

5 EXEMPLOS

5.1. Introdução

Definida a formulação do elemento enriquecido, algumas aplicações são apresentadas. Dividido em três partes, o capítulo de exemplos mostra nas duas primeiras seções uma avaliação da capacidade do elemento enriquecido em reproduzir a resposta de um modelo numérico em que uma descontinuidade é discretizada. Nas situações em que as respostas forem diferentes, possíveis motivos para essa diferença são levantados. A última seção mostra aplicações do elemento enriquecido em um reservatório bidimensional cortado por uma falha.

Ao procurar validar a resposta do elemento enriquecido, uma dificuldade com que esta pesquisa se deparou é a falta de soluções analíticas que tratem do acoplamento fluido-mecânico em descontinuidades. Essa dificuldade levou ao desenvolvimento de uma solução analítica unidimensional para o acoplamento fluido-mecânico. A solução permite determinar os saltos de deslocamento e poro-pressão na direção normal à descontinuidade. A comparação do elemento enriquecido com a solução analítica está na primeira seção deste capítulo. Detalhes da solução analítica estão no apêndice C.

A limitação da solução analítica em descrever apenas o que ocorre na direção normal à descontinuidade conduziu ao uso de um programa de elementos finitos (ABAQUS) como um segundo instrumento para avaliar o elemento enriquecido. Devido a uma dúvida natural sobre a resposta numérica obtida, exemplos simples foram elaborados os quais, dentro de certo grau, permitem uma fácil interpretação física do problema em mãos. Essa interpretação possibilita dizer se há coerência ou não nos resultados obtidos. Os resultados dessa comparação são apresentados na segunda seção do capítulo.

O uso do ABAQUS para a representação do acoplamento fluido-mecânico na descontinuidade também é limitado, pois não existe um elemento finito no programa que obedeça às mesmas hipóteses de comportamento da

descontinuidade abordadas pelo elemento enriquecido. Para efetuar a comparação, dois elementos do ABAQUS foram utilizados e suas propriedades físicas relacionadas aos parâmetros de material da descontinuidade, permitindo que o comportamento deles se aproximasse da idealização feita para a descontinuidade.

Um desses elementos é o CPE4P. Trata-se de um elemento bilinear isoparamétrico acoplado e que obedece ao estado plano de deformação. A limitação dele é a existência de um deslocamento e tensão normal na direção tangencial à descontinuidade. A incompatibilidade do elemento CPE4P está no fato de que a descontinuidade apresenta apenas tensão cisalhante e escorregamento entre as faces na direção tangencial à descontinuidade. O ABAQUS não possui o elemento CST acoplado.

O outro elemento é o *cohesive* que, segundo a documentação do ABAQUS, é apropriado para a representação do comportamento mecânico de materiais aderentes, interface em compósitos e fraturas (ou falhas) em rochas. A documentação ilustra aplicações desse elemento na modelagem de fratura em uma operação de fraturamento hidráulico considerando o acoplamento fluido-mecânico.

A diferença do elemento *cohesive* em relação às hipóteses adotadas para a descontinuidade é que o fluxo através dele parece idealizado para uma cavidade vazia e não para um meio poroso. A permeabilidade não é o parâmetro físico associado ao fluxo e, sim, os coeficientes *Leak off* e *Gap Flow* adotados pelo programa. Detalhes da relação entre as propriedades dos elementos CPE4P e *cohesive* com a descontinuidade estão no apêndice D.

A fim de minimizar o efeito da diferença de hipóteses do elemento enriquecido na comparação com o ABAQUS e lembrando que a formulação puramente mecânica e de fluxo está incluída no acoplamento, exemplos que abordam o problema puramente mecânico e de fluxo são apresentados. Para cada um destes problemas há uma equivalência entre o elemento enriquecido e um elemento do ABAQUS. Tal equivalência afasta dúvidas em relação aos termos mecânico e de fluxo da formulação do elemento enriquecido acoplado e faz com que apenas o termo de acoplamento do elemento deva ser avaliado de modo mais cuidadoso.

A terceira seção do capítulo ilustra o uso do elemento enriquecido na modelagem de reservatórios bidimensionais. Os exemplos procuram mostrar

principalmente a habilidade do elemento em representar o caráter selante ou condutor de uma falha em malhas grosseiras.

Cabe lembrar que duas aproximações do elemento enriquecido são apresentadas. A primeira aproximação considera que a poro-pressão na descontinuidade é um valor interpolado. A segunda adota que a poro-pressão na descontinuidade é descrita por um grau de liberdade específico. O elemento que adota a primeira aproximação será identificado por enriquecido (com 3 nós), enquanto o que utiliza a segunda aproximação será identificado por enriquecido (com 5 nós).

No que se refere ao uso do elemento enriquecido, o elemento foi introduzido em um código Matlab e as malhas geradas no pré-processador GiD. A inclusão do elemento enriquecido na malha foi feita através da edição do arquivo de entrada criado pelo GiD. Os elementos atravessados por uma descontinuidade são substituídos no arquivo de entrada pelo elemento enriquecido. O código permite inserir a descontinuidade em qualquer direção. A geração de mapas de deslocamento e poro-pressão, tanto para o elemento enriquecido como para os elementos do ABAQUS, é feita através do Matlab.

O sistema de equações é resolvido pelo método de Eliminação de Gauss com pivoteamento parcial. Esse método é uma ferramenta própria do Matlab. A integração no tempo, para o caso de fluxo em regime transiente, usa o algoritmo do tipo implícito *backward difference*.

5.2.

Coluna de arenito unidimensional submetido a um carregamento de compressão e fluxo descendente

Dois exemplos são apresentados nesta seção. Eles consistem em representar uma coluna de arenito unidimensional submetida a um carregamento de compressão e a um fluxo descendente. Um exemplo trata o fluxo na condição de regime permanente e outro na condição transiente. Os campos de deslocamento e poro-pressão determinados pela modelagem numérica são comparados à solução analítica descrita no apêndice C.

5.2.1. Regime permanente

Este exemplo apresenta a modelagem de uma coluna de arenito unidimensional submetida, em um primeiro momento, a um carregamento de compressão uniforme (P) de 1 MPa como ilustrado na Figura 5-1. O deslocamento é restringido na direção x ao longo das faces direita e esquerda da coluna, e na direção y ao longo da base. O carregamento é aplicado em uma condição drenada a fim de evitar qualquer geração de poro-pressão ao longo da coluna. Posteriormente ao carregamento, impõe-se um fluxo descendente (q) de 1×10^{-7} m/s no topo da coluna em regime permanente. A poro-pressão na base é igual a 0 MPa (condição drenada). A coluna tem 1 m de altura e é atravessada por uma descontinuidade a uma distância de 0,5 m em relação à base. A descontinuidade possui uma espessura de 0,5 mm e está orientada a 0° em relação ao eixo x . A coluna é formada por um material linear elástico isotrópico (arenito Weber) obedecendo ao estado plano de deformação, enquanto a descontinuidade é linear elástica anisotrópica. O fluido no meio poroso possui uma viscosidade (μ) de 50 cP, peso específico (γ) de 8 KN/m^3 e um módulo de variação volumétrica (K_f) de 3,3 GPa. Os parâmetros de material do arenito e da descontinuidade estão listados na Tabela 5-1.

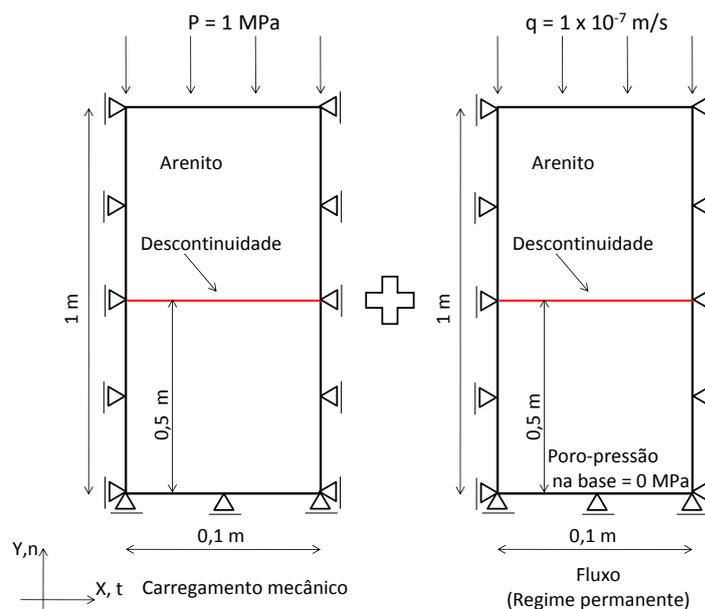


Figura 5-1: Esboço da geometria, carregamento e condições de contorno da coluna de arenito unidimensional para o regime de fluxo permanente

Tabela 5-1 – Parâmetros da coluna de arenito unidimensional

Arenito		Descontinuidade	
E (GPa)	27,60	r_{nn} (GPa/m)	10,00
ν	0,15	r_{ss} (GPa/m)	1,00
k (mD)	1,00	k_n (mD)	0,01
ϕ	0,06	k_t (mD)	0,10
Ks (GPa)	36,00	ϕ	0,06
***	***	Ks (GPa)	36,00

Seguindo a relação de propriedades sugerida no apêndice D, o elemento CPE4P que representa a descontinuidade tem módulo de Young (E_y), módulo de cisalhamento (G_{xy}) e coeficiente de Poisson (ν_{xy}) iguais a 50 MPa, 5 MPa e 0 respectivamente. Os coeficientes de *Leak off* (LO) e *Gap Flow* (GF) do elemento *cohesive* são $7,895 \times 10^{-8}$ (m/s)/MPa e 5×10^{-8} s x MPa respectivamente.

A Figura 5-2 ilustra as malhas utilizadas no exemplo. À esquerda está a malha gerada pelo GiD com 510 elementos CST e 312 nós, à direita a malha do ABAQUS-CAE (pré-processador do ABAQUS) com 255 elementos bilineares e 318 nós. A linha tracejada em vermelho indica a posição aproximada da descontinuidade.

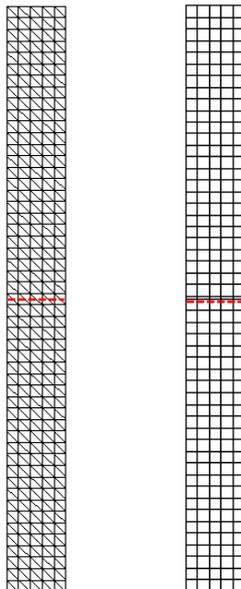


Figura 5-2: Malhas geradas pelo GiD e ABAQUS-CAE

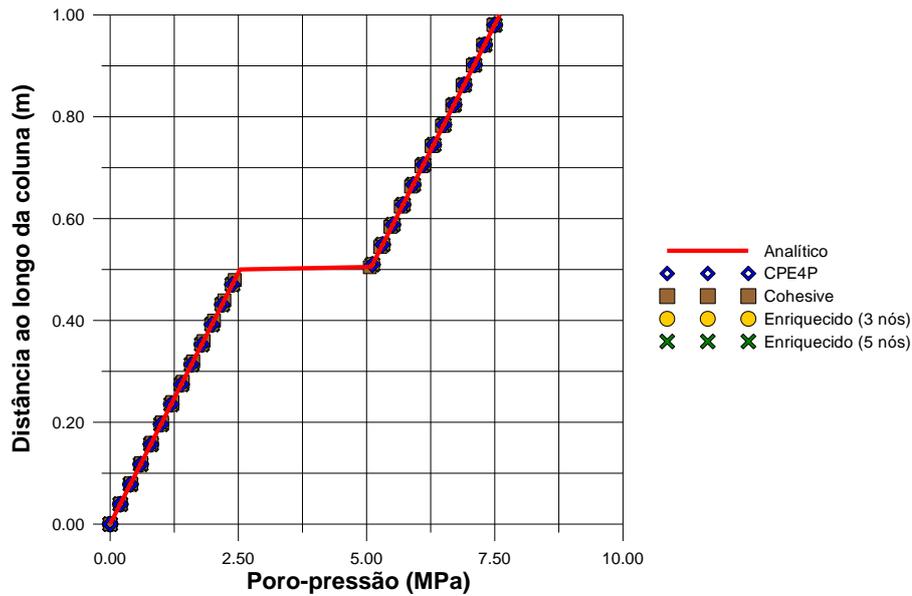


Figura 5-3: Curva de poro-pressão ao longo da coluna de arenito

Todos os elementos da malha do ABAQUS que estão fora da descontinuidade são do tipo CPE4P. Na descontinuidade, conforme o caso, os elementos são do tipo CPE4P ou *cohesive*. Em relação ao GiD, todos os elementos são do tipo CST. Posteriormente, por edição do arquivo de entrada, os elementos atravessados pela descontinuidade são substituídos pelo elemento enriquecido. A resposta de poro-pressão ao longo da coluna está ilustrada na Figura 5-3.

De forma nítida, a poro-pressão, ao longo da coluna, mostra três intervalos de variação linear. Por meio da observação da curva descrita pela solução analítica (linha cheia na cor vermelha) e tomando a base da coluna como distância igual a 0m, a maior variação é vista na descontinuidade (distância de 0,5 m). Sobre a descontinuidade, a poro-pressão varia 2,5 MPa em uma espessura de 0,5 mm. O gradiente correspondente é de 500 MPa/m. Imediatamente acima e abaixo da descontinuidade, a poro-pressão varia 2,5 MPa em um comprimento de aproximadamente 0,5 m em cada intervalo. O gradiente correspondente é de 5 MPa/m nestes intervalos. A variação linear é decorrente da aplicação do fluxo unidimensional e em regime permanente.

