

1.

Introdução

1.1.

Considerações Gerais

Mesmo antes da introdução das disciplinas de mecânicas dos solos, rochas e geologia é sabidamente conhecido o efeito acoplado entre os meios porosos, meios fraturados, meios porosos-fraturados com o(s) fluido(s) que preenchem esses meios, como relatado nos trabalhos clássicos de Terzaghi (1943) e Biot (1941), entre outros. O acoplamento fluido-mecânico como é conhecido o efeito tanto do meio poroso no meio fluido, quanto do efeito do meio fluido no meio poroso, é utilizado em diversos campos de aplicação da Engenharia. Tamanha a importância tornou-se discussão de inúmeros trabalhos em anos anteriores e em anos recentes. (Schrefler et al, 1990; White e Borja, 2008; Kim, 2010).

No campo da engenharia mecânica grande esforço tem sido colocado no acoplamento termo-mecânico, enquanto que na engenharia ambiental um tema bastante recente de estudo é o sequestro de CO₂ através da injeção desse gás em meios porosos fraturados ou não, sendo o acoplamento mecânico e de fluxo de grande importância (Morris, 2009a,b, apud Kim, 2010).

Mais precisamente no campo de aplicação da engenharia para a produção de petróleo, o acoplamento fluido-mecânico tem se mostrado como explicação de diversos fenômenos ocorridos na exploração e produção de reservatórios de petróleo. Um caso emblematicamente sempre abordado em diversas revisões sobre o tema se refere ao campo de petróleo Ekofisk na Noruega, em que o leito marinho sofreu uma importante subsidência sob o efeito do processo de extração de fluido do reservatório ao ponto de comprometer severamente vários poços de produção, levando a grandes gastos no reparo e prevenção dos danos causados (Falcão, 2002; Fjaer et al, 2008).

Ainda no campo de extração de petróleo, outros exemplos de aplicação da análise acoplada fluido-mecânica são encontrados nos casos de estabilidade de poços de petróleo, reativação de falhas e/ou zonas de falhas, fraturamento hidráulico, produção de sólidos, efeitos de compactação do reservatório na curva de produção de petróleo, relações tensão-permeabilidade-deformação, etc.

As análises dos fenômenos existentes no meio poroso tem se tornado cada vez mais robustas e elaboradas na questão de se acoplar tais fenômenos, e ainda em melhores e eficientes alternativas para solução dos sistemas que surgem desse acoplamento. Sendo esta uma área extensa já estudada, mas ainda com vasto campo de estudo por ser abordado.

Como relatado anteriormente, o meio poroso pode estar preenchido por um ou mais fluidos. O presente trabalho aborda a condição em que o meio poroso é constituído pela fase sólida e outras duas fases fluidas, caracterizando fluxo bifásico com acoplamento mecânico em meios geológicos.

Diversos têm sido os estudos da condição de fluxo bifásico acoplado com o problema mecânico, com diversos enfoques, desde as condições de estabilidade e convergência, eficiência computacional, até a melhor representação dos diversos fenômenos físicos presentes.

Quando se estuda meios geológicos deve se ter primeiramente em mente que esses meios são heterogêneos em menor ou maior grau, e que possuem geometrias variadas e complexas. Assim métodos eficientes devem ser buscados para análise de fluxo bifásico acoplado para uma melhor representação desses meios e dos fenômenos físicos presentes.

Diversos autores, (Wan, 2002, Wang et al 2004, Bianco et al 2001, Han et al 2002 e 2004, Morita et al 1998, Skjaertein et al 1997) , têm relatado a influência do fluxo bifásico na produção de sólidos, seja pela redução da permeabilidade relativa, pelo impacto na tensão capilar do meio, ou pelo efeito do surgimento da água no poço – “water breakthrough”.

Han et al (2004) apresentam uma análise do processo de produção de areia quando do surgimento de água no poço utilizando modelo analítico. Estes autores verificaram o efeito da variação da saturação na zona de ruptura do meio poroso e

na pressão capilar existente, reforçando a necessidade de análise bifásica para esse caso.

No estudo de fluxo bifásico e transporte de substâncias em meios porosos, o equacionamento matemático do fenômeno físico pode conduzir a equações que requerem métodos específicos de solução para eficiente captura da solução. É o caso dos problemas descritos por equações hiperbólicas, em que a resposta pode apresentar ondas de choque e/ou rarefação.

