

5.

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

5.1.

Conclusões

Uma intensa pesquisa dos métodos de solução do problema de comportamento parabólico-hiperbólico de fluxo bifásico foi realizada, dadas as instabilidades encontradas pelos métodos clássicos de solução, como visto na literatura. Alternativas foram pesquisadas e implementadas como afirmam os exemplos realizados, as soluções se mostram adequadas sob o ponto de vista da engenharia, cumprindo um dos objetivos delineados na introdução desse trabalho.

Uma etapa inicial realizada foi a tentativa de se obter via MEF clássico, o perfil de saturação para o caso de pressão capilar nula, o que não foi eficiente, pois o MEF clássico possui restrições quando o comportamento das equações governantes se torna hiperbólica, o que já é referido na literatura no tema. Dada essa condição, buscou-se outros métodos mais eficientes para a captura da frente de saturação quando do caso de pressão capilar nula.

Considerando primeiramente a implementação disponível para o MEF clássico, Muller (2007), buscou-se como segunda alternativa, o MVF combinado com MEF clássico para aproveitamento da implementação realizada. Nesse método o sistema de equações é posto como do tipo hiperbólico, como visto no capítulo 2, em que o sistema consiste de uma equação da pressão, resolvida pelo MEF clássico, um pós-processamento da velocidade através de um dos métodos descrito no capítulo 3, seção 3.2.2, e a solução da equação da saturação via MVF, sendo a equação da pressão discretizada temporalmente pelo método implícito e a equação da saturação pelo método explícito.

Os resultados encontrados utilizando essa segunda alternativa se mostram adequados na captura da frente de saturação, bem como quando do acoplamento

mecânico, entretanto esse método requer uma aproximação da porosidade para meios heterogêneos, já que a implementação realizada é a de elementos baseados no vértice, o que traz uma aproximação da heterogeneidade inicial do meio geológico. Outra desvantagem do MVF é a necessidade da construção de uma malha de volumes finitos sobre a malha de elementos finitos.

Ainda dentro dessa alternativa pesquisou-se alguns métodos de obtenção da velocidade no passo intermediário. A primeira como interpolação por elemento diretamente do campo de pressões obtido no passo anterior, a segunda como a proposição de Malta et al (2001) e uma terceira interpolação por elemento utilizando elementos finitos de mais baixa ordem de Raviart-Thomas RT_0 .

As vantagens e desvantagens de cada um desses são também encontradas na literatura, a proposição por elemento é reconhecidamente um procedimento mais rápido em termos de processamento, a formulação proposta por Malta et al possui a vantagem de colocar as velocidades com mesmo grau de interpolação das pressões, mas apresenta como desvantagem a dependência do parâmetro δ . A utilização de elementos de RT_0 possui como característica a interpolação na aresta do elemento contando com a continuidade da velocidade no sentido normal e a possibilidade de descontinuidade da velocidade no sentido normal a interface entre elementos, característica essa mais próxima do que se deve ter em meios heterogêneos.

Os exemplos utilizados para validação desses três métodos foram extraídos da literatura para o caso de fluxo monofásico. Ainda assim foi elaborada uma solução analítica, baseada na solução do problema de adensamento unidimensional para a obtenção da velocidade e da porosidade, os resultados encontrados validam as implementações realizadas.

Aproveitando a estrutura implementada, uma terceira alternativa foi avaliada: a utilização do MEFD que agrega vantagens do MEF clássico com as vantagens do MVF, a saber: possibilidade de utilização da mesma estrutura de malha do MEF sem interpolação de propriedades e aplicação de interpolação espacial para a captura de frente de saturação do MVF, embora com custo computacional maior. Os exemplos analisados e os resultados encontrados sugerem uma boa aproximação com os revistos na literatura.

Nos parágrafos anteriores foram abordados os aspectos referentes ao problema de fluxo bifásico, o problema mecânico implementado, segue o proposto por Muller (2007), posto em forma de programação matemática e apresentado também nesse trabalho. Foram analisados dois casos de acoplamento fluido mecânico, um para validação do acoplamento utilizando o pseudo-adsensamento unidimensional, com a imposição da saturação de água unitária ($S_w=1$) e um exemplo de um reservatório preenchido com óleo e com carregamento no topo e injeção de água em uma das faces como fim de avaliação dos campos de saturação e pressão nos campo de deslocamento sendo que a utilização do procedimento *staggered* para acoplamento fluido mecânico se mostrou eficiente.

Nas diversas formulações os termos difusivos devido a pressão capilar existente são considerados como constantes em cada elemento, entretanto como discutido em Helmig (1998), essa pode não ser a melhor alternativa dependendo do problema.

Esses exemplos sugerem que a implementação realizada apresenta-se como uma boa ferramenta para aplicação a casos reais.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

O desenvolvimento do presente trabalho se baseou enormemente na implementação realizada por Muller (2007), agregando outras potencialidades, como descrito nos parágrafos anteriores; basicamente a inclusão de outros métodos de solução do problema de fluxo bifásico. Considerando essas potencialidades, diversas oportunidades de desenvolvimento de futuros trabalhos podem ser sugeridas, sejam como ponto de partida para novos trabalhos, sejam para melhor avaliação dos métodos incluídos:

- 1. Pesquisa e implementação de diferentes modelos de comportamento tensão-deformação-resistência para o comportamento mecânico do meio poroso.

- 2. Implementação de formulações para análise de fluxo de contaminantes agregando a potencialidade das implementações de pós-processamento da velocidade.
- 3. Análise da condição crítica de passos de tempo para estabilidade das soluções bem como da necessária análise mais aprimorada da convergência dessas soluções.
- 4. Implementação de outros elementos finitos, bem como para análise 3D.
- 5. Implementação de procedimento de produção de areia seguindo o elaborado por Muller (2009), acoplado à condição de fluxo bifásico.
- 6. Implementação de procedimentos mais eficientes de solução dos sistemas, com a implementação de estrutura por aresta no MVF e ainda de paralelização do MEFD.
- 7. Os exemplos mostrados para validação consideraram apenas a condição de pressão capilar nula. Como discutido em Helmig (1998), uma avaliação de outras formas possíveis de inclusão dos termos difusivos é recomendada.