Todas as curvas de poro-pressão determinadas por modelagem numérica coincidiram perfeitamente com a solução analítica sendo, praticamente, impossível diferenciá-las entre si. Assim, três curvas devem ser notadas com atenção. A primeira curva é referente ao elemento *cohesive* indicada pelos pontos

na forma de quadrado. Por não utilizar a permeabilidade como uma propriedade física, esse resultado mostra que a relação adotada entre o coeficiente LO e a permeabilidade normal da descontinuidade é adequada.

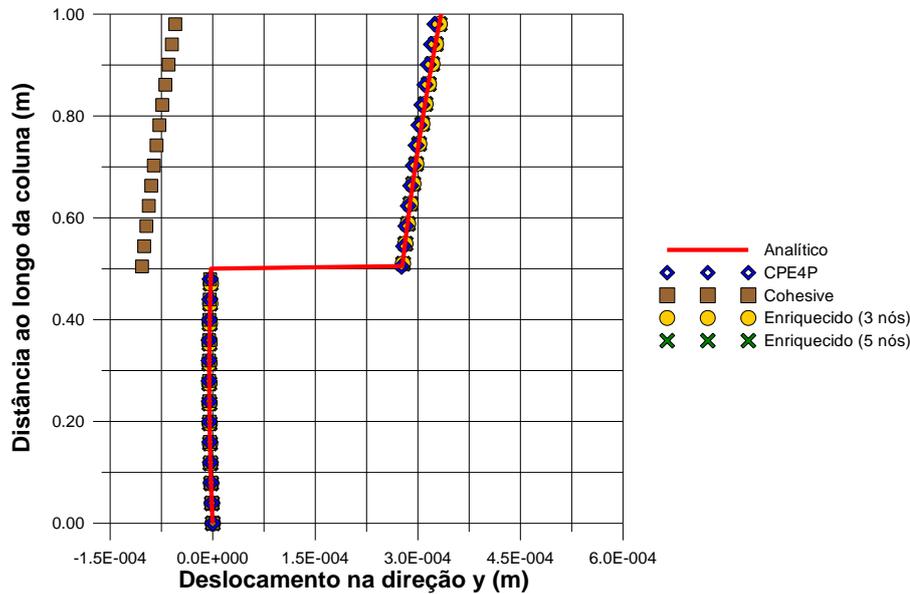


Figura 5-4: Curva de deslocamento ao longo da coluna de arenito ao final da aplicação do fluxo descendente

As outras duas curvas são as do elemento enriquecido com 3 e 5 nós, indicadas pelos pontos com formato em círculo e em x respectivamente. A característica a ser destacada é a capacidade do elemento enriquecido em determinar a variação ou salto de poro-pressão através da descontinuidade. A concordância entre as curvas do elemento enriquecido e a solução analítica mostra que a hipótese admitida na equação (3.17) é perfeitamente aplicável.

Para o deslocamento, somente três elementos apresentaram a mesma concordância com a solução analítica como visto na Figura 5-4. Indicada pela linha cheia na cor vermelha, a solução analítica mostra que o deslocamento é praticamente nulo abaixo da descontinuidade (distância menor que 0,50 m). Acima dela, percebe-se uma variação no deslocamento, porém muito pequena quando comparada ao salto de deslocamento sobre a descontinuidade. O deslocamento no topo da coluna é $3,3549 \times 10^{-4}$ m enquanto o salto está na ordem de $2,75 \times 10^{-4}$ m, indicando que o movimento da coluna é governado pela descontinuidade.

Quanto ao deslocamento positivo ao longo da coluna, ele pode ser associado ao aumento de poro-pressão gerado pelo fluxo descendente. Ao aumentar a poro-pressão de 0 MPa para um valor positivo, conforme ilustrado na Figura 5-3, o

meio poroso expande-se. Esse aumento é suficientemente alto para provocar uma inversão de deslocamento negativo, gerado pelo carregamento mecânico, para positivo.

As curvas de deslocamento obtidas pelos elementos CPE4P e enriquecido com 3 e 5 nós foram idênticas à solução analítica. O resultado mostra que a relação entre a rigidez normal da descontinuidade e o módulo de Young para o elemento CPE4P, descrita no apêndice D, funciona adequadamente.

Outro ponto a ser notado é a igualdade das respostas dos elementos CPE4P e enriquecido. Atentando-se ao fato de que o elemento CPE4P trabalha com tensão, a Figura 5-4 permite dizer que a analogia entre força de superfície na descontinuidade e tensão efetiva estabelecida na expressão (4.2) parece, no mínimo, apropriada. Deve-se recordar que o acoplamento do fluxo ao comportamento mecânico na descontinuidade é estabelecido por essa expressão inicialmente.

Cabe ressaltar que as ponderações realizadas aqui são para um caso particular, pois o carregamento e fluxo impostos não geram deslocamentos na direção x. Tal condição permitiu adequar o elemento CPE4P à idealização feita para a descontinuidade e compará-lo ao elemento enriquecido.

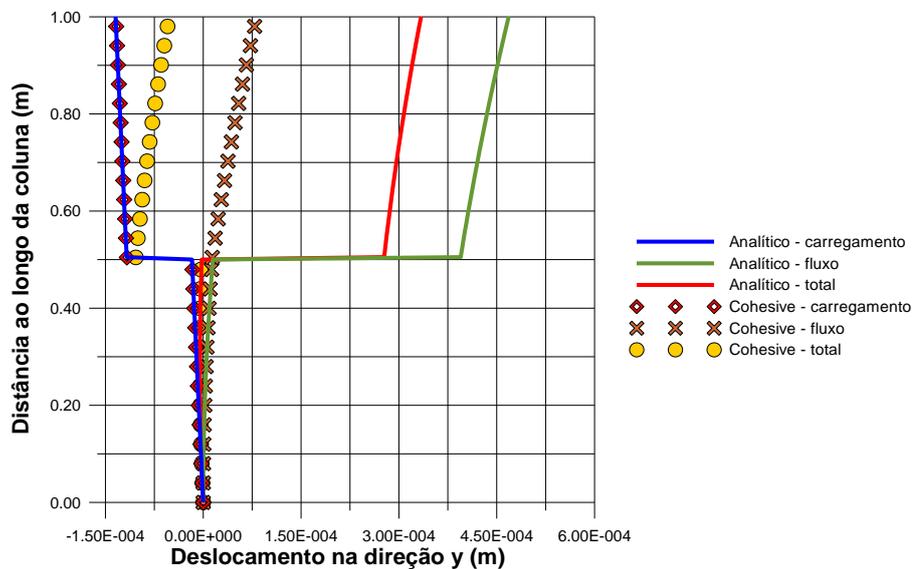


Figura 5-5: Curvas de deslocamento ao longo da coluna de arenito devido à ação separada do carregamento mecânico e do fluxo de fluido obtido pelo elemento cohesive

No que se refere à resposta do elemento *cohesive* nota-se que a discrepância vista na Figura 5-4 ocorre apenas para distâncias acima da descontinuidade. Outro detalhe que desperta atenção é o paralelismo das curvas de deslocamento obtidas pelo elemento *cohesive* e pela solução analítica neste intervalo. Visto que o movimento da coluna é ditado pela descontinuidade, esses dois fatores sugerem que a diferença observada pode estar relacionada apenas ao valor do salto de deslocamento.

A Figura 5-4 retrata o deslocamento como o resultado da ação conjunta do carregamento mecânico e do fluxo descendente. Essa combinação, provavelmente, está dificultando a identificação do real motivo para a discrepância de resultados. Recordando que a solução analítica tem como hipótese a superposição de efeitos (apêndice C), simulações do carregamento mecânico e do fluxo de fluido com o elemento *cohesive* são realizadas separadamente. As respostas de deslocamento obtidas por essas novas simulações são comparadas às respectivas soluções analíticas e ilustradas na Figura 5-5.

Ao observar a curva descrita pela solução analítica (linha cheia, cor azul), é possível perceber que o carregamento mecânico provoca um deslocamento negativo ao longo da coluna como mencionado anteriormente. A solução analítica mostra que a curva obtida pelo elemento *cohesive*, indicada pelos pontos no formato de losango, foi determinada corretamente.

Por sua vez, a curva em linha cheia verde (solução analítica) mostra que o fluxo provoca uma expansão no meio poroso - comportamento caracterizado pelo valor positivo de deslocamento. Representada pelos pontos em forma de x, a resposta do elemento *cohesive* associada ao fluxo também indica uma expansão do meio poroso. A diferença entre as duas curvas é que o salto de deslocamento determinado pelo elemento *cohesive* tem um valor muito baixo. O salto é tão pequeno que a curva de deslocamento ao longo da coluna aparenta ser suave, isto é, sem variações bruscas.

Ao superpor o carregamento mecânico e o fluxo de fluido, o salto de deslocamento visto na curva de deslocamento total do elemento *cohesive* (indicada pelos pontos em círculo) reflete basicamente o salto associado ao carregamento mecânico. Ao introduzir a curva de deslocamento total obtida pela solução analítica (linha cheia, cor vermelha), a mesma diferença descrita na Figura 5-4 é observada.

Até o momento, os resultados mostram que o elemento *cohesive* consegue descrever o salto de poro-pressão para o fluxo de fluido em regime permanente e o salto de deslocamento relacionado ao carregamento mecânico. Considerando as observações feitas, o possível motivo para o elemento *cohesive* não descrever corretamente o salto de deslocamento causado pelo fluxo de fluido deve estar associado ao termo de acoplamento na equação de equilíbrio mecânico.

Tendo isso em mente, uma comparação entre os elementos *cohesive* e enriquecido (com 3 nós) é realizada. Nesta comparação, o termo de acoplamento na descontinuidade é retirado da formulação do elemento enriquecido (quarto termo do lado esquerdo da igualdade na expressão (4.9)). A Figura 5-6 ilustra o resultado obtido. O elemento *cohesive* é tomado como referência e as curvas obtidas por ele representadas por linhas cheias.

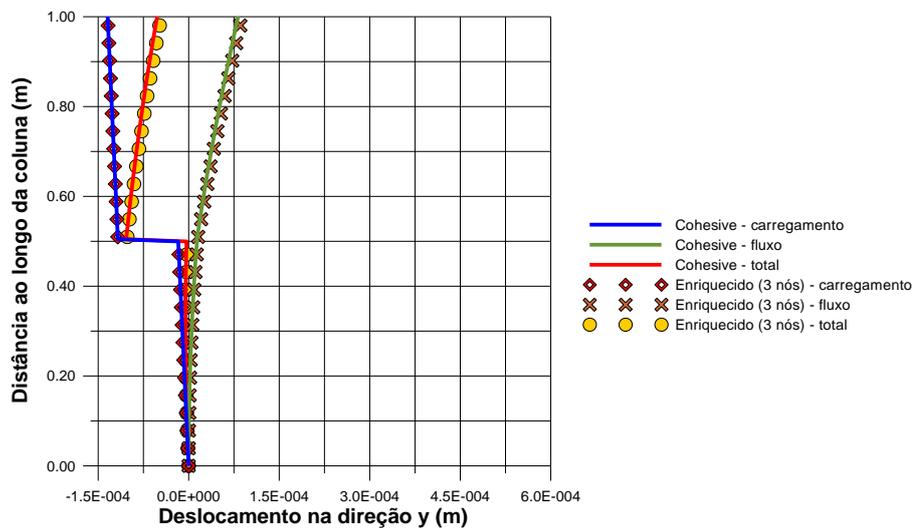


Figura 5-6: Curvas de deslocamento obtidas pelos elementos *cohesive* e enriquecido com 3 nós (termo de acoplamento na descontinuidade ausente) ao longo da coluna unidimensional

Sem o termo de acoplamento na descontinuidade, as curvas de deslocamento obtidas pelos elementos *cohesive* e enriquecido tornam-se praticamente coincidentes. Portanto, isso confirma a ideia de que o termo de acoplamento é o real motivo para discrepância de resultados do elemento *cohesive* vista na Figura 5-4. Ao retirar o termo de acoplamento, a variação de poro-pressão na descontinuidade não é contabilizada e, conseqüentemente, o salto de deslocamento associado a ela também não.

5.2.2. Regime transiente

Este exemplo retrata a mesma coluna do exemplo anterior, exceto pela condição de regime transiente e pelo fluxo prescrito. Para gerar uma condição de regime transiente, o fluxo prescrito é substituído por uma condição de poro-pressão prescrita no topo da coluna. O valor dessa nova condição de poro-pressão é o mesmo determinado pela solução analítica do exemplo anterior para o topo da coluna (7,60 MPa). A poro-pressão inicial ao longo de toda coluna é igual a 0 MPa. A Figura 5-7 ilustra a nova condição de fluxo. Os mesmos parâmetros de material e malhas do exemplo em regime permanente são utilizados aqui.

