Análise geomecânica de reativação e abertura de falhas geológicas submetidas à pressão de fluido

Neste capítulo são apresentados os tipos de análises e as diferentes metodologias usadas para representar de forma aproximada a zona de falha. São mencionados os modelos adotados na literatura para representar a tendência de deslizamento e a reativação de falhas. Finalmente, apresentam-se os modelos numéricos e as hipóteses adotadas na literatura para realizar o estudo hidromecânico acoplado ou parcialmente acoplado do problema de fluxo na zona de falha.

2.1. Falhas geológicas

2

Em geologia, as falhas são descontinuidades na crosta superior formadas pela fratura das rochas superficiais. As falhas podem ser causadas por tensões compressivas, distensivas ou cisalhantes e são características comuns dos cinturões montanhosos.

A zona de ruptura normalmente tem uma superfície bem definida comumente conhecida como plano de falha. Quando estão presentes inúmeras superfícies de falha paralelas ou anastomosadas em uma região, esta é chamada zona de falha. As zonas de falha normalmente se localizam em zonas de deformação rúptil, como ilustrado na Figura 2.1.



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

2.1.1. Regime de tensões e tipos de falhas

As falhas podem ser classificadas em três tipos principais: normal ou distensiva, inversa e transcorrente. Zoback (2006) recomenda levar em conta a magnitude das tensões principais (σ_1 , σ_2 , σ_3) em termos de σ_v , σ_{Hmax} e σ_{hmin} , a qual tem a forma original do esquema de Anderson (1951), Conforme ilustrado na Figura 2.2.



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

2.1.2. Fenômenos de instabilidade nos processos de produção

Segundo Zhang et al. (1996), é evidente a participação do fluido nos processos de reativação de falha. Zhang et al. (1996) expõe alguns exemplos de terremotos induzidos pelos incrementos de poropressão (Talwani e Acree, 1985) e observações de pós-sísmica devido a descarregas de fluido (Briggs & Troxell, 1955; Sibson, 1981). Na década de 1960 ocorreram terremotos na área de Denver devido à injeção de gás em um reservatório fraturado a uma profundidade de 3700 m. O caso anterior de reativação de falha é valido para situações onde a variação da poropressão está localizada próxima da falha (Hawkes et al., 2004).

Charlier et al. (2002) afirmam que no processo de depleção dois tipos de deformação estão presentes. O primeiro é a compactação do reservatório que conduz à subsidência da superfície afetando a permeabilidade do reservatório. A segunda é a reativação de falhas pre-existentes e o fraturamento da formação dentro e fora do reservatório. Estes fenômenos podem induzir mudanças na transmissividade hidráulica incluindo a perda de capacidade selante da falha, sismicidade, perda da integridade da rocha, falha de poço e colapso do revestimento do poço *"casing"*.

2.1.3.

Parâmetros geomecânicos necessários nas análises de reativação de falha

Para a avaliação do risco de reativação de falha é necessário determinar o regime de tensão, a orientação da falha, as propriedades de resistência da rocha e da falha, as tensões produzidas pela depleção do reservatório, a pressão mínima alcançada durante a depleção do reservatório e a máxima pressão que vai ser alcançado no processo de injeção (Hawkes et al., 2004).

Normalmente, algumas propriedades da rocha e da falha são obtidas de testes do material em laboratório ou estimadas com base em dados publicados. Mendes et al. (2010) avaliaram as propriedades de deformação das falhas em relação às propriedades de deformação das rochas adjacentes e da espessura do núcleo da falha. A coesão e o ângulo de atrito da falha são baseados nos valores residuais (primeiro ponto depois da ruptura) obtidos em ensaios triaxiais e ensaio de cisalhamento direto.

As tensões *in situ* normalmente são estimadas a partir de hipóteses de estados tectônicos locais ou dadas de poço. No processo de produção, a mudança da magnitude da tensão horizontal mínima normalmente é proporcional à mudança de magnitude de pressão. No entanto, esta relação é afetada por fatores do reservatório tais como a espessura, extensão lateral e forma do reservatório, propriedades mecânicas do reservatório e da formação como a orientação e resistência da falha que intersecta o reservatório.

