

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1. Conclusões

Uma formulação de elemento finito enriquecido cortado por uma descontinuidade física (falha, banda de cisalhamento, fratura) para aplicação em problemas com acoplamento fluido-mecânico em meios saturados com um único fluido é apresentada. A formulação é obtida a partir da adaptação de uma formulação de elemento finito mecânico cortado por uma descontinuidade, já existente na literatura, para o fluxo de fluido. O acoplamento entre as equações de equilíbrio mecânico e de fluxo de fluido é realizado através da incorporação do Princípio da tensão efetiva e da deformabilidade do esqueleto sólido devido à ação do fluido.

O elemento finito enriquecido permite eliminar a discretização da descontinuidade física na malha através da introdução de graus de liberdade de salto de deslocamento e de poro-pressão. Esses graus adicionais possibilitam inserir no elemento a mudança no campo de deslocamento e poro-pressão devido à presença da descontinuidade.

Para avaliar o elemento enriquecido acoplado, uma solução analítica unidimensional foi estabelecida neste trabalho de pesquisa. Devido à ausência de uma solução analítica bidimensional, a avaliação do elemento finito enriquecido é complementada através da comparação com exemplos numéricos simples gerados em um programa comercial de elementos finitos (ABAQUS).

O uso de um programa comercial também se mostrou limitado para a avaliação, pois não há um elemento finito no programa que descreva a descontinuidade física de modo equivalente às hipóteses adotadas no elemento finito enriquecido. Reconhecidas as diferenças na descrição da descontinuidade, optou-se por avaliar o elemento finito enriquecido acoplado por partes.

Observando que as equações do acoplamento fluido-mecânico incluem as equações de equilíbrio mecânico e de fluxo de fluido desacopladas, exemplos

puramente de equilíbrio mecânico e de fluxo de fluido foram elaborados. A adoção desse procedimento está baseada no fato de que, para esses exemplos, há uma equivalência entre o elemento enriquecido e alguns elementos do ABAQUS. Ao conduzir a avaliação desta forma, pôde-se identificar e limitar qual termo interfere na comparação de resultados entre o elemento finito enriquecido e o elemento finito acoplado do ABAQUS.

A fim de facilitar a redação dos comentários, adotam-se os termos modelo enriquecido e modelo discretizado para fazer referência aos modelos numéricos que empregam o elemento enriquecido e que discretizam a descontinuidade física (modelos gerados no ABAQUS) respectivamente. Seguindo a sequência de apresentação de exemplos mecânico, fluxo de fluido e acoplamento fluido-mecânico, as seguintes conclusões a respeito do elemento enriquecido podem ser feitas.

Para o problema de equilíbrio mecânico, os exemplos do capítulo 5 mostraram que as respostas previstas pelo modelo enriquecido e discretizado são praticamente idênticas. Isso garante que a submatriz de rigidez do elemento enriquecido acoplado está estabelecida corretamente e que o elemento enriquecido mecânico pode ser aplicado a qualquer problema de equilíbrio mecânico.

A hipótese de fluxo de fluido nas direções normal e tangencial à descontinuidade conduziu ao estabelecimento de duas aproximações de poro-pressão na descontinuidade. Essas aproximações são a única diferença entre os elementos enriquecidos com 3 e 5 nós.

Considerando primeiro o elemento enriquecido com 3 nós, os exemplos de fluxo de fluido indicaram que as respostas dos modelos enriquecido e discretizado são similares ou praticamente idênticas quando malhas refinadas são utilizadas. Para malhas grosseiras, a resposta do modelo enriquecido diferencia-se do modelo discretizado, qualitativa e quantitativamente, apenas quando o contraste entre a permeabilidade tangencial da descontinuidade e do meio poroso é muito alto (ordem de milhares de vezes). Em qualquer outra situação, as respostas são muito próximas.

Ao empregar o elemento enriquecido com 5 nós, nenhuma diferença de resultados foi observada entre os modelos discretizado e enriquecido quanto ao refinamento e ao valor de permeabilidade tangencial da descontinuidade adotado. Os resultados obtidos pelos dois modelos são similares ou praticamente idênticos.