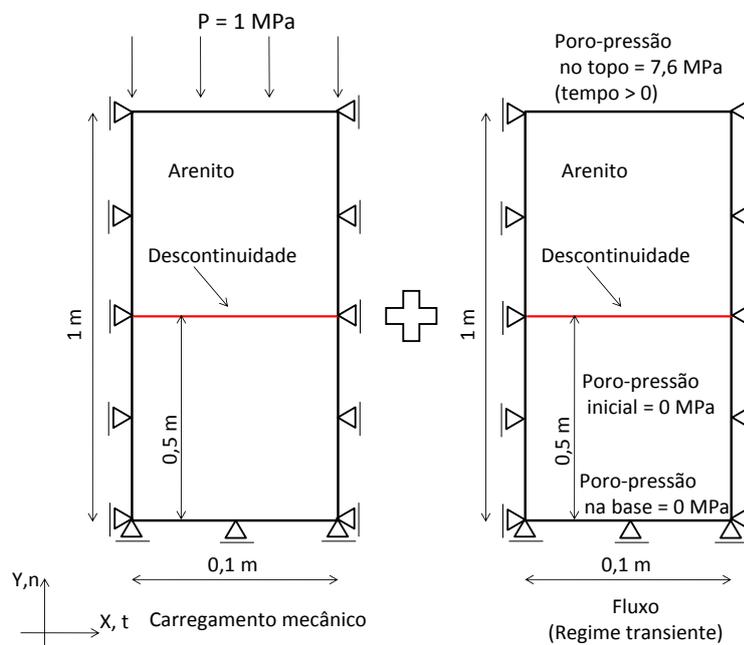


Figura 5-7: Esboço da geometria, carregamento e condições de contorno da coluna de arenito para o regime de fluxo transiente

A razão para aplicar uma poro-pressão no topo da coluna idêntica à determinada pela solução analítica é para permitir uma comparação entre a resposta do elemento enriquecido e a própria solução analítica. Impondo um tempo suficientemente grande para que o fluxo de fluido em regime transiente atinja a condição permanente, o diferencial de poro-pressão entre o topo e a base da coluna produzirá um fluxo ao longo dela equivalente ao fluxo prescrito empregado na solução. A comparação torna-se possível no momento em que o fluxo atinge a condição permanente.

Essa proposta é um artifício para avaliar a resposta transiente do elemento enriquecido, pois apenas o último incremento de tempo é comparado. A ideia desse teste resume-se ao fato de que a resposta do regime permanente é igual à soma sucessiva de resultados do regime transiente. Logo, se o resultado do regime transiente estiver errado, a resposta do regime permanente também estará.

A fim de analisar a resposta do elemento enriquecido ao longo do tempo, uma comparação com o elemento CPE4P é feita. Do mesmo modo que o elemento enriquecido, a resposta do elemento CPE4P também é confrontada com a solução analítica. Nesse exemplo apenas o elemento enriquecido com 3 nós é utilizado, mas todos os comentários a respeito dele são válidos para o elemento enriquecido com 5 nós.

Iniciando a comparação com a solução analítica, a Figura 5-8 mostra as curvas de poro-pressão obtidas numericamente para o tempo de 17475 s (instante em que o regime permanente já foi atingido). Observa-se que a resposta numérica foi idêntica à solução analítica, até mesmo o salto de poro-pressão associado à menor permeabilidade da descontinuidade foi reproduzido. O resultado sugere que a integração ao longo do tempo do elemento enriquecido está correta.

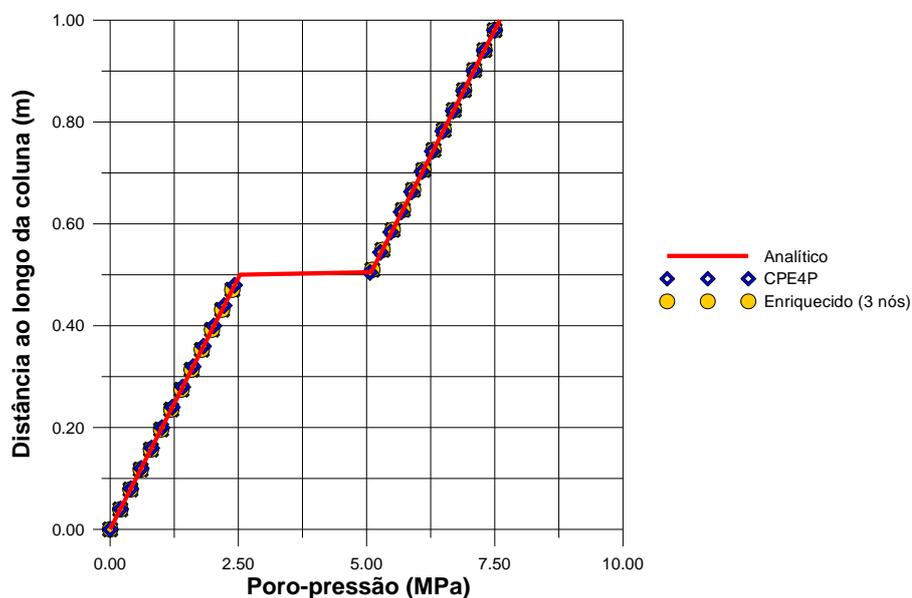


Figura 5-8: Curva de poro-pressão ao longo da coluna de arenito para o tempo 17475 s

Separando as curvas de deslocamento devido ao carregamento mecânico e fluxo descendente, como no exemplo de regime permanente, a mesma concordância entre as soluções analítica e numérica é vista de acordo com o que

foi ilustrado na Figura 5-9. Idêntico ao exemplo anterior, o carregamento mecânico gera um deslocamento negativo ao longo da coluna como identificado pela curva em linha cheia, cor azul (solução analítica). Após a imposição do fluxo descendente, o deslocamento passa a ser positivo refletindo a expansão do meio poroso como representado pela curva em linha cheia, cor vermelha (solução analítica). Mesmo sem comparar as curvas de deslocamento diretamente, as figuras 5-9(a) e 5-9(b) possibilitam afirmar que as respostas dos elementos CPE4P e enriquecido com 3 nós são iguais.

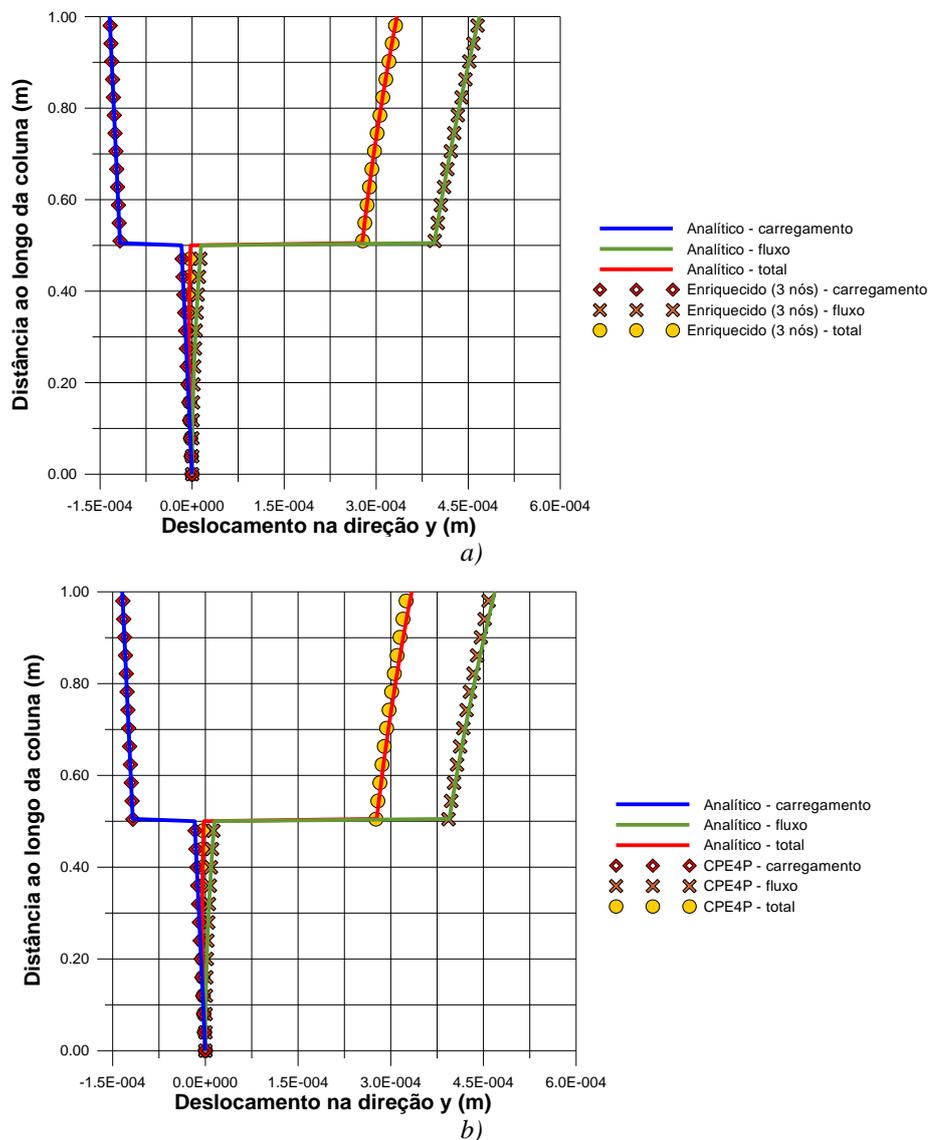


Figura 5-9: Curvas de deslocamento ao longo da coluna de arenito para o carregamento mecânico e fluxo descendente separadamente no tempo 17475 s: a) elemento enriquecido com 3 nós, b) elemento CPE4P

Prosseguindo na avaliação do elemento enriquecido, compara-se a resposta de deslocamento ao longo do tempo obtida por ele à resposta do elemento CPE4P. A resposta de deslocamento é lida no topo da coluna. A resposta de poro-pressão não é comparada neste exemplo.

A Figura 5-10 ilustra a evolução do deslocamento no topo da coluna desde o instante em que o diferencial de poro-pressão é imposto (tempo 0 s) até o momento em que a condição permanente é atingida (tempo 17475 s). Por meio desta figura, é possível observar a inversão do comportamento de contração para expansão do meio poroso ao longo do tempo citada anteriormente. Para o tempo de 0 s, em que apenas o carregamento mecânico atua, o deslocamento obtido pelo elemento enriquecido é de $-1,3343 \times 10^{-4}$ m. O deslocamento torna-se nulo por volta do tempo 500 s e atinge um valor final de $3,3549 \times 10^{-4}$ m no tempo 17475 s.

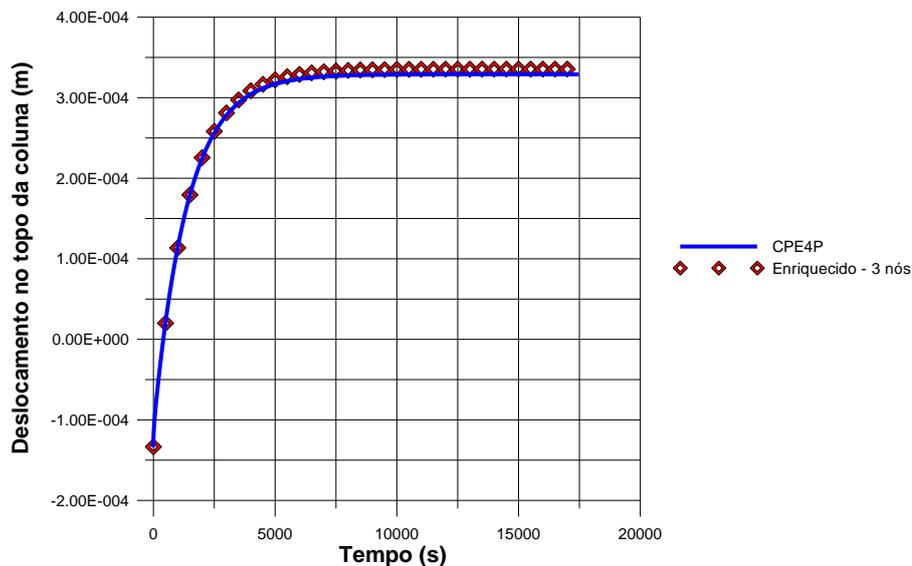


Figura 5-10: Curva de deslocamento no topo da coluna ao longo do tempo

A concordância de resultados entre os elementos CPE4P e enriquecido é outro ponto a ser notado. Para os tempos de 0 s e 17475 s, os deslocamentos determinados pelo elemento CPE4P foram de $-1,3414 \times 10^{-4}$ m e $3,2894 \times 10^{-4}$ m, respectivamente, valores muito próximos aos obtidos pelo elemento enriquecido. O resultado dessa comparação indica que o termo de armazenamento do elemento enriquecido parece ter sido bem estabelecido. Novamente, deve-se lembrar de que o referido exemplo permitiu aproximar o comportamento do elemento CPE4P à idealização da descontinuidade.

A similaridade entre as respostas dos elementos CPE4P e enriquecido, vista nos dois exemplos da coluna, e a observação da aparente ausência do termo de acoplamento no elemento *cohesive* formam o primeiro indicativo de que o elemento enriquecido é capaz de reproduzir a resposta de um modelo numérico em que uma descontinuidade é discretizada. A próxima seção irá explorar um pouco mais sobre a formulação mecânica e de fluxo do elemento enriquecido.

5.3.

Comparação do elemento enriquecido com o programa ABAQUS

A seção anterior mostrou uma aplicação unidimensional para o elemento enriquecido. Os resultados obtidos foram muito bons, mas não permitiram visualizar o desempenho do elemento em situações em que a descontinuidade apresente movimento ou fluxo nas direções normal e tangencial. A fim de conhecer e avaliar a capacidade do elemento enriquecido nestas situações, comparações com os elementos *cohesive* e CPE4P do programa de elementos finitos ABAQUS são realizadas. Além do acoplamento fluido-mecânico, exemplos mecânicos e de fluxo de fluido desacoplados são ilustrados. As malhas utilizadas neste exemplo são as mesmas do estudo de refinamento ilustrado no apêndice A.

