

1

INTRODUÇÃO

1.1.

Descrição do problema

Meios geológicos como maciços rochosos ou reservatórios de petróleo, normalmente, possuem descontinuidades na forma de juntas e falhas. Quando comparadas à rocha ao seu redor, essas descontinuidades apresentam menor resistência ao cisalhamento, resistência a esforços de tração quase nula e permeabilidade distinta. Devido ao seu volume desprezível em relação ao meio geológico, falhas ou juntas podem ser idealizadas como superfícies.

Junta e falha, frequentemente, são diferenciadas pelo movimento relativo de suas faces. Junta é uma descontinuidade em que não houve movimento relativo, enquanto na falha houve.

É comum que entre as faces de uma descontinuidade exista um material de preenchimento. Em uma junta, tal material costuma ser constituído por calcita, dolomita, quartzo ou argilo-minerais ou outros minerais. No caso de uma falha, devido a esforços de cisalhamento, esse material surge do processo de fragmentação e cominuição da rocha ao longo da superfície da falha.

Apesar dessas diferenças entre falha e junta, por questão de simplificação do texto, o termo “falha” será adotado para designar qualquer tipo de descontinuidade.

Falhas desempenham um papel importante em reservatórios de petróleo, sendo um deles na sua formação. A formação de um reservatório obedece a um ciclo composto pelas etapas de origem, migração, acumulação e trapeamento do petróleo.

O petróleo tem origem a partir da deposição conjunta de matéria orgânica e sedimentos em uma bacia sedimentar. Submetido a soterramento, processos térmico e químico, esse material depositado pode formar óleo, gás ou as duas substâncias simultaneamente. A maior ou menor presença de um desses

componentes está ligada à natureza da matéria orgânica depositada (vegetal ou animal).

Uma vez gerado, o petróleo migra do seu local de origem para outra região onde é acumulado. Essa região deve ter características próprias que permitam o petróleo fluir em seu interior (permeabilidade) e, ao mesmo tempo, que possa ser acumulado em espaços vazios (poros). Essa região é o reservatório.

Porosidade e permeabilidade são condições necessárias para se ter um reservatório, mas não são as únicas. Para que o óleo ou gás não migre indefinidamente, é preciso que haja uma barreira (trapa), permitindo a acumulação do óleo ou gás no reservatório. Essas trapas costumam ser classificadas em estratigráficas, estruturais ou mistas. Falhas podem atuar como trapas estruturais à medida que colocam o reservatório em contato com rochas de baixíssima permeabilidade (rocha selante) como mostrado na Figura 1-1(a).

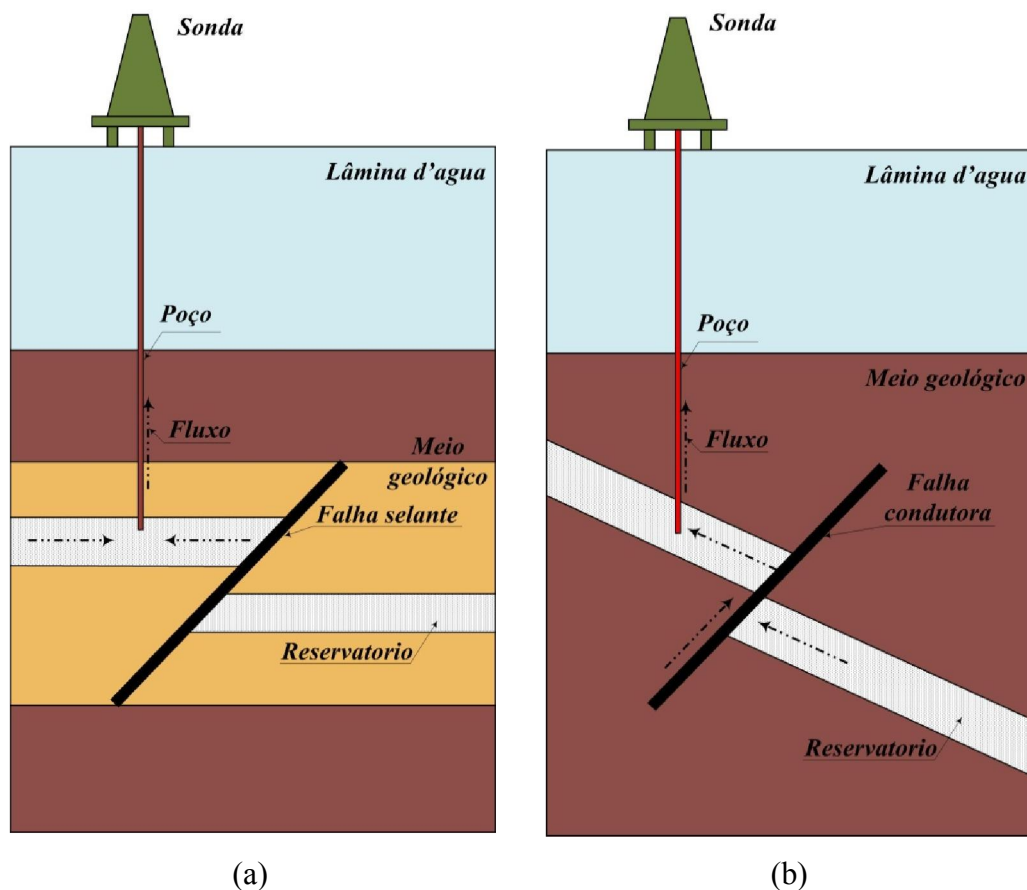


Figura 1-1: Falhas em um reservatório: (a) trapa estrutural, (b) falha condutora de fluxo