Outro parâmetro importante é a transmissividade hidráulica *"leakoff"* da falha. A transmissividade hidráulica será afetada pela permeabilidade do plano de falha em relação à permeabilidade da rocha intacta e a variação da pressão

do fluido. Mudança na poropressão pode induzir variações de volume dentro do reservatório. Estas mudanças de volume, se altas, podem induzir deslocamentos da rocha capeadora. Se for associado o risco de reativação de falha com a magnitude da compactação do reservatório, então o risco aumenta com a espessura do reservatório e com as mudanças de pressão. O coeficiente de atrito estático, μ , é um parâmetro de muita importância na estimativa do potencial de reativação de falha (Rutqvist et al, 2007). Segundo Streit et al, (2002) os intervalos de valores de μ está entre 0.6 e 0.85. No entanto, Barton et al, (1996) observa que o valor do coeficiente de atrito μ =0.6 se apresenta em um grande número de fraturas hidráulicas ativas em rochas fraturadas.

Segundo Zhang et al. (1996), durante as análises de falhas é importante a compreensão da dilatação da fratura, deslizamento e a variação da pressão do fluido durante deformação. Além disso, é desejável avaliar a variação da permeabilidade e porosidade em uma região especifica antes e depois do deslizamento. No trabalho de Rutqvist et al (2007) a permeabilidade da falha muda com o cisalhamento, de modo que para uma falha totalmente reativada (máxima deformação cisalhante), a permeabilidade aumenta sua magnitude em duas ordens de grandeza.

2.2. Análises de deslizamento e reativação de falhas

O fenômeno de deslizamento e reativação de falhas foi a primeira possível causa do fluxo de fluido em áreas com falhas pré-existentes (Sibson, 1990). Este fenômeno é governado principalmente pelo critério de Mohr-Coulomb e tem sido estudado amplamente (uma detalhada revisão é fornecida por Zoback, 2007).

Na literatura se encontram três abordagens diferentes para a análise de reativação de falhas: análise analítica, análise semi-analítica e análise numérica.

2.2.1. Modelos analíticos

Os modelos analíticos do tipo cisalhamento-deslizamento são desenvolvidos usando tensões principais, orientações com respeito aos planos de falha pré-existentes e pressão de fluido atuando dentro do plano de falha (Rutqvist et al., 2007). Essas são as escolhas mais frequentes para uma primeira análise. Não obstante, Rutqvist et al. (2007) afirmam que os modelos

analíticos podem subestimar ou superestimar a pressão máxima de injeção devido às simplificações adotadas na geometria e nas tensões iniciais.

O critério fundamental para deslizamento de falhas é derivado do principio das tensões efetivas e do critério de Mohr-Coulomb (Moeck et al., 2009; Neves et al., 2009; Streit et al., 2002; Bostrøm et al., 2004; Mendes et al., 2010). O critério de Mohr-Coulomb pressupõe que a reativação ocorre quando a tensão cisalhante, τ , alcança o valor limite expresso em termos da tensão normal efetiva, $\sigma'_n = \sigma_{n+}p$, pela expressão:

$$\tau = c - (\sigma_n + p)\mu \tag{2.1}$$

Onde, τ é a tensão cisalhante para que ocorra ruptura, p é a pressão do fluido, c é a coesão da falha, μ é o coeficiente de atrito estático, que também pode ser escrito como: $\mu = \tan \phi$, em que, ϕ é o ângulo de atrito interno. A Equação (2.1) indica que o incremento de pressão do fluido pode induzir deslizamento, como ilustrado na Figura 2.3a.



