geological faults with discrete and distributed numerical models**. Rio de Janeiro, 2013. 137p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In complex reservoirs with geological discontinuities, such as faults, the risk in the production of oil and gas are increase by the injection methods frequently used. The injection and depletion processes induce stress variations in the formation. These can be high enough to reactivate faults and significantly modify the behavior of the reservoir, bringing on one of the most critical situations in the oil industry. In this context, this dissertation investigates the phenomenon of fault reactivation by employing the finite element method based on an explicit representation of the fault with interface elements. In addition, a fault zone model based on an equivalent continuum approach is adopted for comparison. The pressure limits during production of oil reservoirs considering fault reactivation are determined from pore-elastoplastic uncoupled analyses with the software Abaqus®. With this purpose, interfaces elements with Mohr-Coulomb constitutive model were implemented through user subroutine in Abaqus to represent, in an approximate way, the fault behavior. In addition, other tools were developed to facilitate the generation of the models to be analyzed. The presented methodology was evaluated and verified through the simulation of a synthetic model with a normal fault. The results were compared with a simplified analytical approach and the results obtained by finite element simulator AEEPECD ® (Costa, 1984). Some examples of applications are presented, in which faults are represented using interface elements and alternatively, through an equivalent continuum approach. The analysis results demonstrate the applicability of the methodology to real fields.

Keywords

Fault reactivation; interface element; smeared crack, computational mechanics.

Sumário

1 Introdução	20
1.1. Relevância e Motivação	20
1.2. Objetivos e metodologia	22
1.3. Estrutura da dissertação	22
2 Análise geomecânica de reativação e abertura de falhas geológicas submetidas à pressão de fluido	24
2.1. Falhas geológicas	24
2.1.1. Regime de tensões e tipos de falhas	25
2.1.2. Fenômenos de instabilidade nos processos de produção	26
2.1.3. Parâmetros geomecânicos necessários nas análises de reativação de falha	27
2.2. Análises de deslizamento e reativação de falhas	28
2.2.1. Modelos analíticos	28
2.2.2. Análises semi-analíticas	32
2.2.3. Análises numéricas	32
2.3. Critérios para a estimativa de limites seguros de pressões de injeção	33
2.4. Análises numéricas de pressão de injeção em formações rochosas com falhas geológicas	33
3 Método dos elementos finitos com representação explícita da falha por elementos de interface	42
3.1. Elementos de interface	42
3.1.1. Elemento de Goodman, Taylor e Brekke (1967)	42
3.1.2. Elemento de Ghaboussi, Wilson e Isenberg (1973)	44

3.1.3. Elemento de Pande e Sharma (1979)	46
3.1.4. Elemento de Desai, Lightner e Siriwardane (1984)	47
3.1.5. Elemento de Beer (1985)	47
3.1.6. Elemento de Day & Potts (1994)	47
3.2. Equações de equilíbrio	47
3.3. Princípio de tensões efetivas	53
3.4. Formulação numérica do elemento de interface	55
3.5. Equações constitutivas	61
3.6. Modelos constitutivos	65
3.6.1. Modelo linear elástico	65
3.6.2. Modelo Constitutivo de Mohr-Coulomb com limite de resistência à tração	66
3.6.3. Integração numérica de tensões	68
3.6.4. Algoritmo de integração	69
3.6.5. Hipóteses adotadas para a formulação do algoritmo de integração	71
4 Metodologia e verificação	77
4.1. Modelo Sintético	77
4.2. Modelo Geométrico e discreto do reservatório com falha normal	79
4.3. Implementação do modelo de reativação no simulador de elementos finitos Abaqus	80
4.3.1. Primeira Etapa	82
4.3.2. Análise poro-elastoplástica	93
4.4. Análise do modelo sintético	93
4.4.1. Comparação de resultados entre Modelo 1 e Modelo 2	97
4.4.2. Comparação de resultados para os modelos Modelo 3 e Modelo 4	101

4.4.3. Solução analítica simplificada	103
5 Exemplos de Aplicação	106
5.1. Modelo com falha Inclínada a 80° em relação a horizontal	106
5.1.1. Modelo com zona de falha (contínuo equivalente)	108
5.1.2. Modelo com plano de falha (elementos de interface)	110
5.2. Análise de reativação e abertura de falha no campo Miranga (Brasil)	112
5.3. Propriedades mecânicas	114
5.4. Análise por elementos finitos	115
6 Conclusões e Sugestões	127
6.1. Sugestões	128
Referências bibliográficas	129

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Falhas associadas com a produção do fluido (Segall, 1989) 21

Figura 2.1 – Zona de falha por nível Crustal (adaptada de Salamuni, 2010) 25

Figura 2.2 – Esquema de Anderson para classificação dos regimes de falha (adaptada de Sugar Land Learning Center) 26