Além de trapa estrutural, falhas, por si só, podem atuar como barreiras caso tenham uma permeabilidade muito baixa (falha selante). Falhas com permeabilidade alta também são importantes, principalmente, em reservatórios fechados (com baixa permeabilidade), pois funcionam como regiões condutoras de fluxo conforme mostrado na Figura 1-1(b). A seta tracejada indica o fluxo de fluido. Em muitos casos, a existência de falhas condutoras é o que viabiliza economicamente a produção de um reservatório.

Falhas têm sua origem em processos tectônicos, mas elas podem ter seu comportamento alterado pela ação humana, neste caso, a produção de reservatórios. Devido à produção, um reservatório naturalmente irá apresentar redução de poro-pressão (depleção) ou, em algumas partes, aumento de poro-pressão pelo uso de poços injetores.

Ao reduzir a poro-pressão, parte do carregamento mecânico atuante em um reservatório é transferido do fluido existente nos poros (óleo ou gás) para a matriz rochosa, implicando em uma deformação e alteração do estado de tensão. O carregamento mecânico existente consiste basicamente no peso próprio de todas as camadas acima do reservatório (*overburden*) e das tensões resultantes de esforços tectônicos. Dessa forma, essa relação entre fluxo de fluido e carregamento mecânico tem sido identificada como acoplamento fluido-mecânico.

Diversos fenômenos têm sido relacionados ao acoplamento fluido-mecânico como a compactação e subsidência do reservatório, dependência das propriedades físicas da rocha em relação ao estado de tensão atuante, colapso de revestimento e reativação de falha.

Com referência à reativação, a depleção pode elevar a tensão cisalhante e, em alguns casos, causar movimento relativo das faces. Para falhas selantes, essa movimentação poderia aumentar a sua permeabilidade a ponto de eliminar o aspecto selante, permitindo que o óleo migrasse para uma região fora do reservatório. O aumento de poro-pressão causado por poços injetores também poderia afetar o aspecto de selo, pois ao aumentá-la, a tensão normal sobre a falha diminuiria e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento também.

A questão da integridade da falha tem levado a um planejamento mais cuidadoso da produção de reservatórios, tendo como uma medida a limitação da pressão de produção ou injeção de poços.

Nem sempre a movimentação da falha é algo desfavorável. Zoback (2008) apontou que, em situações em que a tensão normal atuante sobre uma falha condutora tende a fechá-la, o esforço de cisalhamento resultante da movimentação poderia evitar a redução da permeabilidade ao induzir um efeito de dilatância.

Outro aspecto relevante da falha é a sua influência no *layout* e comportamento de poços em um reservatório. Um exemplo disso é a locação de poços produtores próximos a uma falha condutora visando tirar o máximo proveito do fluxo preferencial através da falha. A disposição dos poços torna-se importante, não só pela produção do reservatório, mas pela velocidade e intensidade da depleção que pode impor ao reservatório.

Outro ponto, inevitável algumas vezes, é a perfuração de poços através de falhas. Devido à possibilidade de serem reativadas, falhas podem causar colapso de revestimento por mecanismo de cisalhamento.

A modelagem numérica de fluxo multifásico em reservatórios com falhas e geometrias complexas é um procedimento bem estabelecido na indústria petrolífera, porém o acoplamento fluido-mecânico ainda é pouco abordado. A questão do acoplamento é um assunto relativamente recente na indústria petrolífera, principalmente na modelagem de falhas, permitindo que algumas contribuições ainda sejam feitas.

1.2. Revisão Bibliográfica

Falhas distinguem-se do meio geológico ao seu redor pelas suas propriedades físicas (deformabilidade, resistência, permeabilidade, etc) e, também, por sua forma geométrica mais próxima de um plano ou superfície. Essas características, principalmente a pequena espessura da descontinuidade, impõem algumas dificuldades na modelagem numérica pelo Método de Elementos Finitos (MEF).

Uma das primeiras tentativas para representá-las foi apresentada por Goodman et al (1968). Nesta abordagem, uma junta ou falha é representada por um elemento finito bilinear com espessura nula (Figura 1-2(a), página 28). Idealizando o movimento da junta como deslocamento relativo, uma relação linear elástica entre força de superfície na junta e deslocamento relativo é estabelecida.

Expressando o deslocamento relativo em função dos graus de liberdade de deslocamento do elemento bilinear, Goodman et al forneceram uma matriz de rigidez analítica para este elemento.