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)

A tensão normal e cisalhante pode ser calculada a partir das tensões principais conforme as seguintes equações:

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta \tag{2.2}$$

$$\sigma'_{n} = \frac{1}{2} (\sigma'_{1} + \sigma'_{3}) + \frac{1}{2} (\sigma'_{1} - \sigma'_{3}) \cos 2\theta$$
(2.3)

Nas análises usando soluções analíticas, normalmente simplifica-se o problema aproximando o reservatório por um meio homogêneo composto por superfícies regulares, submetidos à poropressões constantes, ver Figura 2.4a. As soluções empregadas de forma fechada vão desde simples relações de ruptura com o critério de Mohr-Coulomb, até soluções fundamentais de inclusões elásticas embutidas no semi-espaço (Geertsma, 1966, 1973; Segall, 1989, 1992; Zoback, 2007; Soltanzadeh & Hawkes, 2009). Não entanto, tanto modelos numéricos como observações de poço indicam que as tensões *in situ* não permanecem constantes durante a injeção de fluido. O campo de tensões muda devido à injeção induzida quando o reservatório pressurizado é impedido de expandir-se pela rigidez da rocha circundante. Como resultado, o campo de tensões atuantes sobre o plano de falha muda, conforme ilustrado na Figura 2.4b. Em certos casos as tensões normais ao plano de falha aumentam evitando a reativação de falha. Em outros casos as tensões cisalhantes sobre o plano de falha aumentam induzindo a reativação, como ilustrado na Figura 2.3b.



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

A diminuição da tensão horizontal mínima é observada durante processo de depleção e está associada à queda de poropressão dos reservatórios (Streit

et al, 2002). Segundo Hawkes et al. (2004), no caso ideal de um reservatório sem falhas ativas em sua extensão e com propriedades iguais às das rochas adjacentes, a expressão que relaciona a variação das tensões horizontais, $\Delta \sigma_3 = \Delta \sigma_{hmin}$, com a variação da pressão do reservatório, Δp , é definida como:.

$$\Delta \sigma_3 = \alpha \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \Delta p \tag{2.4}$$

Em que α é o coeficiente de Biot e v é o coeficiente de Poisson. Esta relação já foi interpretada por Streit et al, (2002) como uma proporcionalidade entre as mudanças das tensões horizontais, $\Delta \sigma_3 = \Delta \sigma_{hmin}$ e a pressão da formação, Δp , como o parâmetro B

$$B = \frac{\Delta \sigma_3}{\Delta p}$$
(2.5)

É útil definir um parâmetro que indique a tendência de deslizamento da falha. Este parâmetro, R, pode ser obtido através da relação entre a tensão cisalhante no plano de falha e a tensão cisalhante crítica para que ocorra ruptura:

$$R = \frac{\tau}{\tau_{slip}}$$
(2.6)

De acordo com a Equação (2.6), os valores limites do parâmetro da tendência ao deslizamento são $0 \le R \le 1$, onde o valor 1 representa a máxima suscetibilidade à reativação.

Buchmann et al. (2008) apresentam a relação que reflete a tendência de reativação por tração da superfície de uma falha, a qual pode ser avaliada usando o conceito de tendência de dilatância (DT):

$$DT = \frac{\sigma_1 - \sigma_n}{\sigma_1 - \sigma_3}$$
(2.7)

O parâmetro de probabilidade de reativação por tração DT toma o valor de 0 para ($\sigma_1 = \sigma_n$) a 1 para ($\sigma_3 = \sigma_n$), em que σ_n é a tensão normal no plano de falha. Em contraste com o parâmetro de tendência de deslizamento, R, o parâmetro DT não incorpora o material ou as propriedades da falha e apenas representa a orientação da falha em um campo de tensões imposto.

2.2.2. Análises semi-analíticas

Soltanzadeh & Hawkes (2008) afirmam que as análises semi-analíticas poro-elásticas em meios porosos são uma ferramenta poderosa para a análise da resposta do reservatório com mudanças de pressão. Segal et al. (1994) empregaram um modelo poro-elástico axissimétrico para simular a subsidência e a sismicidade induzidas pela produção num reservatório. Os resultados dessas simulações mostram que as predições dos modelos poro-elásticos se correlacionaram razoavelmente bem com os dados de campo.