Figura 2.3 – Cisalhamento-deslizamento ao longo de uma falha pré-existente como resultado de: (a) incrementos da pressão de fluido; (b) alterações de tensões devido a efeitos poro-elásticos (modificado de Rutqvist et al., 2007) 29

Figura 2.4 – (a) simplificações adotadas pela solução analítica, (b) tensões poroelásticas induzidas pela injeção 30

Figura 2.5 – Representação do plano de falha usando: (a) elementos de interface; (b) elementos sólidos com propriedades anisotrópicas (adaptado de Rutqvist et al., 2007) 35

Figura 2.6 – Esquema do modelo discreto utilizado no TOUGH-FLAC durante injeção de CO₂ (adaptado de Rutqvist et al. 2007) 36

Figura 2.7 – Simulação da pressão de injeção com e sem mudanças induzidas da permeabilidade da falha (adaptado de Rutqvist et al., 2007) 36

Figura 3.1 – Geometria do elemento de interface de Goodman et.al (1967) 43

Figura 3.2 – Geometria do elemento de interface de Ghaboussi et.al (1973) 44

Figura 3.3 – Detalhe do elemento de interface de Ghaboussi et.al (1973) 45

Figura 3.4 – Detalhe do elemento de interface de Pande et.al (1973) 46

Figura 3.5 – Detalhe do elemento de interface tipo 3 de 6 nós 57

Figura 3.6 – Transformação de coordenadas	59
Figura 3.7- Comportamento elástico-plástico com endurecimento	64
Figura 3.8 – Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb (adaptado de Souza Neto, 2007)	67
Figura 3.9 – interpretação do método de integração implícito	69
Figura 3.10 – Retorno vertical à Superfície de plastificação com a formulação 1 (adaptado de Michal, 2007)	73
Figura 3.11 – Retorno perpendicular à Superfície de plastificação com a formulação 2 (adaptado de Michal, 2007)	75
 Figura 4.1 – Modelo sintético com falha normal	 78
Figura 4.2 – Fluxograma da primeira etapa: aplicação do gradiente de tensões no simulador Abaqus	81
Figura 4.3 – Fluxograma da segunda etapa: análise poro-elastoplástica com o simulador Abaqus	82
Figura 4.4 – Janela principal do programa Sigma2D	83
Figura 4.5 – Janela principal do programa auxiliar	83
Figura 4.6 – Geometria feita no programa Sigma2D	84
Figura 4.7 – Tensões atuantes na falha	85
Figura 4.8 – Cabeçalho da Sub-rotina UEL	87
Figura 4.9 – Critérios de reativação e abertura da falha	89
Figura 4.10 – Tensões verticais σ_v (kPa)	89
Figura 4.11 – Arquivo.pos de saída do Abaqus que contém as reações nodais do modelo	90
Figura 4.12 – Arquivos.inc de entrada para Abaqus com as reações nodais do modelo	90
Figura 4.13 – Deslocamentos totais no estado geostático	91
Figura 4.14 – Estado de tensões geostático – tensões verticais (σ_v)	91
Figura 4.15 – Área amplificada do modelo sintético com falha normal de 60° onde foi analisada a reativação e abertura hidráulica	94
Figura 4.16 – Razão τ_s / τ_{slip} ao longo da falha do reservatório, usando elementos com interpolação linear para valores de incrementos de poropressão de $\Delta p = 2.1, 2.2, 2.3, 2.4$ e 2.5 MPa, respectivamente.	95

Figura 4.17 – Razão τ_s / τ_{slip} ao longo da falha do reservatório, usando elementos com interpolação quadrática para valores de incrementos de poropressão de $\Delta p = 2.1, 2.2, 2.3, 2.4$ e 2.5 MPa, respectivamente	95
Figura 4.18 – Tensões normais efetivas ao longo da falha do reservatório para o nível de poropressão de 5.1 MPa, usando elementos com interpolação linear	96
Figura 4.19 – Tensões normais efetivas ao longo da falha do reservatório para o nível de poropressão de 5.3 MPa, usando elementos com interpolação quadrática	96
Figura 4.20 – Histórico da razão $R = \tau_s / \tau_{slip}$ no primeiro ponto de reativação da falha	98
Figura 4.21 – Histórico da tensão normal efetiva no primeiro ponto de abertura da falha	98
Figura 4.22 – Histórico da tensão cisalhante no primeiro ponto de abertura da falha	99
Figura 4.23 – Histórico das deformações normais no primeiro ponto de abertura da falha	100
Figura 4.24 – Histórico das deformações cisalhantes no primeiro ponto de abertura da falha	100
Figura 4.25 – Histórico da razão $R = \tau_s / \tau_{slip}$ no primeiro ponto de reativação da falha	101
Figura 4.26 – Histórico das tensões normais efetivas no primeiro ponto de abertura da falha	101
Figura 4.27 – Histórico das tensões cisalhantes no primeiro ponto de abertura da falha	102
Figura 4.28 – Histórico da deformação normal no primeiro ponto de abertura da falha	102
Figura 4.29 – Histórico da deformação cisalhante no primeiro ponto de abertura da falha	103
Figura 4.30 – Diagrama de Mohr- Coulomb para reativação de falha durante o processo de injeção considerando solução analítica simplificada	104