As duas formas de elemento enriquecido de fluxo (com 3 e 5 nós) são capazes de reproduzir a resposta do modelo discretizado. Recomenda-se apenas um maior cuidado ao tratar de falhas que se comportam como meio condutor. Neste caso, ao empregar o elemento enriquecido com 3 nós, o refinamento de malha deve ser feito de modo mais criterioso.

Atendo-se ao lado computacional, o uso do elemento enriquecido com 3 nós é mais atrativo por dois motivos. Primeiro porque o número de graus de liberdade do elemento enriquecido com 3 nós é menor do que o elemento enriquecido com 5 nós. O segundo motivo é que o elemento enriquecido com 5 nós exige o uso de um elemento de transição na extremidade da descontinuidade. O emprego do elemento enriquecido com 5 nós é vantajoso somente em modelos que tenham descontinuidades com um valor de permeabilidade tangencial muito alto e cujas malhas tenham um refinamento grosseiro.

Consideradas as diferenças entre os elementos enriquecidos com 3 e 5 nós, os exemplos de fluxo de fluido do capítulo 5 deixam claro que as respostas previstas pelos modelos discretizado e enriquecido são praticamente idênticas na condição de fluxo em regime permanente. Para a condição de fluxo em regime transiente, as repostas dos dois modelos são muito próximas, a diferença vista é muito pequena e provavelmente esta associada à definição do valor do parâmetro de armazenamento.

Além disso, os exemplos de fluxo de fluido indicam que as submatrizes de permeabilidade e armazenamento do elemento enriquecido acoplado estão corretamente formuladas e que o elemento enriquecido de fluxo pode ser utilizado na representação de qualquer problema de fluxo de fluido.

A comparação do elemento enriquecido acoplado com a solução analítica mostrou alguns pontos importantes. O primeiro ponto é que o elemento enriquecido determina corretamente os saltos de deslocamento e de poro-pressão na direção normal à descontinuidade. O segundo ponto é a ausência do termo de acoplamento no elemento *cohesive* do ABAQUS.

Ao prosseguir na comparação com os exemplos bidimensionais, o elemento *cohesive* permitiu confirmar que a submatriz de acoplamento do elemento enriquecido referente à região fora da descontinuidade está correta. Essa confirmação pôde ser feita porque o termo de acoplamento da descontinuidade do elemento enriquecido foi retirado.

O uso dos elementos CPE4P, *cohesive* para avaliar o elemento enriquecido acoplado possibilitou fazer dois comentários. O primeiro comentário é que a correspondência entre os elementos CPE4P e enriquecido não é garantida quando a descontinuidade apresenta movimento na direção tangencial. Para o caso em que a descontinuidade tem uma movimentação baixa, as respostas dos modelos enriquecido e discretizado são muito semelhantes.

O segundo comentário, mais importante, é que a atribuição do termo de acoplamento na descontinuidade é aumentar a deformabilidade da descontinuidade. Essa observação corrobora a ideia de que a ausência de salto de poro-pressão pode conduzir a uma menor deformabilidade da descontinuidade.

Identificadas e limitadas as situações em que há correspondência entre a formulação acoplada do elemento enriquecido e os elementos do ABAQUS, pode-se dizer que o modelo enriquecido representa de modo satisfatório, senão corretamente, a resposta do modelo discretizado na condição de acoplamento fluido-mecânico. A respeito dos elementos enriquecidos com 3 e 5 nós, os mesmos comentários a respeito para o exemplo de fluxo são aplicados acoplamento fluido-mecânico.

Apresentados os comentários a respeito do elemento enriquecido acoplado, duas observações sobre a sensibilidade do elemento enriquecido quanto ao refinamento são feitas. Esses comentários estão baseados nos exemplos de equilíbrio mecânico e de fluxo de fluido.

O estudo de refinamento sugere que o modelo enriquecido tende a convergir de modo igual ou um pouco mais rápido do que o modelo discretizado à medida que o refinamento aumenta. Dependendo da precisão do problema em mãos, é possível dizer que o modelo enriquecido pode fornecer uma resposta satisfatória e com um menor refinamento do que o modelo discretizado.