No entanto, os modelos utilizados em seu trabalho têm limitações e não são adequados nos casos em que as propriedades mecânicas do reservatório são diferentes das rochas adjacentes (Soltanzadeh & Hawkes, 2008).

2.2.3. Análises numéricas

As abordagens numéricas permitem aproximar melhor a geometria do campo, empregar modelos constitutivos mais complexos tais como modelos de dano (Guimarães et al., 2009), modelos de contato (Moeck et al., 2009; Bostrom & Skomedal, 2004) e modelos elastoplásticos com anisotropia (Rutqvist et al., 2007). Elas permitem ainda incorporar maior quantidade de parâmetros essenciais para a modelagem dos reservatórios e das zonas de falhas. Rutqvist et al. (2007) afirmam que as análises numéricas resultam em uma melhor aproximação da máxima pressão de injeção.

Na literatura, encontram-se diferentes formulações numéricas para a modelagem de reativação de falhas, tais como o método das diferenças finitas (MDF) (Zhang et al., 2009; Fouladvand et al., 2009; Rutqvist et al., 2007), o método dos elementos finitos (MEF) (Vidal-Gilbert, 2009; Zhang et al., 2009; Mendes, 2010) e o método dos elementos discretos (MED) (Zhang & Sanderson, 1996).

2.3. Critérios para a estimativa de limites seguros de pressões de injeção

Segundo Rutqvist et al. (2007), a máxima pressão de injeção é tal que não produz efeitos potenciais de dano.

Mendes et al. (2010) afirmam que as pressões de injeção máximas permitidas devem satisfazer os seguintes critérios de projeto:

 As tensões efetivas no reservatório devem ser de compressão, ou seja, não deve haver tensões de tração;

 As poropressões na extensão da falha no interior do reservatório devem ser inferiores às tensões horizontais mínimas nas rochas para mitigar a propagação da fratura;

 As poropressões na extensão da falha no interior do reservatório devem ser menores que as tensões normais nas áreas do reservatório adjacente à falha, ou seja, a falha do reservatório não deve apresentar tensões de tração.

2.4.

Análises numéricas de pressão de injeção em formações rochosas com falhas geológicas

Pelo exposto no item anterior, as análises numéricas resultam em estimativas mais precisas das pressões máximas de injeção (Rutqvist et al., 2007).

Estas estimativas podem ser calculadas usando diferentes técnicas e ferramentas numéricas robustas que ajudam a resolver problemas complexos sem a preocupação do tempo computacional

No caso da análise de fenômenos geomecânicos, os simuladores consideram o estado inicial de tensões em equilíbrio geostático e o efeito da pressão de poro pela aplicação de modelos poro-elastoplásticos.

Existem três abordagens diferentes do acoplamento para a solução de problemas fluxo e problemas geomecânicos (Vidal-Gilbert et al.,2009):

 a) Acoplamento total: o simulador resolve simultaneamente todas as equações que governam o problema hidromecânico. Esta abordagem levão descrições consistentes, mas os mecanismos hidráulicos são frequentemente simplificados em comparação com aproximações de acoplamentos convencionais entre simuladores de fluxo e geomecânica.

- b) Acoplamento parcial iterativo: baseia-se em um acoplamento entre um simulador externo convencional de um reservatório e um simulador geomecânico. As equações de tensões de fluxo são resolvidas separadamente para cada passo de tempo. Esta metodologia se repete até a convergência das tensões e do problema de fluxo.
- c) Acoplamento parcial explícito: apenas o simulador de reservatórios envia informações das poropressões ao simulador geomecânico. Logo, o problema de fluxo não é afetado pela variação de tensões.