Figura 4.31 – Diagrama de Mohr-Coulomb durante o processo de injeção para o modelo sintético com falha normal inclinada a 60°	105
Figura 5.1 – Vista do modelo com falha Inclinada a 80° com a horizontal (modificado de Rutqvist et al, 2007)	106
Figura 5.2 – Modelo de elementos finitos, com 45771 e 15130 nós e 15130 elementos	108
Figura 5.3 – Estado inicial de tensões verticais σ_v (kPa)	108
Figura 5.4 – Tensões normais e razão $R = \tau_s/\tau_{slip}$ ao longo da zona de falha no incremento de poropressão $\Delta p = 5000$ kPa	109
Figura 5.5 – Plastificação ao longo da zona de falha nos incrementos de poropressão: (a) $\Delta p = 4400$ kPa, (b) $\Delta p = 10000$ kPa	109
Figura 5.6 – Razão $R = \tau_s/\tau_{slip}$ ao longo da falha para o incremento de poropressão $\Delta p = 3400$ kPa	110
Figura 5.7 – Índice de reativação $R = \tau_s/\tau_{slip}$ ao longo do trecho de falha A-B para $\Delta p = 0, 3400$ kPa e 7800 kPa	110
Figura 5.8 – Tensão normal efetiva ao longo da falha para os incrementos de poropressão $\Delta p = 0$ kPa, 3400 kPa e 5200 kPa	112
Figura 5.9 – Mapa estrutural do campo do Miranga (Fonte: Mendes et al., 2010)	113
Figura 5.10 – Mapa com as principais falhas e poços injetores no bloco 1 e 2 do campo do Miranga. A seção 3 selecionada está mostrada em vermelho (Modificada de Mendes et al., 2010)	113
Figura 5.11 – Litologia da seção 3 (falhas em Magenta)	115
Figura 5.12 – Modelo de elementos finitos da seção 3, com 27246 nós e 9083 elementos	116
Figura 5.13 – Estado inicial de tensões verticais σ_v (kPa)	117
Figura 5.14 – Estado inicial de tensões horizontais minimas σ_{hmin} (kPa)	117
Figura 5.15 – Incrementos de poropressão de depleção Δp (kgf/cm ²) na seção 3	118
Figura 5.16 – Razão $R = \tau/\tau_{slip}$ da falha 1 seção 3 desde Catu 1 à esquerda até Catu 6 à direita da falha ao final do processo de depleção	118

Figura 5.17 – Tensões normais ao longo da falha 1 seção 3 desde Catu 1 à esquerda até Catu 6 à direita da falha	119
Figura 5.18 – Tensões cisalhantes ao longo da falha 1 seção 3 desde Catu 1 à esquerda até Catu 6 à direita da falha	119
Figura 5.19 – Esquema de carregamento de Δp (kgf/cm ²)	120
Figura 5.20 – Tensões verticais σ_v (kPa) para $\Delta p = 0.0$ kPa	121
Figura 5.21 – Tensões verticais σ_v (kPa) para $\Delta p = 6906.06$ kPa na falha 1 $\Delta p = 5895$ kPa na falha 2	121
Figura 5.22 – Tensões principais σ_v (kPa) para $\Delta p = 10097.92$ kPa na falha 1 $\Delta p = 8375$ kPa na falha 2	122
Figura 5.23 - Razão $R=\tau_s/\tau_{slip}$ ao longo da falha 1 para $\Delta p = 0, 1954$ kPa, 7713 kPa, 8613 kPa	123
Figura 5.24 – Tensão normal efetiva ao longo da falha para os incrementos de poropressão $\Delta p = 0, 1954$ kPa, 7713 kPa, 8613 kPa	124
Figura 5.25 – (a) Plastificação ao longo da falha 1 com $\Delta p = 3256$ kPa; (b) Plastificação ao longo da falha 2 com $\Delta p = 3706$ kPa	125
Figura 5.26 – (a) Plastificação ao longo da falha 1 com $\Delta p = 6513.00$ kPa; (b) plastificação ao longo da falha 2 com $\Delta p = 5406.66$ kPa	125