5.3.1.

Coluna de arenito submetida a um carregamento mecânico de compressão

O exemplo consiste em modelar uma coluna de arenito submetida a um carregamento de compressão uniforme (P) de 1 MPa como ilustrado na Figura 5-11, página 128. O deslocamento na direção x ao longo das faces direita e esquerda da coluna é restringido, a base é impedida de se movimentar na direção y . A coluna possui uma descontinuidade no seu interior com espessura de 5 mm e inclinada em relação ao eixo x por um ângulo ω . A coluna é formada por um arenito com comportamento linear elástico isotrópico (arenito Weber descrito por Detournay e Cheng, 1993) e obedece ao estado plano de deformação, enquanto a descontinuidade é formada por um material linear elástico anisotrópico. Os parâmetros de material do arenito e da descontinuidade são listados na Tabela 5-2.

Adicionalmente, inclui-se na coluna uma condição de contorno de salto nulo nas extremidades da descontinuidade. Essa restrição visa garantir que, sobre a extremidade da descontinuidade, o deslocamento seja contínuo, ou seja, possua apenas um valor.

O comportamento que se procura reproduzir neste exemplo é a possível alteração do campo de deslocamento devido a uma mudança na inclinação ω da descontinuidade. Tal situação permite ilustrar a capacidade do elemento enriquecido em representar o comportamento mecânico da descontinuidade para corpos bidimensionais. Duas inclinações ω são adotadas: uma de 0° e outra de 45° . O posicionamento da descontinuidade no interior da coluna associado a essas duas inclinações é ilustrado na Figura 5-11.

Tabela 5-2: Parâmetros da coluna de arenito submetida a carregamento mecânico

Arenito		Descontinuidade	
E (GPa)	27,60	r_{nn} (GPa/m)	5,00
ν	0,15	r_{ss} (GPa/m)	1,00

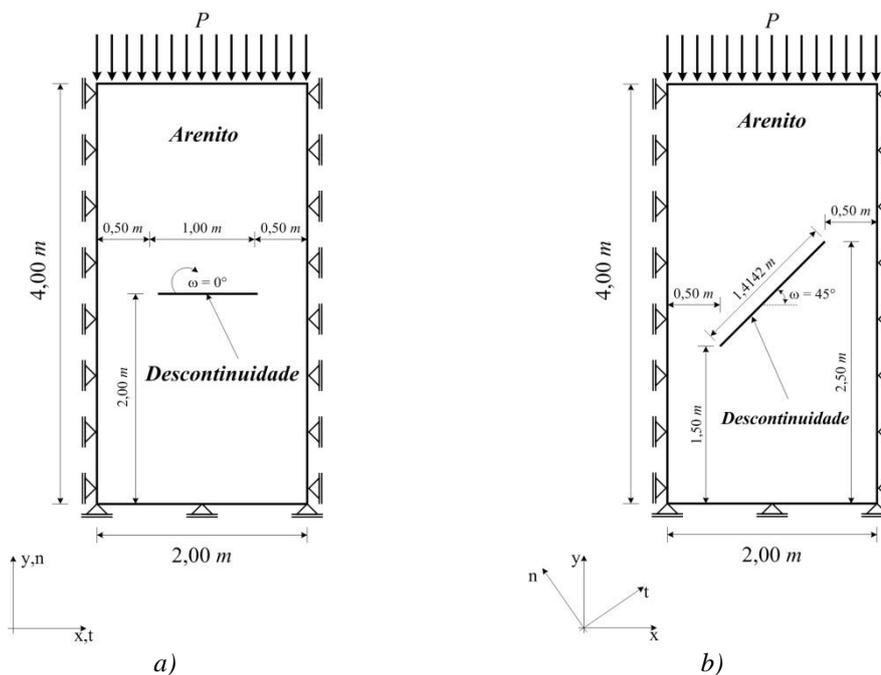


Figura 5-11: Coluna de arenito submetida a um carregamento de compressão: a) coluna 1a, b) coluna 2a

Para facilitar os comentários nesta seção e nas seguintes, a forma como a descontinuidade é posicionada na coluna será identificada por um número e uma letra. A inclinação será identificada por um número. O valor 1 é associado à

inclinação de 0° e 2 à inclinação de 45° . O corte da coluna pela descontinuidade será representado por uma letra. A letra a indica que a descontinuidade está inserida no interior da coluna, a letra b indica que a coluna é cortada pela descontinuidade de uma face à outra. A nomenclatura das colunas na Figura 5-11 usa essa definição.

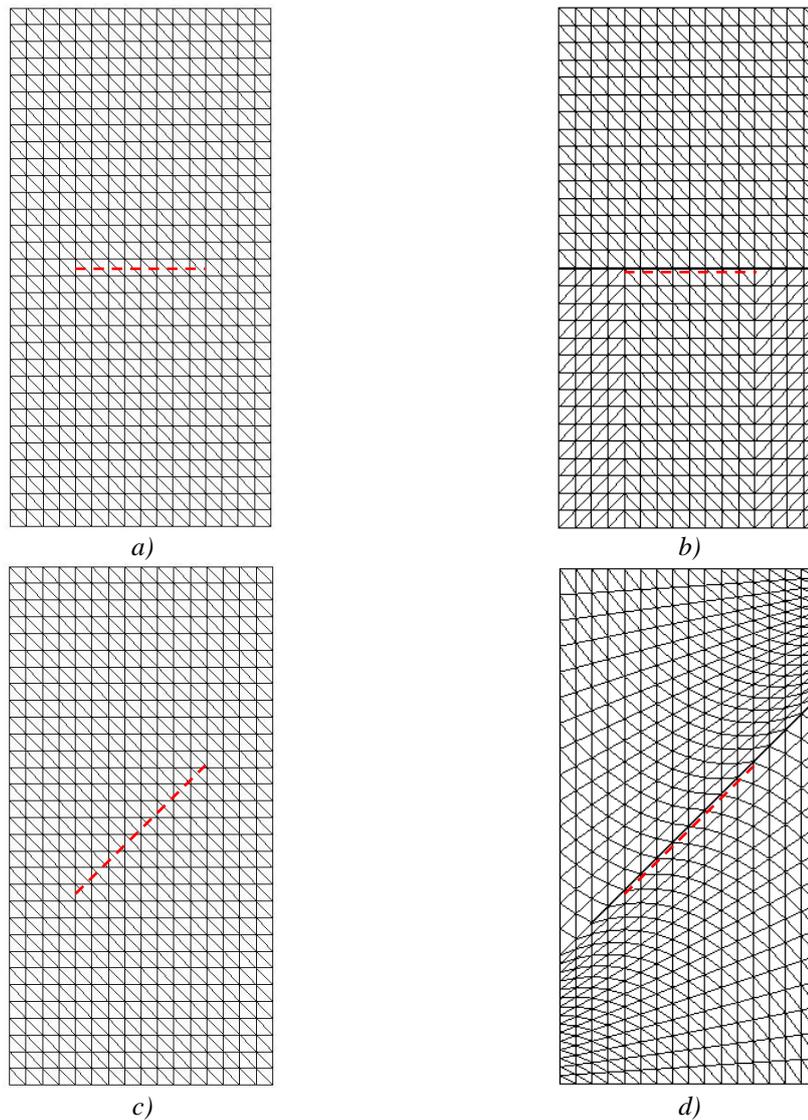


Figura 5-12: Malhas geradas: (a) GiD para a coluna 1a, (b) ABAQUS-CAE para a coluna 1a, (c) GiD para a coluna 2a, (d) ABAQUS-CAE para a coluna 2a

Três malhas foram empregadas neste exemplo, sendo duas para o uso do ABAQUS. Elas correspondem à malha 4 do estudo de refinamento. As figuras 5-12(a) e 5-12(c) ilustram a malha gerada pelo GiD para a modelagem das colunas 1a e 2a. Ela possui 992 elementos e 544 nós. A Figura 5-12(b) mostra a malha da

coluna 1a gerada pelo ABAQUS, enquanto a Figura 5-12(d) mostra a malha associada à coluna 2a. As duas malhas do ABAQUS possuem 984 elementos e 544 nós. A linha tracejada na cor vermelha indica a posição aproximada da descontinuidade. Um detalhe a ser observado é que o elemento enriquecido utilizou apenas uma malha.

Os elementos que representam a descontinuidade no ABAQUS são do tipo bilinear (*cohesive* e CPE4), enquanto fora dela, os elementos são do tipo CST (CPE3). O elemento CPE4 é utilizado apenas em modelagens mecânicas e corresponde à formulação mecânica do elemento CPE4P. Referente às propriedades do elemento CPE4, o módulo de Young (E_y), módulo de cisalhamento (G_{xy}) e coeficiente de Poisson (ν_{xy}) são iguais a 25 MPa, 5 MPa e 0 respectivamente.

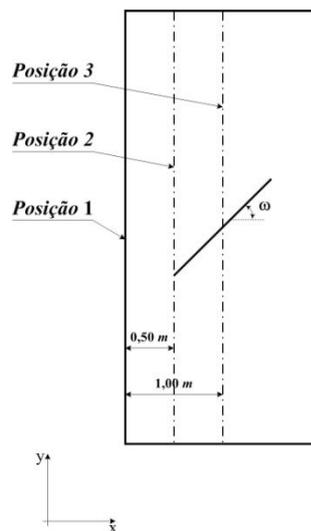


Figura 5-13: Posições onde foram lidas as respostas de deslocamento no modelo numérico

Três posições na coluna foram selecionadas para medição do deslocamento como ilustrado na Figura 5-13. As posições 1, 2 e 3 são paralelas ao eixo y, sendo que as posições 2 e 3 passam pela extremidade esquerda e pelo ponto médio da descontinuidade. As posições 2 e 3 são indicadas por uma linha em traço e ponto.

Para avaliar a formulação mecânica do elemento enriquecido, define-se a resposta do elemento *cohesive* como referência. Esse procedimento é adotado pelo fato das hipóteses de movimento e relação força de superfície versus salto de deslocamento da descontinuidade dos dois elementos serem semelhantes. A

Figura 5-14, página 131, ilustra o deslocamento nas direções x e y ao longo das três posições para a coluna 1a.

Definindo que a base da coluna como distância igual a zero, observa-se que a resposta dos dois elementos foi idêntica em praticamente todas as curvas. A única diferença ocorreu para o deslocamento na direção x ao longo da posição 3 (Figura 5-14(a)). O salto previsto pelo elemento enriquecido (com 3 nós), localizado na distância 2 m, é um pouco maior do que o obtido pelo elemento *cohesive*.

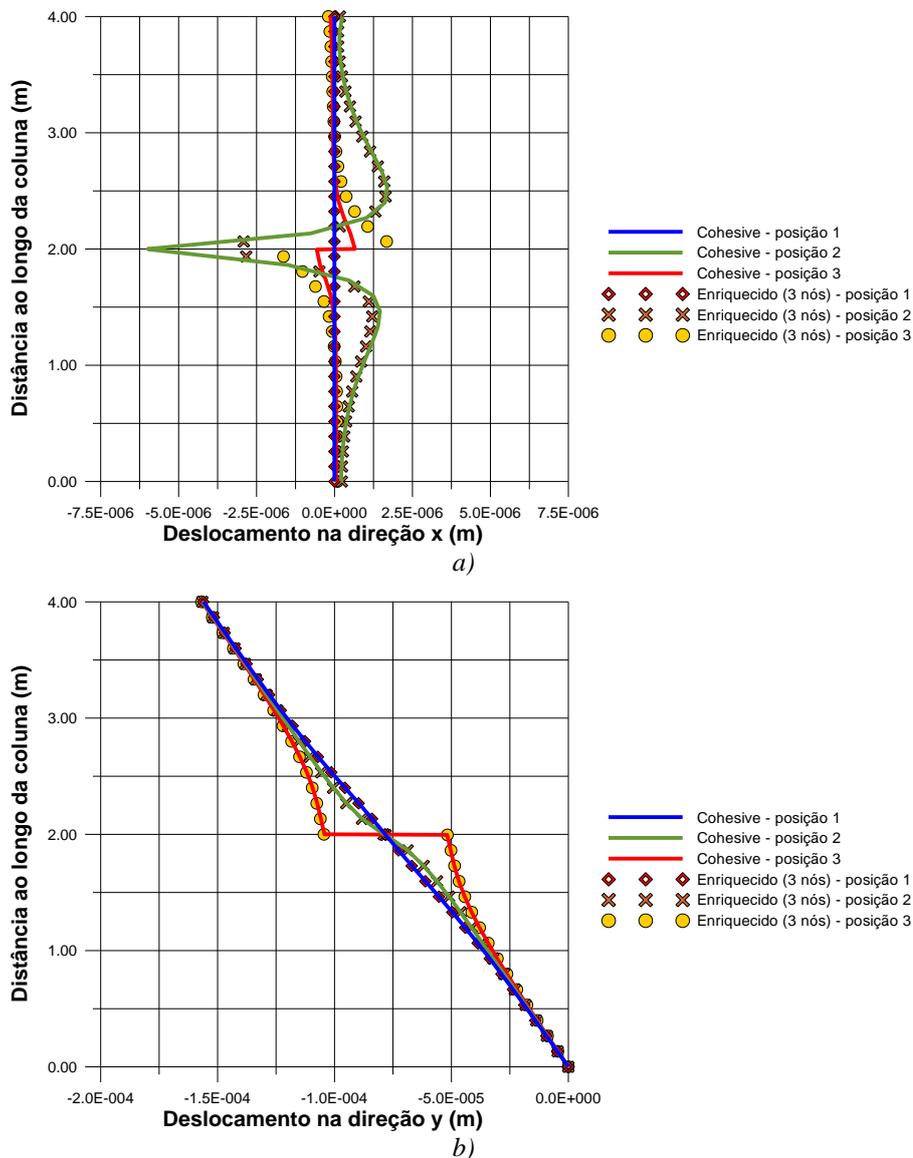


Figura 5-14: Curvas de deslocamento nas direções x e y ao longo das posições 1, 2 e 3 obtidas pelos elementos *cohesive* e *enriquecido* (com 3 nós) para a coluna 1a

Apesar de a diferença de salto observada, a relevância dela pode ser minimizada por dois motivos. O primeiro deles é que todas as curvas de deslocamento obtidas pelo elemento enriquecido têm o mesmo comportamento daquelas determinadas pelo elemento *cohesive*. O segundo motivo é que a ordem de grandeza do deslocamento na direção x é aproximadamente 100 vezes menor do que o deslocamento na direção y , mostrando que a coluna move-se preferencialmente na direção y . Juntando estas observações à ótima concordância de resultados do deslocamento na direção y (Figura 5-14(b)), é possível admitir que a diferença de salto mencionada esteja simplesmente associada a um resíduo da solução numérica.