Para geometrias complexas e materiais heterogêneos são indicados normalmente métodos numéricos do tipo método das diferenças finitas (MDF), volumes finitos (MVF) e elementos finitos (MEF). Cada um com sua peculiaridade de formulação e adequação ao problema proposto.

Helmig (1997) e Helmig et al (1998) apresentam um extenso estudo comparativo sobre a capacidade desses métodos na solução de problemas de fluxo multifásico, ressaltando que o MEF clássico possui dificuldades na captura de ondas de choque e além de ser localmente não conservativo. Estes autores destacam ainda que o MVF é localmente conservativo e que a captura de ondas de choque é obtida empregando-se esquemas adequados de interpolação upwind.

Alvarenga (2008), Cordazzo (2006) e Gomes (2009) apresentam formulações via MVF para o problema de fluxo bifásico em meios porosos. Alvarenga (2008) relata os diversos tipos de MVF, baseado no vértice, baricentro e vértice, e aresta. A interpolação de propriedades no caso de formulação baseada no vértice e interpolação das variáveis no caso das outras formulações trazem em si um certo grau de aproximação do meio poroso em caso heterogêneo. Cordazzo (2006) e Gomes (2009) apresentam formulação em MVF baseado no vértice.

Alvarenga (2008) e Cordazzo (2006) apresentam uma formulação em que se emprega um esquema de upwind de primeira ordem para captura de ondas de choque enquanto Gomes (2009) apresenta uma formulação em que o esquema de captura de frente de saturação se baseia na interpolação espacial da mobilidade de fluxo entre elementos vizinhos. Cordazzo (2006) levanta a desvantagem do MVF com relação à interpolação da porosidade para o novo elemento construído baseado no vértice apresentando diversas alternativas para essa interpolação.

Outro método bastante empregado na solução do problema de fluxo bifásico é o método dos elementos finitos descontínuos (MEFD) que conjuga qualidades do MEF com as do MVF. Aplicações do MEFD têm sido apresentadas para fluxo bifásico em diversos trabalhos (Klieber e Rivière 2006; Hoteit et al 2008; Hesthaven e Warburton 2000; Li 2006, entre outros), entretanto, o autor não encontrou na literatura pesquisada, a solução acoplada do problema mecânico e fluxo bifásico utilizando esse método.

O MEFD possui a vantagem de utilizar a mesma malha de elementos do MEF sem necessidade de passos de construção de uma malha de volumes finitos, de se poder empregar esquemas de interpolação para captura de frente de saturação utilizados no MVF, mantendo-se o balanço de massa ao nível de elemento.

Para análise de fluxo bifásico com acoplamento mecânico têm sido apresentados diversos métodos na literatura com a finalidade de melhorar a eficiência na representação do fenômeno físico, ou na definição do método numérico mais adequado para a solução do fenômeno. A solução do problema acoplado pode ser tratada basicamente por duas alternativas: solucionando o problema de fluxo conjuntamente com o equilíbrio mecânico, conhecido como acoplamento direto ou através de processos iterativos entre o problema de fluxo e o equilíbrio mecânico.

Lewis et al (1991) apresentaram uma avaliação desses dois tipos de acoplamento para o caso de fluxo monofásico indicando as situações mais favoráveis para a aplicação de uma e de outra alternativa.

Classicamente nas aplicações em engenharia de reservatórios de petróleo o método de acoplamento seqüencial da solução do problema onde resolve-se os problemas em separado em que o problema mecânico é solucionado após a solução do problema de fluxo, definindo uma única via de acoplamento, é chamado de *one-way coupling*.

Embora não seja um processo totalmente acoplado quando se resolve todos os problemas em conjunto, os métodos iterativos são considerados acoplados na

tentativa de se obter a melhor resposta dos sistemas em conjunto, são diversos os trabalhos em que utilizam essa alternativa (Muller, 2007 e Frydman, 1996).

Muller (2007) aponta uma avaliação do método totalmente acoplado com o método iterativo com relação ao processamento, indicando que o método iterativo pode apresentar melhor desempenho computacional que o método totalmente acoplado. Muller ainda ressalta as vantagens de se utilizar o método iterativo com relação à aplicação de condição de contorno.