Duas aplicações voltadas à reativação de falha em campos da Petrobrás, empregando a formulação proposta por Goodman, foram apresentadas por Pereira et al (2010) e Mendes et al (2010). O objetivo dessas aplicações era estabelecer um limite seguro para a pressão de injeção no reservatório, evitando a perda de integridade da falha.

Zienkiewicz et al (1970) propuseram um elemento de junta com seis nós e espessura finita como mostrado na Figura 1-2(b). Os dois nós localizados na seção média do elemento, por hipótese, permitem que o elemento assuma uma forma curva. Uma característica em comum aos elementos propostos por Goodman et al (1968) e Zienkiewicz et al (1970) é a razão de aspecto (razão entre o comprimento e a espessura do elemento) assumida por eles.

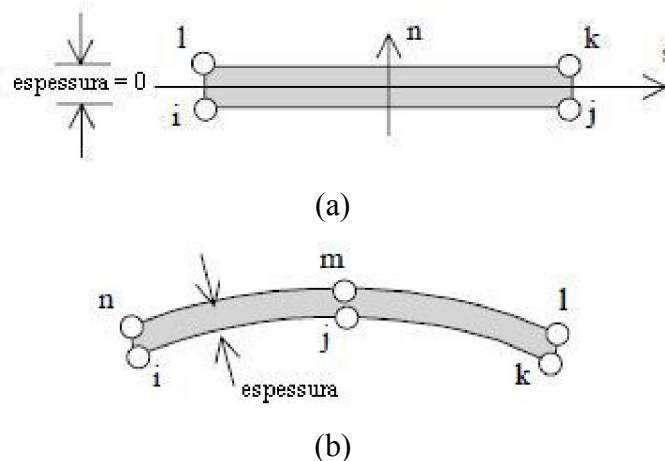


Figura 1-2: Elementos para representação de junta: (a) Goodman, (b) Zienkiewicz (Jing, 2003)

Segundo Jing (2003), outras formulações podem ser empregadas na representação de juntas ou falhas como o *thin layer element* proposto por Desai et al (1984) e o elemento de interface de Katona (1983).

Ponto comum a todos os elementos citados é a tentativa de reproduzir a rápida variação, ou salto de deslocamento, que uma descontinuidade pode provocar em um meio geológico. Outro ponto é que, devido à pequena espessura da descontinuidade, esses elementos exigem um refinamento de malha muito grande na região vizinha à falha.

Além disso, a orientação da descontinuidade força os elementos da malha, em contato ou próximos à descontinuidade, a terem uma de suas faces paralela ou quase paralela a ela. Essa necessidade pode obrigar à construção de diversas malhas até a obtenção de um modelo numérico confiável o que, por vezes, torna esta etapa da modelagem um processo lento e dispendioso.

Nos últimos vinte anos, a área de Mecânica Computacional tem tido especial interesse em modelar, pelo MEF, a ruptura de corpos relacionada aos processos de propagação de fratura e por deformação localizada (banda de cisalhamento). Ligado a esses dois fenômenos está o surgimento de uma descontinuidade no campo de deslocamento e/ou de deformação.

Uma das principais contribuições desta área foi o estabelecimento de formulações de elementos finitos cortados por uma fratura ou banda de cisalhamento que dispensam a discretização dessas feições em uma malha. Uma das intenções ao estabelecer esse tipo de formulação é a eliminação da geração sucessiva de malhas (*remeshing*) de modelagens de propagação de fratura ou de bandas de cisalhamento.

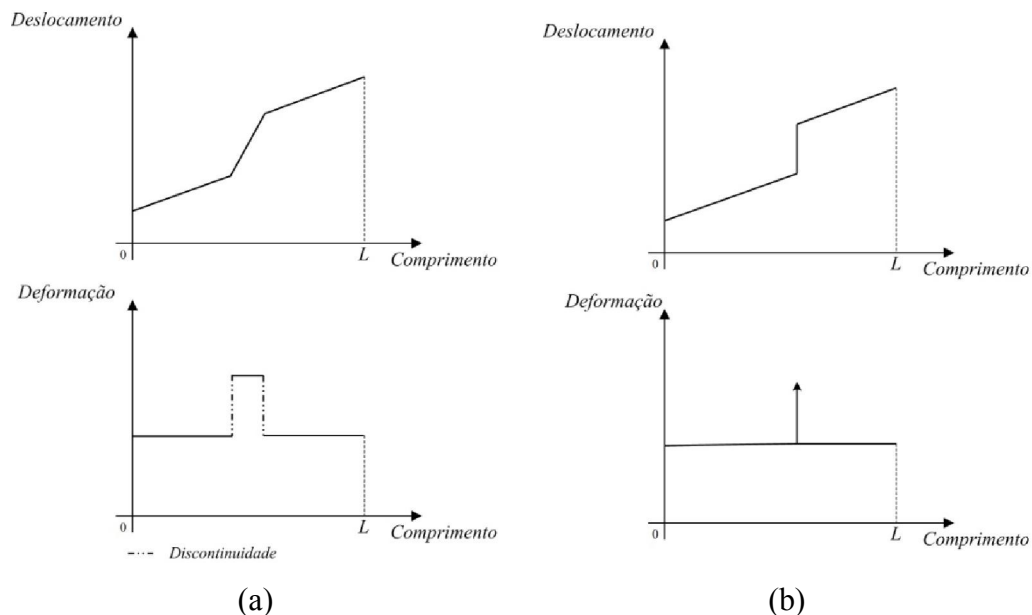


Figura 1-3: Tipos de descontinuidade: (a) fraca, (b) forte

Descontinuidades no campo de deslocamento podem ser interpretadas como deslocamento relativo das faces de uma fratura ou banda, o que é idêntico ao

movimento de uma falha. Dessa forma, essas formulações apresentam um grande potencial na modelagem de falhas.