Há uma diferença de sensibilidade dos elementos enriquecidos com 3 e 5 nós quanto ao refinamento apenas no problema de fluxo de fluido. O elemento enriquecido com 5 nós converge mais rápido do que o elemento enriquecido com 3 nós apenas no caso em que a descontinuidade for um meio condutor. Para uma descontinuidade com baixo de valor permeabilidade em relação ao meio poroso, os dois elementos apresentam a mesma convergência. A interpolação de poro-pressão é um método rápido e simples para determinar o valor de poro-pressão na

descontinuidade, mas para o artifício ser eficiente a malha do modelo deve ser refinada.

A respeito da descrição do fluxo de fluido através da descontinuidade, incluindo a representação do salto de poro-pressão, os exemplos demonstraram que o elemento enriquecido reproduz perfeitamente o fluxo de fluido. O elemento enriquecido conseguiu capturar o salto de poro-pressão associado à espessura e o contraste de permeabilidade entre a descontinuidade e o meio poroso.

Os exemplos de reservatório mostraram, em parte, a facilidade e agilidade na geração de malhas que se pode obter com o elemento enriquecido. Duas malhas tiveram de ser construídas para o modelo discretizado ao mudar a inclinação da falha, ao passo que o modelo enriquecido utilizou apenas uma. Deve-se notar que para gerar uma nova malha para o modelo discretizado, um novo corpo sólido (forma geométrica do reservatório) foi criado de modo que pudesse representar a falha. Ao empregar o elemento enriquecido, as etapas de criação da geometria e geração de malha foram evitadas para o segundo exemplo de reservatório poupando tempo.

Outro aspecto visível em relação às malhas geradas pelo ABAQUS para o exemplo de reservatório é o número grande de elementos e nós próximos às extremidades da falha. Ao utilizar o elemento enriquecido, o número de elementos e nós próximos a descontinuidade é reduzido. Associando o número de nós ao número de graus de liberdade, pode-se concluir que o número de variáveis do sistema de equações do modelo enriquecido é menor do que o modelo discretizado. Isso sugere que o tempo gasto na simulação do modelo enriquecido é menor do que o modelo discretizado.

Além do menor esforço na geração da malha, os exemplos mostraram que a descontinuidade pode atravessar o elemento em qualquer posição. Não há necessidade em alinhar as faces dos elementos à direção da descontinuidade. Essa característica indica que o elemento enriquecido permite o uso de qualquer de malha de elementos finitos na representação de descontinuidades físicas.

A ausência de uma solução analítica bidimensional e elementos do ABAQUS compatíveis com as hipóteses de comportamento da descontinuidade limitaram a avaliação do elemento enriquecido. Apesar dessa limitação, os diferentes exemplos ilustrados indicaram que o elemento enriquecido acoplado reproduz, no mínimo, a resposta da descontinuidade de modo qualitativo. Nas

situações em que a incompatibilidade entre os elementos do ABAQUS e o enriquecido pôde ser minimizada, a resposta do modelo enriquecido é idêntica ao modelo discretizado. Diante dos argumentos expostos, acredita-se que os objetivos da tese foram alcançados.

6.2. Sugestões

A finalidade desta tese é apresentar uma formulação de elemento finito com descontinuidade do tipo forte para o acoplamento fluido-mecânico. Para trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa, sugere-se:

- Introduzir no código computacional um modelo constitutivo elasto-plástico ou rígido-plástico para descrever o comportamento mecânico da descontinuidade física. O modelo linear elástico não permite reproduzir a resistência ao movimento que uma descontinuidade pode oferecer.
- Adotar e escrever no código computacional uma relação entre a permeabilidade e a espessura da descontinuidade. Em uma condição de acoplamento fluido-mecânico, a falha deforma-se e a permeabilidade dela tende a mudar.
- Investigar e delimitar um incremento de tempo mínimo para o uso do elemento enriquecido com 5 nós.
- Investigar se a condensação estática pode eliminar o uso do grau de liberdade adicional de poro-pressão na descontinuidade do elemento enriquecido com 5 nós. Caso a condensação estática funcione, o elemento de transição poderia ser dispensado.
- Incluir na formulação do elemento enriquecido um modo para descrever duas descontinuidades se interceptando. Meios geológicos podem apresentar descontinuidades físicas que se interceptam.
- Investigar a aplicabilidade do elemento enriquecido à modelagem de fraturamento hidráulico.