Lista de quadros

Quadro 2.1 – Resultados de pressões máximas de injeção (Rutqvist et al., 2007)	37
Quadro 3.1 – Tipos de elementos de interface implementados.	56
Quadro 3.2 – fatores de ponderação dos pontos de Newton Cotes do elemento de Interface	61
Quadro 3.3– Esquema implícito de integração de tensão	71
Quadro 3.4 – Esquema de integração de tensão com a formulação 1	74
Quadro 3.5 – Esquema de integração de tensão com a formulação 2	76
Quadro 4.1 – Propriedades mecânicas da rocha e da falha do modelo sintético	78
Quadro 4.2 – Tensões horizontais e verticais nos elementos sólidos	92
Quadro 4.3 – Tensões cisalhantes e normais nos elementos de interface	92
Quadro 5.1 – Propriedades da rocha e falha.	107
Quadro 5.2 – Resultados comparativos de pressão de reativação na falha	111
Quadro 5.3 – Propriedades das rochas	114
Quadro 5.4 – Propriedades das falhas	115
Quadro 5.5 – Resultados de carregamento no cenário 2	122
Quadro 5.6 – Cálculo do K_0 e peso específico médio (γ)	123
Quadro 5.7 - Resultados de carregamento no cenário 3	124
Quadro 5.8 – Incrementos de poropressão em que $R = 1$	126

Lista de Símbolos

b	Vetor de forças de corpo
B	Matriz de relação deformação/deslocamento
c	Coesão do solo
D_e	Matriz elástica tensão-deformação
D_t	Matriz constitutiva tangencial
DT	Parâmetro de probabilidade de reativação por tração
D_{ep}	Constitutiva elasto-plástica
E	Módulo de Young
E_{din}	Módulo de elasticidade dinâmico
E_{est}	Módulo de elasticidade estático
F_b	Vetor de força devido ao peso próprio
F_{ext}	Vetor de forças externas
F^N	Vetor que contém as quantidades residuais
F_{int}	Vetor de forças internas
F_{δ}	Vetor devido aos deslocamentos prescritos não nulos
F_s	Vetor de forças de superfície
G	Módulo cisalhante
H	Profundidade de interesse
$ J $	Determinante do jacobiano
K	Matriz de rigidez
K_t	Matriz de rigidez tangente
k	Permeabilidade do médio
k_n	Coefficiente de rigidez normal

k_s	Coeficiente de rigidez tangencial
K_0	Coeficiente de empuxo da tensão horizontal mínima
\dot{k}	Variação infinitesimal do endurecimento
L	Matriz de acoplamento
m	Vetor equivalente ao delta de Kronecker
MT	Matriz de transformação
\bar{N}	Matriz de funções de interpolação
N_p	Funções de forma da poropressão
p	Pressão do fluido
p	Vetor da poropressão nodal
p_e	Excesso de poropressão
p_s	Poropressão em estado estacionário
R	Razão de tendência à reativação
R_c	Forças externas concentradas
Δu	Vetor de deslocamentos de ponderação
R_t	Resistência de tração da falha
t	Vetor de forças de superfície
t	Espessura de influência da falha geológica
u	Vetor de deslocamentos nodais
U	Vetor de deslocamentos contínuos
W	Vetor das funções de ponderação
$W_{\xi i}$	Pesos respectivos aos pontos de integração
μ	Coeficiente de atrito estático
α	Coeficiente de Biot
$\frac{\partial f}{\partial \sigma}$	Gradiente da função de plastificação

ν	Coeficiente de Poisson
ε	Vetor das componentes de deformação
$\Delta\varepsilon$	Incremento de deformação total
ε_{η}	Deslocamentos relativos normais
ε_{ξ}	Deslocamentos relativos tangenciais
ϕ	Ângulo de atrito interno
σ	Vetor das componentes de tensão
σ_v	Tensão vertical
σ_{Hmax}	Tensão horizontal máxima
σ_{hmin}	Tensão horizontal mínima
σ_n	Tensão normal à superfície
σ'_n	Tensão normal efetiva à superfície
σ_{trial}	Incremento de tensão preditor elástico
$\Delta\sigma_{trial}$	Incremento de tensão preditor elástico
τ	Tensão de cisalhamento no plano de ruptura
τ_{slip}	Tensão cisalhante de ruptura
λ	Gradiente de tensão vertical
∇	Operador diferencial
ψ	Ângulo de dilatação
γ_{sub}	Peso específico submerso
γ_{sat}	Específico da zona de interesse
γ_w	Peso específico da água
Δp	Incremento de poropressão
$\Delta\gamma$	Parâmetro plástico da função de plastificação