As referidas formulações podem ser elaboradas de forma a incluir a descontinuidade no campo de deslocamento e/ou de deformação. Se a descontinuidade ocorre apenas no campo de deformação, ela é classificada como fraca. Caso ocorra no campo de deslocamento, a descontinuidade é classificada como forte. A Figura 1-3, página 29, ilustra distribuições de deslocamento e deformação ao longo de um corpo unidimensional, com comprimento L , para os dois tipos de descontinuidade.

Fries e Belytschko (2006), Abdelaziz e Hamouine (2008) e Mohammadi (2008) usaram o termo enriquecido para nomear elementos finitos que de alguma forma incluam descontinuidades nas suas formulações. Essa nomenclatura também será utilizada neste trabalho.

Wan et al (1995) propuseram modelar a ruptura de massas de solo através de um elemento finito bidimensional descontínuo. Caracterizando a superfície de ruptura como uma banda de cisalhamento e introduzindo uma função de interpolação descontínua, ele conseguiu reproduzir um campo de deslocamento não contínuo no interior de um elemento finito. Tal formulação é capaz de descrever tanto o material da banda de cisalhamento como o da região fora dela.

Sluys e Berends (1998) apresentaram a formulação de um elemento finito com uma descontinuidade no campo de deformação. A descontinuidade ou salto de deformação é descrita através de dois parâmetros escalares em conjunto com um vetor que identifica o tipo de movimento da descontinuidade (associados ao modo I ou II de uma fratura). O elemento, de fácil implementação numérica, exige apenas uma modificação na matriz de compatibilidade. Porém, tem como limitação a dificuldade de mensurar os parâmetros experimentalmente devido à falta de significado físico.

Ao longo dos últimos dez anos, formulações de elementos finitos enriquecidos com descontinuidade do tipo forte têm mostrado um rápido desenvolvimento. Dentro dessa linha, identificam-se os elementos *embedded*, *assumed enhanced strain* (AES) e estendido (XFEM).

O ponto fundamental desses elementos é a adoção da hipótese de que o deslocamento é a composição de duas parcelas: uma contínua e outra descontínua. A aproximação do deslocamento pelo MEF passa a empregar dois tipos de graus

de liberdade: um grau referente à parte contínua e outro referente à parte descontínua (salto). A expressão (1.1) mostra a forma geral do deslocamento aproximado, a nível de elemento, dessas formulações.

$$\mathbf{u} \cong \sum_{i=1}^I \mathbf{N}_i \mathbf{d}_i + \sum_{j=1}^J \mathbf{\Phi}_j \mathbf{c}_j \quad (1.1)$$

Onde:

u - vetor de deslocamento;

d - vetor de deslocamento nodal (componente contínua);

c - vetor do grau de liberdade associado ao salto de deslocamento nodal (componente descontínua);

N - função de interpolação do elemento;

Φ - função que interpola o grau de liberdade associado ao salto de deslocamento;

I - número de nós do elemento associados ao deslocamento nodal d;

J - número de nós do elemento associados ao salto de deslocamento c.

A função **Φ** pode assumir diferentes formas para uma mesma formulação de elemento enriquecido, mas, independente da forma, seu papel é sempre distribuir o salto de deslocamento no interior do elemento.

Fries e Belytschko (2006) e Mohammadi (2008) distinguem os elementos enriquecidos em extrínseco e intrínseco. Formulações que fazem uso de graus de liberdade adicionais, como na expressão (1.1), são classificadas por eles como extrínsecas, as formulações que dispensam o uso de graus adicionais são classificadas como intrínsecas.

Baseado no conceito de Partição Unitária de Melenka e Babuska (1996) e admitindo, por hipótese, que o Princípio do Trabalho Virtual (PTV) é capaz de representar o comportamento de um corpo fraturado cujas faces estejam livres de forças de superfície, Black e Belytschko (1999) apresentaram a primeira formulação do XFEM para um corpo bidimensional. Empregando a função *crack tip* para descrever o campo de deslocamento descontínuo, o elemento permitiu modelar a propagação de uma fratura com pequena curvatura dispensando a

geração de novas malhas. Para grandes curvaturas, a resposta do elemento deixava de ser precisa, exigindo a geração de novas malhas.