A influência da descontinuidade na coluna é nítida, pois diferentes comportamentos das curvas de deslocamento são observados ao longo das posições 1, 2 e 3. Se a coluna fosse um corpo homogêneo, o deslocamento esperado deveria ser uniforme por conta do carregamento aplicado.

A ação da descontinuidade no comportamento da coluna é facilmente observada pelas curvas de deslocamento na direção y (Figura 5-14(b)). A posição 1 tem a forma de uma reta, comportamento que é esperado de uma coluna homogênea bidimensional submetida a um carregamento de compressão. Os deslocamentos ao longo da posição 2 são próximos àqueles determinados ao longo da posição 1, mas a forma muda de uma reta para uma curva suave ao longo da posição 2. Esta mudança de comportamento, compreendida no intervalo 1,00 a 3,00 m, reflete a influência da descontinuidade.

Ainda em relação à posição 2, o resultado obtido mostra que a introdução de uma condição nula de salto na extremidade da descontinuidade garante a continuidade do deslocamento neste ponto. O salto de deslocamento é visualizado nitidamente na posição 3. A descontinuidade parece agir como uma região mais deformável, possibilitando uma variação brusca de deslocamento.

Quanto ao deslocamento na direção x , exceto pela posição 1 onde há uma condição de contorno aplicada, pequenos deslocamentos são vistos ao longo das posições 2 e 3 (Figura 5-14(a)). Este resultado é interessante porque, novamente, mostra como a descontinuidade modifica o campo de deslocamento. Se a coluna fosse homogênea, o deslocamento na direção x em toda a coluna seria nulo ou desprezível.

Um comportamento que é, provavelmente, particular à coluna 1a é a simetria e antissimetria das curvas de deslocamento na direção x ao longo das posições 2 e 3 em relação à descontinuidade respectivamente. A forte variação destas curvas e a concordância dos resultados demonstram que o elemento enriquecido é perfeitamente capaz de capturar o comportamento descrito pela descontinuidade.

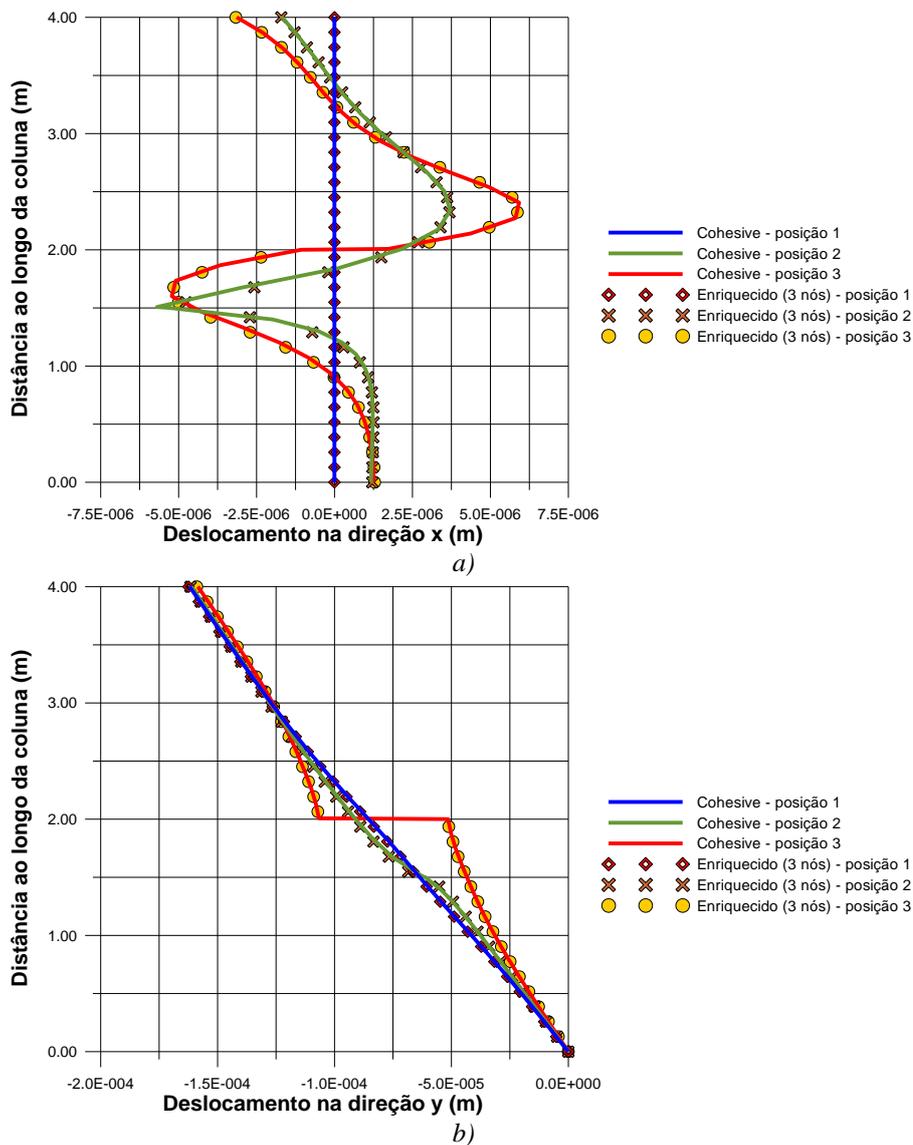


Figura 5-15: Curvas de deslocamento nas direções x e y ao longo das posições 1, 2 e 3 obtidas pelos elementos cohesive e enriquecido (com 3 nós) para a coluna 2a

Ao mudar a inclinação da descontinuidade (ω) de 0° para 45° (coluna 2a), o comportamento das curvas de deslocamento na direção x muda completamente como ilustrado na Figura 5-15(a). O deslocamento ao longo da posição 2 deixa de ser simétrico e passa a ter uma forma qualquer. A única característica preservada é

o pico de deslocamento na extremidade da descontinuidade (distância 1,50 m). O mesmo ocorre com a curva de deslocamento ao longo da posição 3 que deixa de ser antissimétrica.

Um ponto que deve ser destacado na Figura 5-15(a) é que, ao aumentar a inclinação (ω), todas as curvas de deslocamento obtidas pelo elemento enriquecido e *cohesive* passam a ser idênticas. Em especial, os valores de deslocamento ao longo da posição 3 aumentaram e deixaram de ser nulos em relação ao que foi visto na Figura 5-14(a). Este comportamento é outro indício de que a diferença observada na Figura 5-14(a) pode estar relacionada simplesmente a um resíduo numérico.

A mesma concordância de resultados ocorre para o deslocamento na direção y da coluna 2a como ilustrado na Figura 5-15(b). Porém, ao mudar a inclinação de 0° para 45°, o comportamento e os valores das curvas de deslocamento permaneceram os mesmos. Este fato pode ser associado ao parâmetro r_{ns} pertencente à matriz constitutiva da descontinuidade D_f (equação 3.19).

Ao definir a rigidez r_{ns} ou r_{sn} como um valor nulo garante-se que o salto de deslocamento em uma direção não é afetado pela força de superfície na direção normal à primeira. É por esta razão que, ao girar a descontinuidade e propiciar um aumento na força de superfície tangencial à descontinuidade, nenhum acréscimo no salto de deslocamento na direção y pôde ser notado.

Cabe lembrar que a imposição de um valor nulo para o parâmetro r_{ns} visa simplesmente facilitar a relação entre as propriedades do elemento CPE4P com as propriedades de rigidez da descontinuidade descrita no apêndice D. Não se trata de uma limitação da formulação do elemento enriquecido.

Considerando apenas à equação de equilíbrio mecânico desacoplada, os resultados das curvas de deslocamento ilustrados nas figuras 5-14 e 5-15 não deixam dúvidas de que o elemento enriquecido é capaz de reproduzir a resposta mecânica de um modelo numérico em que a descontinuidade é discretizada.

A título de ilustração a coluna 2a é modelada novamente com os elementos enriquecido com 5 nós e CPE4. A Figura 5-16, página 135, mostra os deslocamentos na direção x e y determinados pelo elemento enriquecido com 5 nós. O resultado obtido pelo elemento enriquecido com 5 nós foi o mesmo do elemento *cohesive*. Isto permite dizer que as duas aproximações de elemento

enriquecido com 3 e 5 nós têm desempenhos idênticos na modelagem de problemas mecânicos desacoplados.

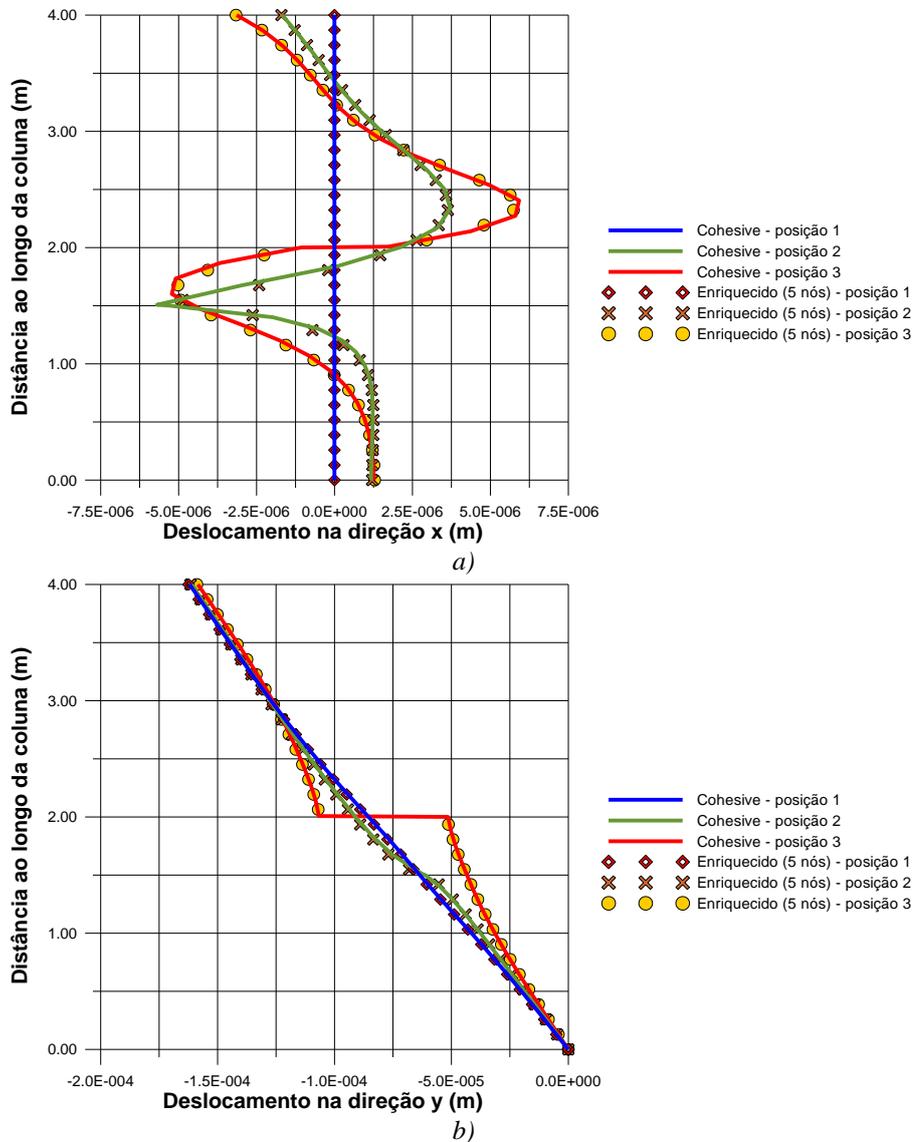


Figura 5-16: Curvas de deslocamento nas direções x e y ao longo das posições 1, 2 e 3 obtidas pelos elementos cohesive e enriquecido (com 5 nós) para a coluna 2a

A Figura 5-17, página 136, ilustra uma comparação entre os elementos CPE4 e enriquecido com 3 nós. Duas observações podem ser feitas. A primeira observação é a de que a relação dos parâmetros de material do elemento CPE4 e rigidez da descontinuidade do apêndice D funciona bem para um problema mecânico em que não há abordagem de acoplamento. Os baixos valores de módulo de Young e cisalhamento aumentam a deformabilidade do elemento

CPE4 fazendo com que ele reproduza um salto de deslocamento similar àqueles determinados pelos elementos *cohesive* e enriquecido.