Rutqvist et al. (2007) apresentam uma abordagem parcialmente acoplada iterativa para a análise do problema de fluxo de fluido e as análises de reativação das falhas visando estimar a máxima pressão de injeção durante o sequestro de CO₂. A modelagem foi executada no simulador geomecânico acoplado TOUGH-FLAC que vincula um simulador do fluxo multifásico TOUGH2 (Pruess K, 1999) com o software FLAC^{3D} (Itasca Consulting Group,1997). São feitas duas análises numéricas: (i) usando análise contínua deformação-tensão (ii) análise discreta das falhas. As análises do contínuo cisalhamentodeslizamento podem ser conduzidas usando a opção linear elástico do FLAC^{3D}. Neste caso a simulação acoplada TOUGH-FLAC calcula as mudanças nas tensões causadas pelas mudanças das pressões e temperaturas. Na análise discreta ao longo da falha o comportamento mecânico das falhas e zonas de falha pode ser representado no FLAC^{3D}, por interfaces mecânicas especiais, como ilustrado na Figura 2.5a, por uma representação do contínuo equivalente usando elementos sólidos, como ilustrado na Figura 2.5b, ainda pela combinação de interfaces mecânicas e elementos sólidos.



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)

As interfaces usadas para a representação mecânica da falha (Figura 2.5a) utilizam o modelo de atrito de Coulomb e têm propriedades de coesão, atrito, dilatância, rigidez normal e tangencial e resistência à tração. Para simular o acréscimo da permeabilidade ao longo da falha ou efeito do selo na interface, foi necessário adicionar elementos hidráulicos do TOUGH2. Por meio desses elementos a pressão do fluido que atua dentro da falha é fornecida afetando tanto as tensões normais efetivas como a resistência do cisalhamento de acordo com o critério de Mohr-Coulomb.

Uma representação alternativa de falhas é através de um contínuo equivalente usando elementos sólidos do FLAC^{3D}. Desta forma as propriedades da falha podem ser representadas pelo modelo constitutivo simples linear elástico ou complexos modelos elastoplásticos.

Rutqvist et al. (2007) afirmam que a representação de uma falha pode ser mais bem realizada através de elementos de interface, sempre que a espessura da falha seja desprezível em relação às dimensões do problema. No entanto, uma análise empregando elementos de interface no TOUGH-FLAC é bastante complicada por questões de malha e pode gerar dificuldades no acoplamento hidromecânico entre o FLAC^{3D} e o TOUGH2. Essas dificuldades de implementação fizeram com que fossem escolhidos elementos sólidos para simular o comportamento da zona de falha no exemplo bidimensional apresentado na Figura 2.6.



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

Neste modelo, a falha é discretizada por elementos sólidos com anisotropia, comportamento elastoplástico e propriedades hidrológicas. A Figura 2.7 mostra a evolução da pressão de injeção a uma taxa constante de injeção de CO₂. A linha sólida refere-se à resposta da análise com acoplamento hidromecânico e a linha tracejada refere-se à resposta da análise sem acoplamento e sem consideração de reativação de falha.



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

Observa-se que, caso não seja considerada a reativação da falha, a pressão do fluido simulada pode superar rapidamente a tensão litostática. Por outro lado, quando se considera a reativação da falha e a variação da permeabilidade em função das tensões cisalhantes, a pressão de injeção simulada não alcança esta magnitude.

Para o mesmo problema Rutqvist et al. (2007) apresentam uma comparação de resultados (ver Quadro 2.1) entre a simulação numérica com estimativas analíticas simplificadas apresentadas no item 2.2.1.

Quadro 2.1 – Resultados de pressões máximas de injeção (Rutqvist et al., 2007)

Pressão máxima de injeção		
Simulação numérica	Estimativa analítica simplificada a partir de tensões de pré-injeção	Estimativa analítica simplificada incluindo tensão poroelástica
25	20	43

O autor conclui que a resposta analítica pode superestimar ou subestimar a pressão máxima de injeção devido às simplificações assumidas na geometria e as variações de tensões devido às deformações. Nesse contexto, Rutqvist et al., (2007) afirmam que as análises numéricas resultam em uma melhor aproximação da máxima pressão de injeção de CO₂.

Bostrom & Skomedal (2004) propuseram um acoplamento hidromecânico com abordagem explícita entre o simulador standard ECLIPSE[™] (trademark da Shulumberger, 2004) e o simulador Abaqus®, empregados nas análises acopladas de fluxo e nas análises de tensões, respectivamente.