Mões et al (1999) aprimoraram o XFEM proposto por Black e Belytschko (1999) introduzindo a função *heaviside* para representar o salto de deslocamento ao longo das faces da fratura. A função *crack tip* passou a ser aplicada apenas para reproduzir o deslocamento na ponta da fratura. Essa modificação eliminou a necessidade de geração de novas malhas para fraturas que exibiam grande curvatura.

Cabe mencionar que, no elemento estendido, os graus de liberdade que representam a parcela descontínua ou salto de deslocamento estão localizados exatamente nos nós dos vértices do elemento cortado pela fratura.

Após esse aprimoramento, diversos estudos sobre o elemento estendido foram feitos. Belytschko et al (2001) e Daux (2000) apresentaram técnicas para a modelagem de descontinuidades que se interceptam ou que se dividem. Sukumar (2000) e Gravouil (2002) aplicaram a formulação do XFEM à modelagem tridimensional de fraturas plana e curva respectivamente.

Embora o elemento estendido seja relativamente recente, a bibliografia referente à sua aplicação na modelagem de propagação de fratura é extensa. A capacidade dele em eliminar a discretização da fratura e o processo de geração sucessiva de malhas (*remeshing*) tem incentivado o seu uso em diversas aplicações.

Uma destas aplicações é a modelagem de fratura ou banda de cisalhamento considerando a existência de atrito nas suas faces. A abordagem desse aspecto é relevante para a modelagem de meios geológicos, pois falhas exibem deformabilidade e resistência ao movimento das faces, ou seja, atrito.

Dolbow et al (2001) introduziram no PTV, sem uma demonstração formal, um termo de dissipação de energia para que o XFEM pudesse descrever o atrito resultante do movimento das faces da fratura. Uma lei de contato foi adotada para representar o termo de dissipação e limitar o movimento da fratura. Apesar de a referida lei utilizar parâmetros de rigidez, esses parâmetros são fictícios, pois eles funcionam apenas como parâmetros de penalidade.

Um ponto a ser observado nesta abordagem é que o deslocamento e a força de superfície em cada face da fratura usados na lei de contato são resultados de uma interpolação. O deslocamento na face da fratura é obtido por meio da

interpolação dos graus de liberdade de deslocamento e salto de deslocamento dos nós dos vértices do elemento, enquanto a força de superfície é o resultado da interpolação da tensão no interior do elemento.

Khoei e Nikbakht (2007) aplicaram a formulação de Dolbow et al (2001) a alguns problemas de contato. De modo diferente do que foi empregado por Dolbow et al, o termo de dissipação de energia não é avaliado sobre a face da fratura, mas, sim, em alguns pontos de integração do elemento. Nestes pontos, a matriz constitutiva do elemento é substituída por uma matriz diagonal cujos termos são parâmetros de penalidade. Os resultados apresentados não permitem uma análise profunda, mas sugerem que o tamanho do elemento XFEM interfere sensivelmente na resposta da simulação.

Sanborn e Prévost (2010) modelaram numericamente a ruptura de um talude. Combinaram o uso de um algoritmo que descreve a evolução de uma banda de cisalhamento com o XFEM (sem a função *crack tip*). Adotaram o termo de dissipação de energia proposto por Dolbow et al (2001), porém o termo é avaliado apenas com os valores de salto de deslocamento e força de superfície na fratura. Somente mapas de vetor de deslocamento foram apresentados, mas eles permitem dizer que a combinação dos métodos parece captar bem o surgimento e a evolução da superfície de ruptura.

Siavelis et al (2011) ilustraram a modelagem tridimensional de um *graben* limitado por três falhas submetido a um movimento de extensão. Os autores aplicaram o XFEM na representação de falhas que se interceptam baseando-se na proposta de Daux (2000). Uma lei de contato foi introduzida, mas seu uso ainda é limitado para elementos contendo duas falhas que se cruzam.



Figura 1-4: Posicionamento do grau de liberdade de salto (ponto de colocação): (a) elemento CST, (b) elemento bilinear

Diferentemente do elemento estendido, os elementos *embedded* e AES apresentam mais de uma formulação. Comum a todas elas, idealiza-se que o salto de deslocamento é um grau de liberdade localizado no interior do elemento (ponto de colocação) e com valor uniforme. Esta idealização impõe uma não compatibilidade a esses elementos. A Figura 1-4 mostra a posição do grau de liberdade de salto, indicada por um círculo branco, no interior dos elementos CST e bilinear.

Normalmente, duas equações são estabelecidas nas formulações dos elementos *embedded* e AES. Uma é a equação de equilíbrio, a outra é uma equação que impõe um salto de tensão nulo através das faces da descontinuidade. A segunda equação, citada algumas vezes como equação de continuidade de tensão, diz que as tensões à direita e à esquerda da descontinuidade são iguais, garantindo o equilíbrio mecânico na descontinuidade.

A forma com que essas duas equações são aproximadas pelo MEF é a principal diferença entre os elementos *embedded* e AES. O elemento AES, apresentado por Simo e Rifai (1993), utiliza Petrov-Galerkin para a aproximação enquanto o elemento *embedded* costuma usar Galerkin. No AES, a função relacionada ao resíduo é diferente apenas para o salto, sendo definida de modo a garantir que o elemento passe pelo *patch test*. Em geral, essa função depende do modelo constitutivo da descontinuidade (Regueiro e Borja, 2001).