A segunda observação é que, para a equação de equilíbrio mecânica desacoplada, a resposta do elemento CPE4 é idêntica ou, senão, muito próxima a do elemento enriquecido. A existência de uma componente adicional de deslocamento e tensão no elemento CPE4 (direção tangencial à descontinuidade), aparentemente, não comprometeu a resposta. Especificamente, isto mostra que a matriz de rigidez do elemento enriquecido (equação 3.27) está bem formulada e reproduz com fidelidade o salto de deslocamento através da descontinuidade. A relevância deste resultado será explicitada no exemplo de acoplamento fluido-mecânico, seção 5.3.3.

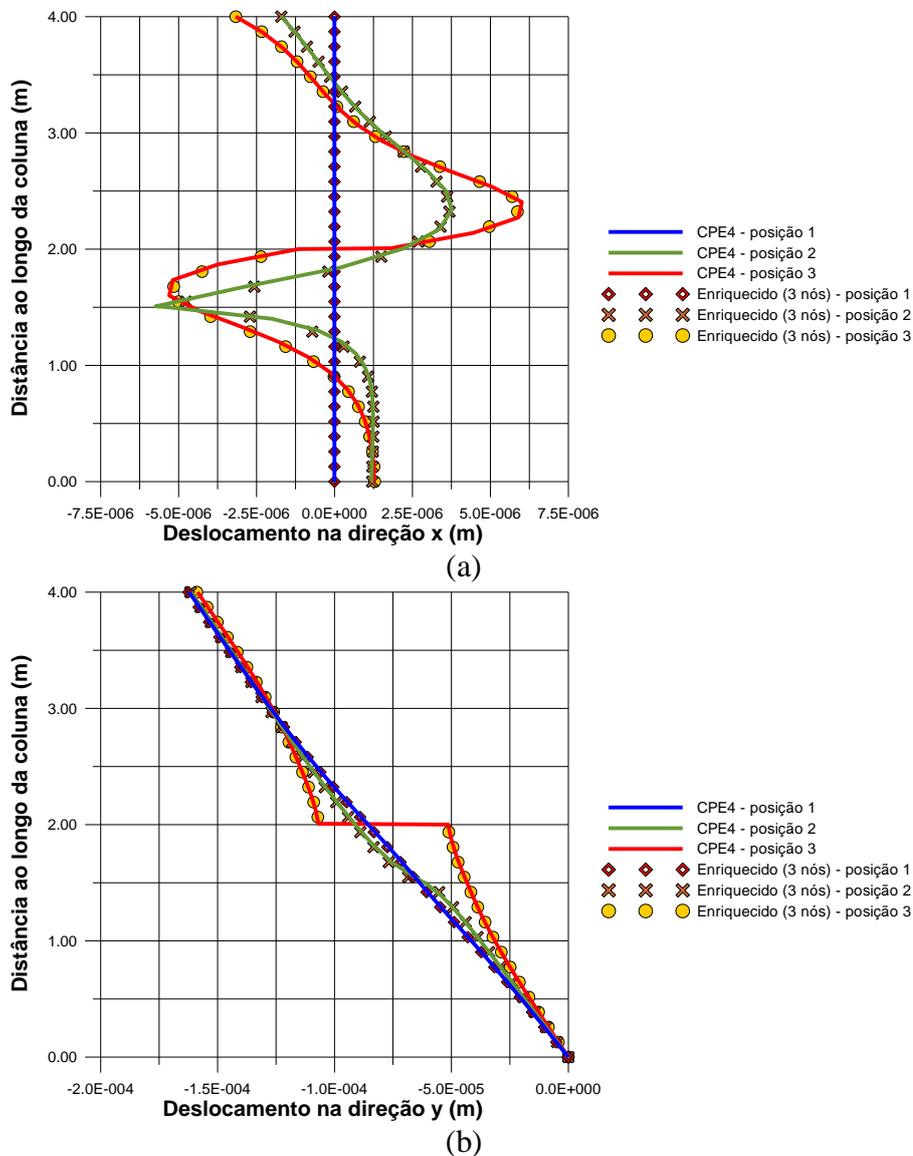


Figura 5-17: Curvas de deslocamento nas direções x e y ao longo das posições 1, 2 e 3 obtidas pelos elementos CPE4 e enriquecido (com 3 nós) para a coluna 2a

A Figura 5-18 ilustra os mapas de deslocamento na direção y e determinados pelos elementos CPE4P e enriquecido. A região onde se localiza a descontinuidade é vista facilmente pela rápida mudança de cores no centro da coluna. A mesma concordância de resultados observada nas curvas de deslocamento, previstas pelos elementos *cohesive* e enriquecido, é obtida nos mapas de deslocamento.

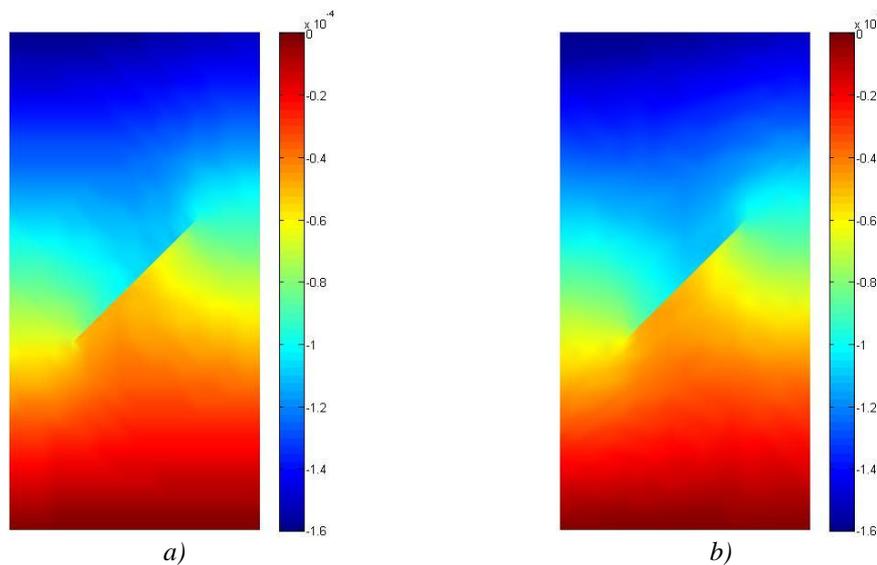


Figura 5-18: Mapas de deslocamento na direção y da coluna 2a: (a) enriquecido com 3 nós, (b) *cohesive*

5.3.2.

Fluxo de fluido em uma coluna de arenito com uma descontinuidade inserida

Diferentemente da formulação mecânica, a formulação de fluxo do elemento enriquecido faz uso de duas matrizes: fluxo e armazenamento. Para facilitar a identificação de possíveis limitações em cada matriz, dois exemplos são ilustrados. O primeiro exemplo considera o fluxo em regime permanente. Esta condição permite verificar se a formulação da matriz de permeabilidade está bem estabelecida e se o elemento enriquecido reproduz a influência da inclinação (ω) e da espessura (e) da descontinuidade sobre o campo de poro-pressão.

Reconhecidas possíveis limitações em relação à matriz de fluxo, o segundo exemplo procura avaliar a formulação da matriz de armazenamento do elemento enriquecido através da definição do fluxo em regime transiente. O interesse, neste

caso, é saber se a resposta de poro-pressão através do tempo é reproduzida adequadamente pelo elemento enriquecido.

Nos dois exemplos a resposta do elemento CPE4P é colocada como referência para comparação. O uso da permeabilidade como parâmetro físico foi o fator determinante pela seleção dele. Além da equivalência de propriedades, outro fator que pesou na escolha do elemento CPE4P é a definição do coeficiente LO do elemento *cohesive*.

Segundo a documentação do ABAQUS, o coeficiente *Leak off* (LO) é igual à divisão do fluxo na direção normal ao elemento *cohesive* pela metade da diferença de poro-pressão na mesma direção. Isto sugere que o LO pode ser variável no regime transiente uma vez que o fluxo e a diferença de poro-pressão também variam neste regime. Adotar um valor constante poderia ser um erro nesta condição. Por esta razão, o elemento *cohesive* é utilizado como segunda opção de comparação e, mesmo assim, apenas na condição de fluxo em regime permanente.

5.3.2.1. Regime permanente

O exemplo consiste na modelagem de uma coluna de arenito submetida a um fluxo prescrito (q) de 1×10^{-7} m/s como ilustrado na Figura 5-19, página 139. A poro-pressão é restringida a zero na base da coluna. A coluna possui uma descontinuidade no seu interior com inclinação (ω) em relação ao eixo x e espessura (e). A coluna é formada por um arenito isotrópico (arenito Weber), enquanto a descontinuidade é formada por um material anisotrópico. Os parâmetros de material do arenito e da descontinuidade são listados na Tabela 5-3. O fluido no meio poroso possui uma viscosidade (μ) de 50 cP, peso específico (γ) de 8 KN/m³ e um módulo de variação volumétrica (K_f) de 3,3 GPa.

Tabela 5-3: Parâmetros da coluna de arenito submetida a um fluxo prescrito

Arenito		Descontinuidade	
k (mD)	1,00	k_n (mD)	0,001
ϕ	0,06	k_t (D)	10,00
Ks (GPa)	36,00	ϕ	0,06
***	***	Ks (GPa)	36,00

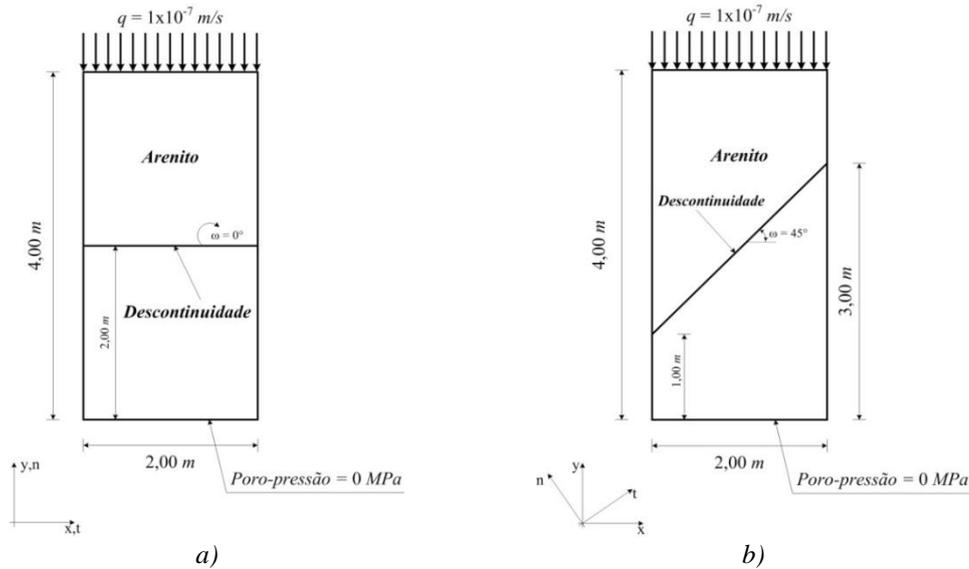


Figura 5-19: Coluna de arenito submetida a um fluxo prescrito: a) coluna 1b, b) coluna 2b

Diferentemente do problema mecânico, nenhuma condição de salto de poro-pressão é prescrita nas extremidades da descontinuidade. A condição de salto zero é empregada quando a extremidade da descontinuidade é totalmente cercada por outro material ou meio, garantindo a continuidade do campo de poro-pressão para os elementos que não são cortados por uma descontinuidade. Como nestes exemplos as extremidades estão localizadas sobre as faces da coluna, nenhuma condição de salto zero é necessária.

Quanto às permeabilidades k_n e k_t , é provável que não exista em materiais geológicos uma anisotropia tão acentuada quanto à definida neste exemplo. A adoção destes valores simplesmente procura ilustrar a capacidade do elemento enriquecido em trabalhar com o fluxo tangencial e normal simultaneamente. Quanto à Figura 5-19, a identificação das colunas pelos nomes 1b e 2b segue a mesma convenção estabelecida no exemplo mecânico.

Da mesma forma que no exemplo mecânico, três malhas foram usadas na modelagem de fluxo de fluido conforme ilustrado na Figura 5-20, página 140. Elas correspondem à malha 6 do estudo de refinamento (apêndice A). As figuras 5-20(a) e 5-20(c) ilustram a malha gerada pelo GiD para a modelagem das colunas 1b e 2b. Ela possui 2256 elementos e 1200 nós. A Figura 5-20(b) mostra a malha da coluna 1b gerada pelo ABAQUS, enquanto a Figura 5-20(d) mostra a malha associada à coluna 2b. As duas malhas do ABAQUS possuem 1128 elementos e 1200 nós. A linha tracejada na cor vermelha indica a posição aproximada da

descontinuidade. Novamente, destaca-se o uso de apenas uma malha pelo elemento enriquecido.