Através de análises locais estudam-se possíveis fraturamentos (cisalhantetração) da formação através e em torno da falha, reativação de falha e mudanças da eficácia do selo dos folhelhos entre as camadas durante o processo de depleção.

Para a análise local, a geometria das camadas do reservatório é tomada de uma seção transversal do modelo 3D do simulador ECLIPSE[™] e transformada em um formato CAD usando um programa tradutor.

No campo investigado por Bostrom & Skomedal (2004), os testes de laboratório indicaram que as falhas são mais rígidas do que a formação rochosa. As falhas do reservatório são modeladas através de uma formulação de interação de contato. Desse modo, não há movimento relativo entre as superfícies, enquanto a pressão pode ser ainda descontínua através da falha. As falhas fora do reservatório não estão incluídas no presente modelo pelas mesmas razões.

Nas camadas do reservatório são usados procedimentos de análises de propagação de poro fluido-tensões e para o folhelho do entorno assume um comportamento não drenado.

Bostrom & Skomedal (2004) calculam as tensões iniciais efetivas no Abaqus® através da sub-rotina SIGINI. Estas tensões iniciais são equilibradas com carregamentos aplicados e condições prescritas. Idealmente, os carregamentos aplicados e as tensões iniciais devem estar equilibrados produzindo deformações nulas. Este estado é obtido por uma análise inicial no Abaqus® restringindo os graus de liberdade dos deslocamentos nos nós e calculando as forças de reação. Essas forças são aplicadas como carregamento nodal no primeiro passo da análise local da secção transversal.

O histórico de depleção da poropressão dentro do reservatório é transferido do modelo do reservatório do ECLIPSE[™] para o Abaqus® utilizando a sub-rotina DISP. A distribuição inicial da porosidade é transferida do Eclipse para o Abaqus® usando a sub-rotina VOIDRI.

Bostrom & Skomedal (2004) também analisaram um segundo modelo de dois segmentos. Este modelo foi simulado utilizando o critério elastoplástico de Mohr-Coulomb. A falha é representada por elementos contínuos e a pressão dentro da falha foi interpolada linearmente a partir da poropressão de cada lado da falha.

Bostrom & Skomedal (2004) afirmam que a ação de tensões de tração e a ruptura por cisalhamento podem ser estudadas em mais detalhe utilizando elementos de interface. Bostrom & Skomedal (2004) afirmam também que o Abaqus® é uma ferramenta adequada para as simulações geomecânicas de reservatório, mostrando-se versátil devido à possibilidade de implementações pelo usuário por meio de sub-rotinas.

Righetto (2012) também propôs uma metodologia com o acoplamento do simulador de reservatório ECLIPSE[™] e o simulador Abaqus®, mas considerando uma abordagem acoplada parcial iterativa de fluxo e tensões. Em seu trabalho, estudou dois tipos de representação da zona de falha semelhantes às adotadas por Bostrom & Skomedal (2004). (i) Com interfaces de contato com emprego da lei de atrito de Coulomb para definir o início do deslocamento relativo entre os planos de contato; (ii) Com elementos sólidos aplicando a técnica de contínuo equivalente com propriedades elastoplásticas, utilizando o critério de Mohr-Coulomb para verificação da ruptura do material

Segundo Righetto (2012) a modelagem estudada adota as seguintes hipóteses, que levam a limitações teórico-numéricas:

- 1. Considera-se um regime extensional composto por falhas normais, estas consideradas selantes ao longo de toda a análise;
- Não se considera o escape de fluido devido ao processo de reativação, apenas a possível reativação da falha devido ao processo de injeção de fluido no reservatório;
- Assume-se que o reservatório e as rochas adjacentes apresentam as mesmas propriedades mecânicas;
- Assume-se que a falha não apresenta resistência coesiva, logo, a resistência é governada apenas pela parcela friccional;
- Assume que as propriedades mecânicas são constantes ao longo de toda a zona de falha.