Borja (2000) apresentou a formulação de um elemento *embedded* para ser aplicado à modelagem de ruptura de corpos com a presença de uma banda de cisalhamento. Associando a equação da continuidade de tensão ao processo de plastificação do corpo, ele relacionou o grau de liberdade de salto ao parâmetro de plastificação, eliminando-o da matriz de rigidez do elemento. O elemento mostrou-se capaz de representar a ruptura, porém, em alguns casos, problemas de mau condicionamento foram observados.

Manzoli e Shing (2006) usaram a função *heaviside* para interpolar o salto de deslocamento do interior do elemento *embedded* para os seus nós, transformando o salto em um movimento de corpo rígido. A transformação permitiu definir o deslocamento como a soma de duas parcelas: uma relativa ao deslocamento fora da descontinuidade e outra ligada ao movimento de corpo rígido. Usando esse artifício, a matriz de rigidez do elemento é montada de um modo relativamente

simples. Além disso, os autores incluíram um salto de deslocamento não uniforme no interior do elemento.

Borja (2008) comparou as respostas obtidas pelos elementos *embedded* (Borja, 2000) e o XFEM (Dolbow, 2001) na modelagem de corpos com fraturas pré-existentes com atrito nas faces. Ele afirmou que o XFEM, sem o uso da função *crack tip*, produz um efeito de *locking* na ponta da fratura. Ao considerar a função *crack tip*, os dois elementos apresentam respostas semelhantes.

Reguero e Borja (1999) e Reguero e Borja (2001) introduziram o modelo constitutivo de Drucker-Prager não associado no AES. O objetivo deles era demonstrar a habilidade do elemento na modelagem da ruptura de um talude.

Considerando que parâmetros de resistência podem ter uma variação durante o regime de amolecimento, Foster et al (2007) definiram a coesão e o ângulo de atrito como dependentes do salto de deslocamento. Usando o elemento AES, observaram que a introdução de uma lei deste tipo, por vezes, pode provocar efeito de *locking*.

Reguero e Yu (2010) fizeram uma comparação entre os elementos AES, *cohesive* com comportamento rígido-plástico (CRP) e elasto-plástico (CEP). Submetendo um elemento com uma fratura pré-existente a um carregamento de compressão, observaram que as respostas dos elementos CRP e AES são muito próximas antes do deslizamento das faces da fratura. Tratando a rigidez da fratura como um parâmetro de penalidade no CEP, viram que a qualidade da resposta depende dos valores de penalidade adotados.

Recentemente, alguns trabalhos com elementos enriquecidos envolvendo acoplamento fluido-mecânico têm sido divulgados. Callari et al (2010) usaram o AES para modelar a propagação de uma banda de cisalhamento em um meio poroso parcialmente saturado. Assumiram que, através da banda, a poro-pressão tem uma distribuição contínua, enquanto o deslocamento e o fluxo não. Idêntico à formulação mecânica, não existe diferença entre o material da descontinuidade e o da região fora dela.

Khoei e Haghighat (2011) ilustraram o uso do XFEM, sem a função *crack tip*, na modelagem de uma fundação e de uma barragem assentados sobre um solo heterogêneo. O XFEM foi aplicado para representar a mudança de estrato de solo no interior do elemento. Apesar de o XFEM ter sido aplicado, nenhum termo na

formulação que caracterizasse um salto de deslocamento ou poro-pressão exatamente na interface dos dois materiais foi introduzido.

Lamb et al (2010) combinaram o XFEM com o método de dupla permeabilidade (MDP) para a modelagem do acoplamento fluido-mecânico em um meio poroso fraturado. A intenção em utilizar o MDP é determinar o fluxo em um meio poroso fraturado através de um meio equivalente. A combinação não introduz uma descontinuidade no campo de poro-pressão nem a parcela de acoplamento na fratura.

de Borst et al (2008) aplicaram o XFEM na modelagem do acoplamento fluido-mecânico em um meio fraturado. Introduziram o termo de acoplamento fluido-mecânico na fratura admitindo a existência de salto no campo de deslocamento e a continuidade do campo de poro-pressão através da fratura. Somente o fluxo na direção tangencial à descontinuidade é representado. Por hipótese, assumiram que o fluxo na direção normal à fratura é descontínuo. Segundo eles, a descontinuidade ocorre porque parte do fluido que entra em uma face da fratura é conduzido ao longo da direção tangencial.

Dois exemplos foram apresentados: um considerando a fratura vazia e outra com um material poroso. Referente à fratura com preenchimento, o exemplo ilustra a propagação de uma fratura (pré-existente) em um corpo bidimensional retangular tracionado no topo e na base. Exceto por uma curva de carga versus deslocamento, os resultados são limitados a mapas de poro-pressão e fluxo. Os resultados não permitem afirmar se a formulação proposta é eficiente ou não na representação desse tipo de problema.