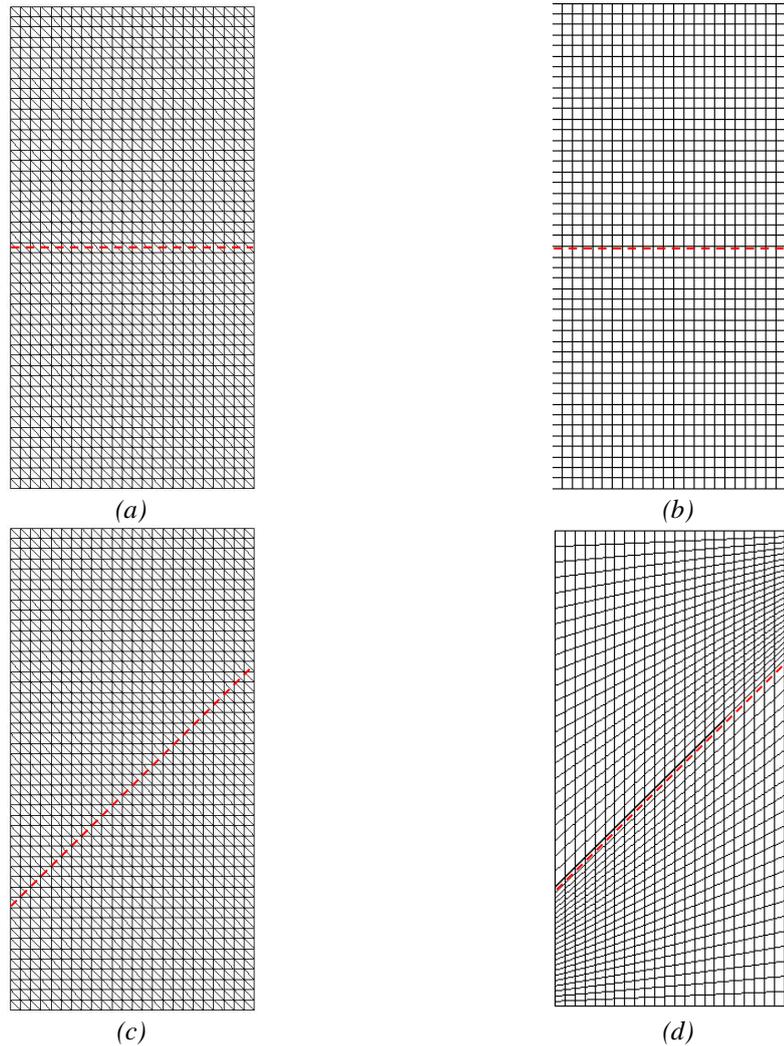


Figura 5-20: Malhas geradas: a) GiD para a coluna 1b, b) ABAQUS-CAE para a coluna 1b, c) GiD para a coluna 2b, d) ABAQUS-CAE para a coluna 2b

Para modelar o fluxo através da coluna de arenito no ABAQUS foram utilizados os elementos CPE4P e *cohesive* no ABAQUS. O programa ABAQUS não disponibiliza o elemento CST para o fluxo ou acoplamento fluido-mecânico. A Tabela 5-4 lista os valores de *Leak off* e *Gap Flow* do elemento *cohesive* empregados de acordo com a espessura da descontinuidade.

Tabela 5-4: Coeficientes de *Leak off* e *Gap flow* para o elemento *cohesive*.

Espessura (mm)	<i>Leak off</i> ((m/s)/MPa)	<i>Gap Flow</i> (s x MPa)
1,00	$3,948 \times 10^{-8}$	5×10^{-8}
5,00	$7,895 \times 10^{-9}$	5×10^{-8}
10,00	$3,948 \times 10^{-9}$	5×10^{-8}

Como no exemplo mecânico, três posições na coluna de arenito foram selecionadas para medição de poro-pressão. Essas posições são as mesmas indicadas na Figura 5-13.

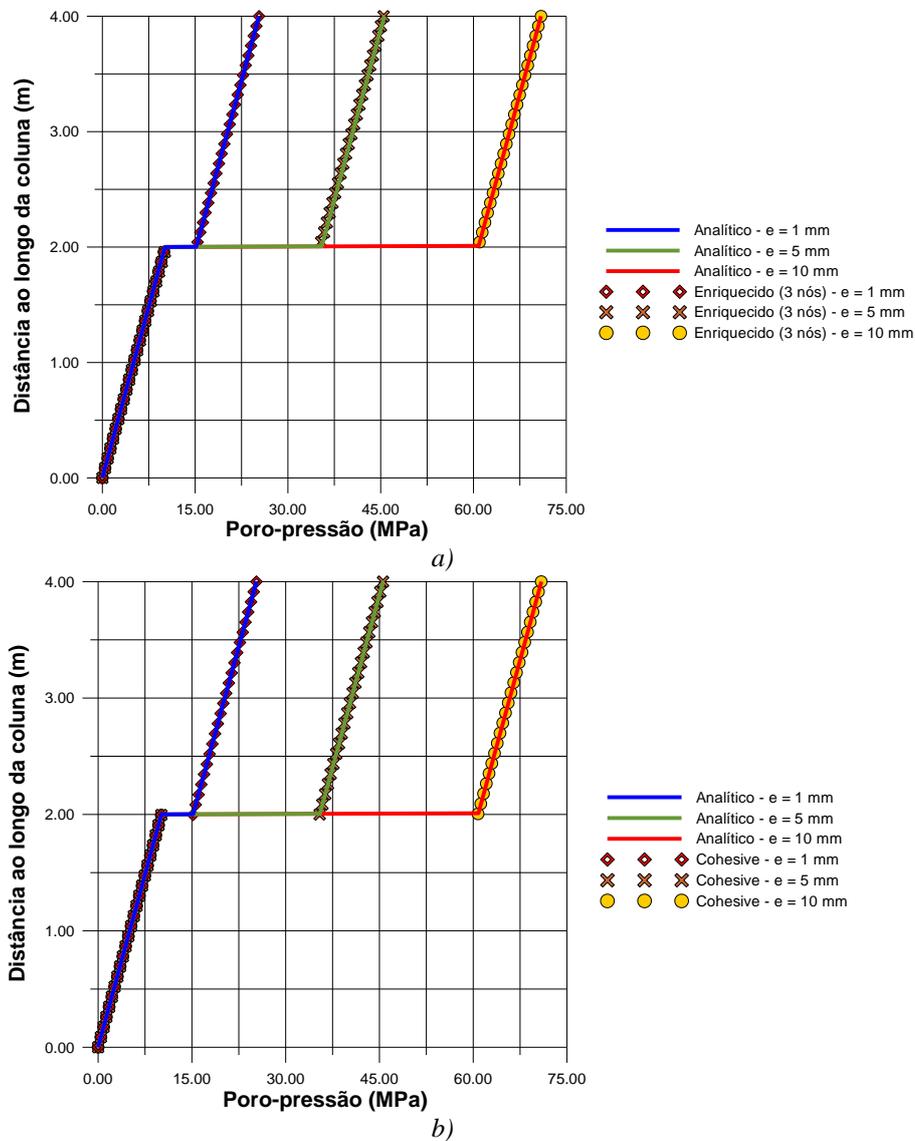


Figura 5-21: Curvas de poro-pressão para a coluna 1b: (a) elemento enriquecido (com 3 nós), (b) elemento cohesivo

A primeira característica do elemento enriquecido a ser ilustrada é a sua capacidade em considerar a espessura da descontinuidade. A Figura 5-21(a) mostra o resultado da modelagem numérica da coluna 1b onde espessuras de 1, 5 e 10 mm foram adotadas. Pelo fato da descontinuidade cortar toda a coluna e ser perpendicular ao fluxo imposto, uma condição de fluxo unidimensional é estabelecida. Esta condição permite que a solução analítica de poro-pressão

descrita no apêndice C seja utilizada, dispensando a comparação com o elemento CPE4P.

Como esperado para o fluxo unidimensional, as curvas de poro-pressão ao longo da coluna 1b são retas apresentando um salto de poro-pressão na distância igual a 2,00 m (descontinuidade). Tomando a base da coluna como distância igual a 0 m e observando a resposta obtida pela solução analítica (indicada pelas curvas em linha cheia), percebe-se facilmente que o salto de poro-pressão aumenta com a espessura da descontinuidade.

A concordância vista entre a resposta do elemento enriquecido, indicada pelas curvas em ponto na Figura 5-21(a), e a solução analítica mostra que a lei de fluxo através da descontinuidade estabelecida na expressão (3.29) está correta. Além disto, o resultado não deixa dúvidas de que a espessura da descontinuidade pode ser facilmente descrita pelo elemento enriquecido.

A Figura 5-21(b) mostra o resultado da modelagem da coluna 1b utilizando o elemento *cohesive*. A boa concordância entre as respostas numérica e a analítica mostra que a relação entre o coeficiente LO e a permeabilidade normal à descontinuidade parece apropriada. Ao comparar as figuras 5-21(a) e 5-21(b), observa-se claramente que a resposta dos elementos *cohesive* e enriquecido são iguais para a coluna 1a.

Visto que a espessura da descontinuidade é facilmente inserida no elemento enriquecido, o próximo passo é avaliar se o elemento reproduz o efeito da inclinação (ω) sobre o campo de poro-pressão. A Figura 5-22, página 143, mostra as curvas de poro-pressão determinadas pelos elementos CPE4P e enriquecido para a coluna 2b. Somente a espessura (e) de 5 mm foi adotada para a descontinuidade.

Tomando a curva de poro-pressão descrita pelo elemento CPE4P como referência, indicada pela curva em linha cheia, nota-se uma ótima concordância entre as respostas dos dois elementos. Independentemente da posição onde a poro-pressão é medida, o salto de poro-pressão obtido pelo elemento enriquecido foi praticamente idêntico à diferença de poro-pressão determinada pelo elemento CPE4P.

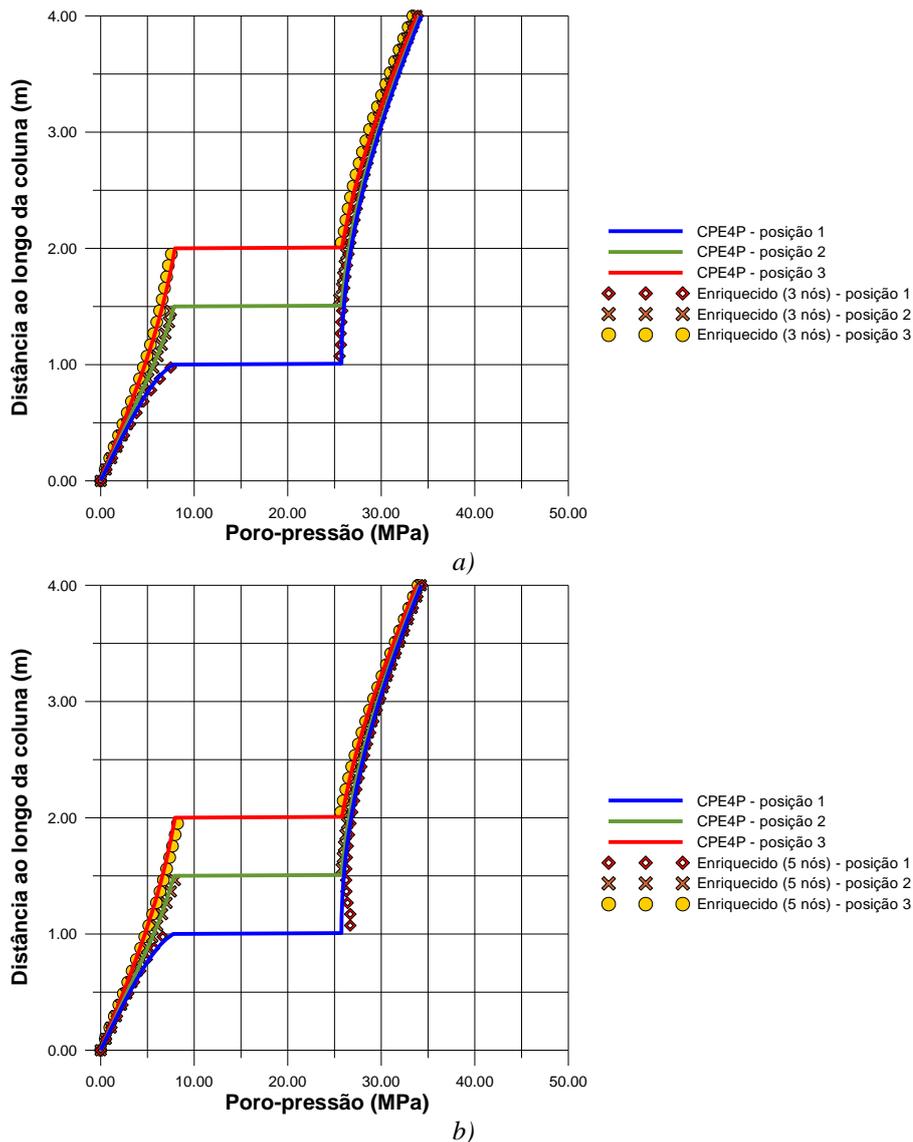


Figura 5-22: Curvas de poro-pressão para a coluna 2b: a) enriquecido com 3 nós, b) enriquecido com 5 nós

Uma característica peculiar das curvas de poro-pressão ao longo das posições 1, 2 e 3 na Figura 5-22 é a similaridade entre elas. Nota-se que os saltos de poro-pressão ao longo das três posições são próximos, para não falar idênticos. Possivelmente, este comportamento está ligado ao fato da descontinuidade cortar toda a coluna.