Na zona de falha foi empregado o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb para representar o comportamento mecânico do material.

Righetto (2012) concluiu que a interface de contato forneceu resultados satisfatórios em relação ao início e propagação do processo de reativação das falhas. No entanto, as interfaces de contato têm limitações na aplicabilidade em meios porosos submetidos a variações da poropressão, já que o critério de deslizamento está baseado na pressão de contato ao invés da tensão normal efetiva. Devido a este tipo de limitações Righetto (2012) e Bostrom (2004) sugerem o uso de elementos de interface desenvolvidos para fins geotécnicos.

Righetto (2012) conclui também que incluir estruturas geológicas complexas, como falhas ou zonas de falhas, é fundamental para a realização de uma modelagem numérica realística na geomecânica do petróleo.

Fouladvand et al. (2009) salientam o potencial do programa Abaqus® para análise de problemas de fluxo-tensões e apresentam a modelagem com abordagem de acoplamento total de uma parte de um reservatório correspondente à área central limitada por duas grandes falhas. Os resultados são enfocados na primeira etapa do processo de produção que corresponde a um período de doze meses em que se verificou a maior atividade sísmica induzida no local. O modelo geológico contém doze camadas, onde três correspondem ao reservatório. Um segundo modelo foi feito considerando uma falha secundaria.

No modelo geomecânico com falha investigado por Fouladvand et al. (2009) as falhas principais são consideradas impermeáveis e o fluido migra ao longo do reservatório na direção paralela à falha. O processo de injeção foi simulado com controle de pressão. A zona de falha foi caracterizada esquematicamente por duas zonas de dano e o núcleo da falha. A geometria da falha foi simplificada devido à variação quase nula das propriedades ao longo do plano de falha. Segundo Fouladvand et al. (2009), esta simplificação foi justificada pela falta de informação sobre o comportamento real da falha, assumindo que o modelo proposto é suficiente para o entendimento dos mecanismos de deformação básica da estrutura geológica, devido aos efeitos da pressão de injeção.

O critério de reativação adotado para a falha, se baseia no critério de Mohr-Coulomb com um ângulo de atrito de 8 graus, um ângulo de dilatância de 6 graus e uma coesão de 1.2 MPa.

Nas simulações apresentadas por Fouladvand et al. (2009) o processo de injeção leva à reativação da falha através da propagação da plasticidade. Outro ponto interessante é que a reativação plástica é obtida para diferentes níveis de permeabilidades em diferentes cenários (falha com alta e baixa permeabilidade).

Fouladvand et al. (2009) concluem que, quando a permeabilidade é baixa na zona de falha, o fluido não pode passar através desta obtendo-se um mecanismo de cisalhamento devido à expansão dos dois lados do reservatório separados pelo plano de falha. Assim, considera-se reativação pela expansão de volume diferencial (Fouladvand et al., 2009). Para elevadas permeabilidades, o fluido pode migrar pelas zonas de falha e ocorre a plastificação nos dois lados do reservatório separados pela falha. Fouladvand et al. (2009) encontram também que o fluxo de fluido dentro da falha leva ao acréscimo de poropressão levando à reativação pelo critério de Mohr-Coulomb. Nos dois casos, a zona dentro da falha apresenta deslocamentos e deformações plásticas. Contudo, para a falha permeável, a plasticidade ocorre também nas rochas adjacentes à falha perto da zona de injeção.

Como visto na literatura, existem diferentes abordagens, técnicas e hipóteses para a análise de problemas de fluxo-tensões em reativação de falhas, bem como diferentes tipos de representação da zona de falha.

Os elementos de interface têm grande potencial para este tipo de aplicação e sua representação é talvez a mais adequada já que a espessura do elemento é desprezível com respeito às dimensões do problema (Rutqvist et al., 2007; Bostrom & Skomedal, 2004; Fouladvand et al., 2009). Assim, nesta dissertação optou-se pela utilização do elemento de interface para a representação da falha e sua formulação será apresentada em detalhe no capítulo 3.