O trabalho de de Borst et al (2008) é o que mais se aproxima da proposição desta tese. Considerando isso, dois pontos importantes devem ser ressaltados a respeito desta formulação. O fluxo tangencial à fratura é descrito em parte por derivadas de segunda ordem. Em termos de formulação matricial, a parcela de derivada segunda está associada à matriz de permeabilidade da fratura. De acordo com os autores, obrigatoriamente o elemento cortado pela fratura deve ter uma função de interpolação quadrática. Caso isso não seja obedecido, o fluxo tangencial na fratura não é descrito corretamente comprometendo o termo de acoplamento fluido-mecânico na fratura.

Nenhuma menção é feita pelos autores a respeito do procedimento de integração do fluxo tangencial ao longo da fratura. Para integrar este termo,

acredita-se que um procedimento similar ao adotado por Dolbow et al (2001) tenha sido utilizado, ou seja, a poro-pressão na descontinuidade talvez seja um valor interpolado.

O segundo ponto a ser observado na formulação é que, ao deixar de abordar o fluxo na descontinuidade ao longo da direção normal, dependendo do contraste de permeabilidade entre a fratura e o meio poroso vizinho, um possível salto de poro-pressão não é contabilizado (hipótese da continuidade de poro-pressão). Lembrando que, em uma condição de acoplamento fluido-mecânico, uma variação de poro-pressão implica em uma variação de tensão, a ausência do salto pode reduzir o esforço aplicado sobre a fratura. Essa redução de esforço pode conduzir a uma previsão menor da deformação da fratura.

Os elementos *embedded* e AES têm mostrado um bom desempenho quando aplicados à modelagem de bandas de cisalhamento. Uma característica comum a essas aplicações é o uso de uma única lei constitutiva para descrever a descontinuidade física e a região fora dela. Manzoli e Shing (2006) sugeriram o uso de uma lei de interface para diferenciar o material das duas regiões em seu trabalho, mas esse procedimento não foi verificado por eles.

A respeito da questão de não compatibilidade, o elemento AES procura minimizar essa característica através da aproximação por Petrov-Galerkin. Contudo, o estabelecimento da função de ponderação ligado ao salto pode ser trabalhoso, pois ela depende, em parte, do modelo constitutivo da descontinuidade. Mesmo não garantindo a compatibilidade em relação ao salto de deslocamento, esses elementos têm obtido uma boa representação cinemática de corpos em processos de ruptura.

Computacionalmente, os elementos *embedded* e AES têm como atrativo a possibilidade de eliminar a contribuição do grau de liberdade de salto da matriz de rigidez global por condensação estática ou associando o salto a algum parâmetro de plastificação.

Quanto ao elemento estendido, a habilidade mais notável é a sua capacidade em representar a propagação de uma fratura. O uso de uma lei de contato é uma alternativa para descrever a fratura com um material diferente do meio ao seu redor. Porém, esse método só é factível mediante a interpolação do deslocamento e da tensão na fratura. Até o momento, não é possível afirmar algo sobre a eficiência desse procedimento.

Diferentes observações podem ser feitas a respeito dos elementos *embedded*, AES e XFEM. No contexto da modelagem de falhas, o aspecto que mais desperta atenção é a limitação para introduzir um modelo constitutivo próprio para a descontinuidade.

1.3. Objetivo

Falhas têm grande influência em reservatórios de petróleo, pois diminuem a sua resistência aos esforços atuantes e por condicionarem o fluxo de fluido. Ao usar o Método de Elementos Finitos (MEF) para representá-las, uma dificuldade com que se depara é a ordem de grandeza entre a espessura da falha (escala de mm a dezenas de m) e as dimensões do reservatório (escala de km). Essa diferença exige a geração de malhas muito refinadas, principalmente na região próxima à falha, até a obtenção de uma resposta confiável do modelo numérico. Vista como uma etapa da modelagem numérica, o refinamento de malha pode se tornar uma tarefa repetitiva e onerosa consumindo um tempo significativo na construção de um modelo numérico. Ao mesmo tempo, a discretização da descontinuidade com elementos muito pequenos, quando comparados ao restante do modelo, pode conduzir a um aumento excessivo no tempo de simulação e, por vezes, de mau condicionamento.

Atendo-se a essa dificuldade, esta tese propõe estender a formulação mecânica do elemento bidimensional cortado por uma descontinuidade (Wan et al, 1995) para o fluxo de fluido e o acoplamento fluido-mecânico. Devido ao contraste de propriedades físicas com o meio geológico, falhas podem apresentar uma variação brusca de poro-pressão em uma direção (salto) e outra suave na direção perpendicular à primeira.

A formulação de elemento finito apresentado (elemento enriquecido) trata apenas de meios porosos com um comportamento linear elástico e saturado por um único fluido. De modo a representar este meio e o acoplamento fluido-mecânico, a formulação desenvolvida segue as linhas da teoria de Biot. Nenhum efeito de propagação é abordado, a formulação visa aplicações em reservatórios com falhas pré-existentes.