Kim (2010) analisa as diversas formas de acoplamentos entre as equações de fluxo multifásico e o equilíbrio mecânico de maneira sequencial atentando para aspectos de estabilidade e convergência de diversos métodos.

Dentre as formulações para representação de fluxo bifásico, duas formas de equacionamento podem ser encontradas: a formulação parabólica, em que as equações são postas diretamente em termos de duas incógnitas sem avaliação intermediária da velocidade de fluxo e a formulação hiperbólica, em que as equações são postas em esquema sequencial na definição de uma equação da pressão, pós-processamento da velocidade e solução da equação da saturação.

De forma clara, tem-se que quanto melhor avaliada a velocidade de fluxo no passo intermediário melhor a avaliação da equação da saturação e consequentemente de todo o sistema. Alcoforado (2007) apresenta uma análise da utilização de diversas alternativas para o pós-processamento da velocidade: primeiramente partindo da aplicação direta da lei de Darcy, bem como um pós-processamento da velocidade posto como um problema de ponderação da lei de Darcy com o equilíbrio de massa, utilizando para isso elementos finitos de Raviart-Thomas de ordem RT_0 . Nesse mesmo trabalho, Alcoforado (2007) apresenta uma formulação em que o problema mecânico é posto como uma solução analítica da equação de variação da porosidade de forma simplificada.

1.2.

Objetivos da Pesquisa

Na seção anterior tentou-se focar em três aspectos distintos encontrados na solução de problemas de fluxo bifásico acoplado com o problema mecânico: os diferentes métodos para captura de ondas de choque, as diversas formulações e resoluções dos sistemas de equação, e a avaliação da velocidade no caso de formulação hiperbólica. Dessa forma, essa tese está direcionada a esses três aspectos de tal forma a ter os seguintes objetivos principais:

- Analisar numericamente, em meios contínuos, os mecanismos envolvidos em condições bifásicas de fluxo. Especificamente quando de propagação de ondas de choque e aplicabilidade em meios heterogêneos.
- Implementar uma formulação numérica suficientemente eficaz para solução do problema de fluxo bifásico em meios heterogêneos ou estratificados e com acoplamento geomecânico. Para esse fim pesquisou-se alternativas para obtenção do campo de velocidade e aplicação do MEFD como alternativa ao MVF na solução do problema de fluxo.
- Apresentar uma formulação numérica em que o MEFD é utilizado na solução do problema de fluxo bifásico com o equilíbrio mecânico resolvido pelo MEF clássico.

Dados os condicionantes das diversas alternativas de formulação, métodos de solução, e melhor aplicabilidade a meios heterogêneos, o presente trabalho não tem como objetivo esgotar todas as alternativas encontradas na literatura, mas sim uma revisão e implementação de alguns desses métodos para aplicação em engenharia de petróleo.

Por não ser o foco do trabalho, não são abordados em profundidade aspectos de estabilidade e convergência dos diversos métodos, mas uma revisão é apresentada em Kim (2010).

Esse trabalho segue a linha de pesquisa apresentada por Muller (2007), que direcionou os desafios abordados no atual trabalho, a implementação computacional também se baseou no estudo já realizado de tal forma a dar continuidade e ainda explorar toda a implementação elaborada por Muller (2007).

1.3.

Organização do Presente Trabalho

Inicialmente, neste capítulo introdutório faz-se uma breve descrição do objeto de pesquisa, destacando sua pertinência e relevância e ainda colocando os objetivos a serem alcançados. Os capítulos seguintes estão assim organizados:

- O capítulo 2 apresenta uma revisão das formulações empregadas no estudo de fluxo bifásico acoplado considerando as formulações de fluxo e de equilíbrio mecânico para representação matemática do meio poroso.
- No capítulo 3 são apresentados vários tratamentos numéricos das formulações das equações governantes para os casos acoplados fluxo-deformação em condição de fluxo bifásico apresentadas no capítulo 2. Partindo-se de uma formulação em elementos finitos, em sequência uma formulação em volumes finitos e por fim uma formulação em elementos finitos descontínuos para a equação da saturação;
- O capítulo 4 apresenta alguns exemplos utilizados para verificação das formulações e implementações realizadas;
- O capítulo 5 apresenta alguns comentários e conclusões das análises realizadas bem como propostas para trabalhos futuros.