Dentro do contexto de formulações de elementos finitos com descontinuidade do tipo forte considerando o acoplamento fluido-mecânico, a

primeira contribuição desta tese é a descrição de um campo de poro-pressão descontínuo através de uma descontinuidade física (banda de cisalhamento, falha ou fratura). A formulação do elemento finito enriquecido captura adequadamente o salto de poro-pressão associado ao valor da espessura e da permeabilidade normal à descontinuidade física. A espessura e a permeabilidade normal da descontinuidade física são efetivamente parâmetros físicos introduzidos no elemento, permitindo que descontinuidades físicas com pequenos valores de permeabilidade normal (próximos aos valores de permeabilidade do meio poroso ao redor) ou praticamente impermeáveis sejam representadas. Até o momento, as formulações de elementos finitos com descontinuidade do tipo forte não descrevem o salto de poro-pressão desta forma.

Além do fluxo na direção normal à descontinuidade, o elemento finito enriquecido admite a representação do fluxo tangencial utilizando uma interpolação linear ou quadrática de poro-pressão. Especificamente para a questão do acoplamento fluido-mecânico, a abordagem dada ao fluxo normal e tangencial à descontinuidade pelo elemento enriquecido o difere das poucas formulações de elemento finito com descontinuidade forte que tratam do acoplamento em dois aspectos.

O primeiro aspecto é que, ao descrever o fluxo normal à descontinuidade física, um salto de poro-pressão passa a existir através da descontinuidade. Lembrando que, em uma condição de acoplamento fluido-mecânico, uma variação de poro-pressão implica em uma variação de tensão, a existência do salto pode induzir a um aumento no esforço aplicado sobre a fratura. de Borst et al (2008) não consideraram essa condição, o que pode conduzir a uma previsão de deformação na fratura ou na descontinuidade física menor.

Ao descrever o fluxo tangencial à descontinuidade física com derivadas de primeira ordem, o segundo aspecto é que não há possibilidade do fluxo tangencial desaparecer da equação de fluxo acoplada visto que a menor ordem de interpolação para um elemento é linear. Essa aproximação permite o uso de elementos com função de interpolação linear ou quadrática.

Compreendendo que a geração e o refinamento de malha podem ser processos repetitivos e demorados, este trabalho tem como segunda contribuição o uso do elemento enriquecido como um instrumento ou ferramenta numérica para facilitar e agilizar a construção de malhas de modelos numéricos de reservatório.

Ao introduzir o elemento enriquecido no modelo numérico, retira-se do pré-processador a tarefa de discretizar a descontinuidade física permitindo o uso de qualquer malha de elementos finitos para a representação do reservatório. A eliminação desta etapa é o que confere maior facilidade e agilidade à construção do modelo.

1.4. Organização do texto

O texto da tese é dividido em seis capítulos e quatro apêndices. Os capítulos são colocados em uma sequência que segue o estabelecimento da formulação do elemento enriquecido com acoplamento fluido-mecânico. O primeiro capítulo faz uma introdução, nele é apresentada a descrição do problema físico, revisão bibliográfica a respeito de elementos com descontinuidade do tipo forte e o objetivo da tese.

Montado um panorama das formulações de elemento finito com descontinuidade do tipo forte existentes, o segundo capítulo descreve três formulações mecânicas de elementos finitos com descontinuidade do tipo forte com possível aplicação na modelagem de meios geológicos. Procura-se apontar as hipóteses básicas e alguns aspectos das formulações. Uma destas formulações é discutida com maior detalhe, pois ela é o ponto de partida para a extensão da formulação de equilíbrio mecânico para o acoplamento fluido-mecânico. Trata-se da formulação proposta por Wan et al (1995) que será identificada nesta tese por elemento enriquecido.

A adaptação da formulação mecânica do elemento enriquecido para o fluxo de fluido é estabelecida no terceiro capítulo. Neste capítulo são definidas as hipóteses a respeito do fluxo de fluido através da descontinuidade física e a aproximação da equação de fluxo de fluido pelo Método de Elementos Finitos.

Conhecidas as formulações de equilíbrio mecânico e fluxo de fluido para o elemento enriquecido, a formulação do elemento enriquecido para acoplamento fluido-mecânico é abordada no quarto capítulo.

Uma série de exemplos foi conduzida com a finalidade de avaliar o elemento enriquecido quanto à sua capacidade em reproduzir a resposta de um

modelo numérico em que a descontinuidade é discretizada. Descritos no capítulo 5, estes exemplos fornecem um instrumento para análise e delineamento das habilidades da formulação do elemento enriquecido. Com os exemplos discutidos do quinto capítulo, considerações finais a respeito da formulação do elemento enriquecido são apresentadas no sexto capítulo.

O texto da tese é finalizado com a inclusão de quatro apêndices. O primeiro apêndice é uma avaliação complementar do elemento enriquecido quanto ao refinamento de malha. Comentários a respeito da função de interpolação associada aos graus de liberdade adicionais de salto de deslocamento são feitos no segundo apêndice. O terceiro apêndice mostra a dedução da solução analítica utilizada nesta tese para a avaliação do elemento enriquecido. O último apêndice mostra a relação de propriedades físicas da descontinuidade física e os elementos do ABAQUS.