A ótima concordância entre os resultados dos elementos CPE4P e enriquecido, ilustrados nas figuras 5-21(a) e 5-22, sugere que a matriz de fluxo do elemento enriquecido está bem formulada. Além disto, para o caso de regime permanente, as duas aproximações de fluxo do elemento enriquecido conseguiram reproduzir fielmente a resposta de um modelo numérico em que a descontinuidade é discretizada.

Deve-se ressaltar que neste exemplo não foi possível observar uma diferença entre as respostas de poro-pressão dos elementos enriquecidos com 3 e 5 nós, mesmo utilizando uma permeabilidade tangencial muito alta. Em parte, isto se deve ao bom refinamento da malha que reduziu significativamente o efeito da interpolação do grau de liberdade de poro-pressão da descontinuidade (mencionado no capítulo 3).

Outro fator que pode ter minimizado o efeito da interpolação é o modo como a descontinuidade corta a coluna. Devido ao fluxo prescrito ser uniforme e a descontinuidade atravessar a coluna de uma face à outra, uma condição similar ao fluxo unidimensional foi obtida. Esta condição de fluxo pode ter suavizado a diferença esperada entre as duas aproximações do elemento enriquecido.

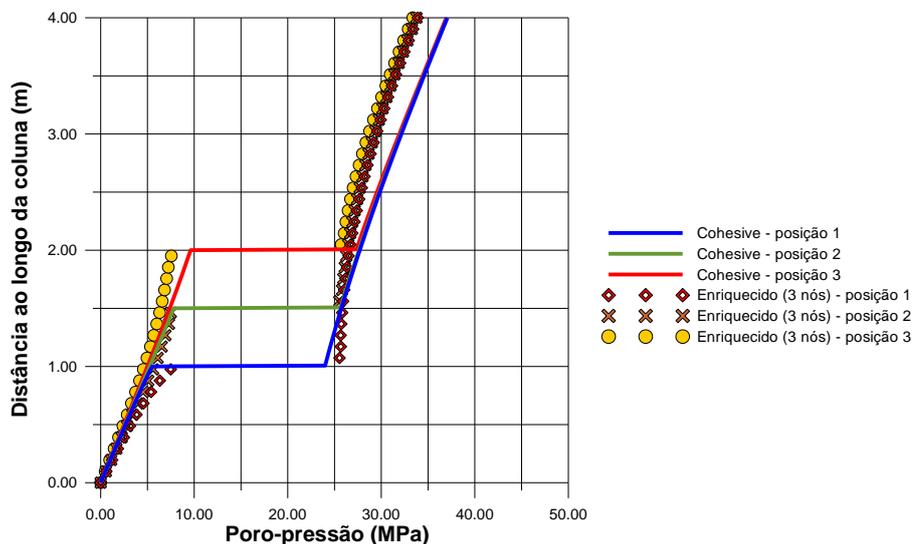


Figura 5-23: Curvas de poro-pressão obtidas pelos elementos *cohesive* e enriquecido com 3 nós para a coluna 2b

A coluna 2b foi modelada novamente com o elemento *cohesive* e a resposta obtida comparada à do elemento enriquecido com 3 nós. A Figura 5-23 ilustra as curvas de poro-pressão determinadas pelos dois elementos.

Diferente da coluna 1a, não se observa a mesma concordância de resultados entre os elementos *cohesive* e enriquecido na Figura 5-23. Os valores de salto de poro-pressão são muito parecidos ao longo das posições 1 a 3, mas o formato das curvas de poro-pressão diverge um pouco. Além disto, a poro-pressão no topo da coluna determinada pelo elemento *cohesive* é maior do que o valor previsto pelo elemento enriquecido.

A diferença de respostas vista na Figura 5-23 provavelmente está ligada ao fluxo tangencial à descontinuidade. Ao mudar a inclinação (ω) de 0 para 45°, a descontinuidade passou a exibir fluxo na direção tangencial, situação que não ocorria na coluna 1b. Para o propósito de modelar uma descontinuidade com material de preenchimento, este resultado sugere que o elemento *cohesive*, através do coeficiente *Gap Flow*, não é apropriado para representar o fluxo tangencial.

Deve-se lembrar de que o elemento *cohesive* não foi idealizado para representar propriamente o fluxo em um meio poroso, mas, sim, o fluxo em uma fratura em uma operação de fraturamento hidráulico. A modelagem de fluxo com o elemento *cohesive* foi introduzida simplesmente para verificar a proximidade das respostas de poro-pressão dos elementos *cohesive*, CPE4P e enriquecido.

Apesar da aparente limitação do elemento *cohesive* na reprodução do fluxo tangencial, a equivalência da descrição do comportamento mecânico feita pelos elementos *cohesive* e enriquecido, aliada à boa representação do fluxo normal (Figura 5-21(b)), permite que o elemento *cohesive* ainda seja empregado em algumas observações a respeito da formulação acoplada do elemento enriquecido.

5.3.2.2. Regime transiente

O exemplo consiste na modelagem de uma coluna de arenito submetida a um processo de drenagem. A coluna possui uma poro-pressão inicial de 2 MPa e, a partir do instante 0 segundos, uma poro-pressão nula é aplicada no topo dela como ilustrado na Figura 5-24, página 146. A coluna é cortada por uma descontinuidade com uma inclinação (ω) de 45° em relação ao eixo x e uma espessura (e) de 5 mm. Os parâmetros de material do arenito e da descontinuidade são listados na Tabela 5-5. O fluido no meio poroso possui uma viscosidade (μ) de 50 cP, peso específico (γ) de 8 KN/m³ e um módulo de variação volumétrica (K_f) de 3,3 GPa. Nenhuma condição de salto de poro-pressão é aplicada nas extremidades da descontinuidade. A integração ao longo do tempo usou um incremento de tempo constante e igual a 500 s.

Tabela 5-5: Parâmetros de material para a coluna em regime de fluxo transiente

Arenito		Descontinuidade			
		Caso I		Caso II	
k (mD)	1,00	k_n (mD)	0,001	k_n (D)	1,00
ϕ	0,06	k_t (mD)	0,01	k_t (D)	10,00
Ks (GPa)	36,00	ϕ	0,06	ϕ	0,19
***	***	Ks (GPa)	36,00	Ks (GPa)	36,00

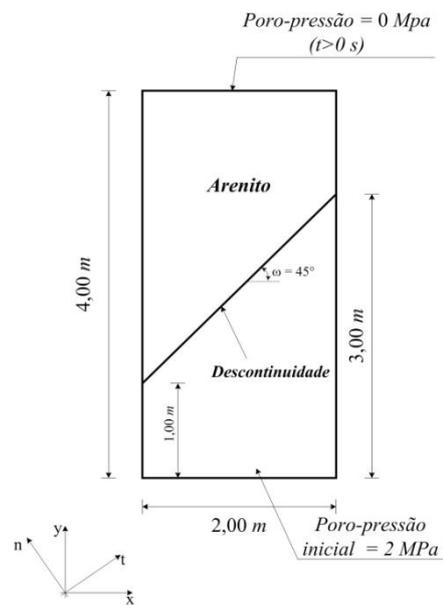
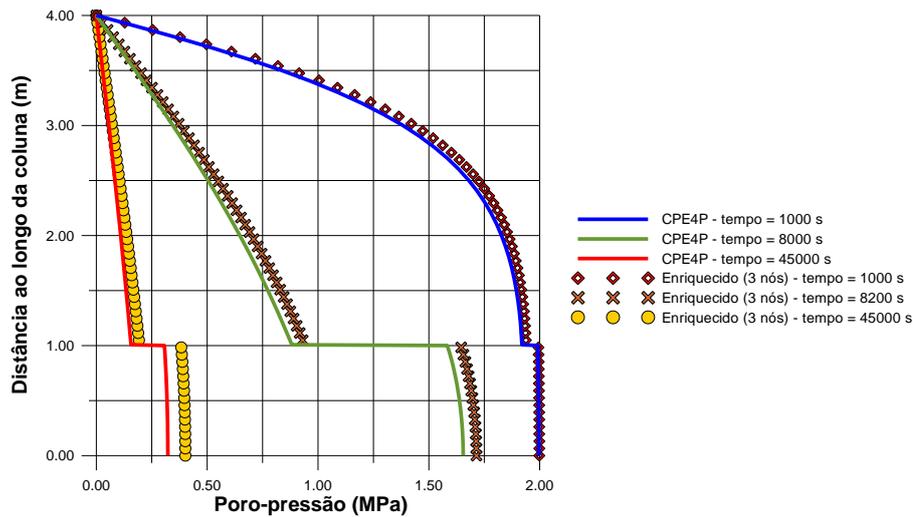


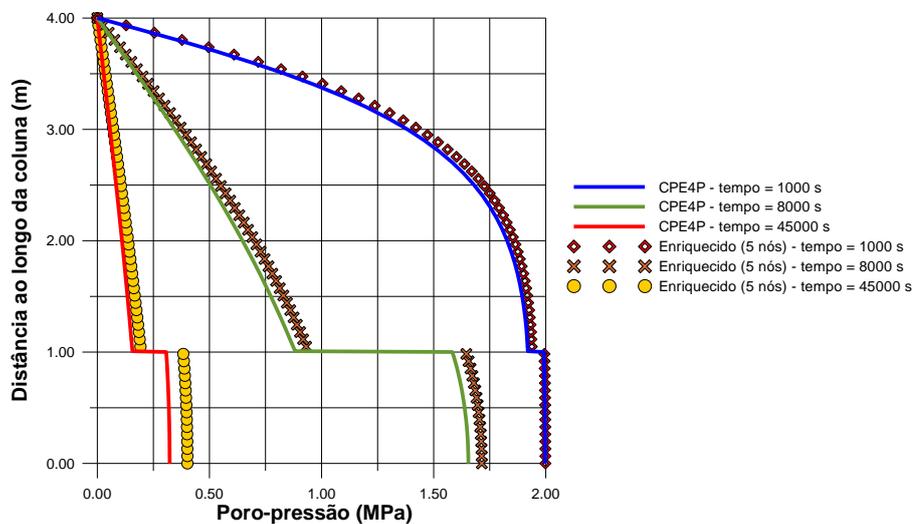
Figura 5-24: Coluna de arenito submetida a um processo de drenagem

Duas situações são ilustradas neste exemplo. A primeira situação impõe à descontinuidade uma permeabilidade menor do que a do meio poroso ao seu redor, a segunda impõe à descontinuidade uma permeabilidade maior. Para facilitar a descrição no texto, identifica-se a primeira situação por caso I, a segunda situação por caso II.

Ainda referente à propriedade de material, o parâmetro s da equação (3.13) é trocado pelo parâmetro (s) da expressão (4.16) na modelagem com o elemento enriquecido. A razão disto é que o programa ABAQUS modela o fluxo de fluido em um meio poroso como um problema de acoplamento fluido-mecânico onde todos os graus de liberdade de deslocamento são restringidos. Os parâmetros mecânicos utilizados aqui são os mesmos listados na Tabela 5-2.



a)



b)

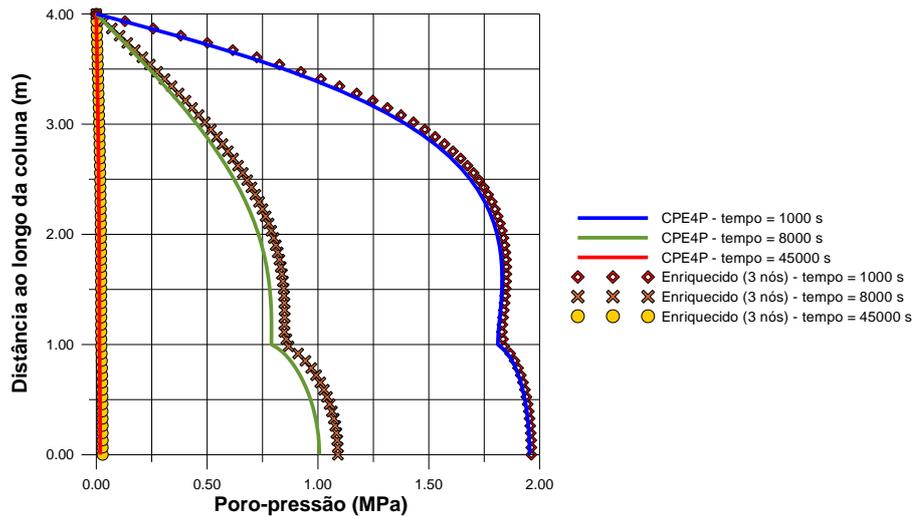
Figura 5-25: Curvas de poro-pressão obtidas pelo elemento enriquecido para o caso I: a) 3 nós, b) 5 nós

No que concerne ao incremento de tempo observou-se que não é possível adotar qualquer valor na modelagem com o elemento enriquecido com 5 nós. Para um incremento muito pequeno, a resposta de poro-pressão obtida pelo elemento enriquecido com 5 nós apresenta picos de poro-pressão muito altos (ordem de dezena de vezes) nos primeiros tempos da simulação. Estes picos foram evitados simplesmente aumentando o incremento de tempo da simulação. Seguindo este procedimento e considerando o refinamento da malha, as respostas de poro-pressão obtidas pelos elementos enriquecidos com 3 e 5 foram sempre idênticas.

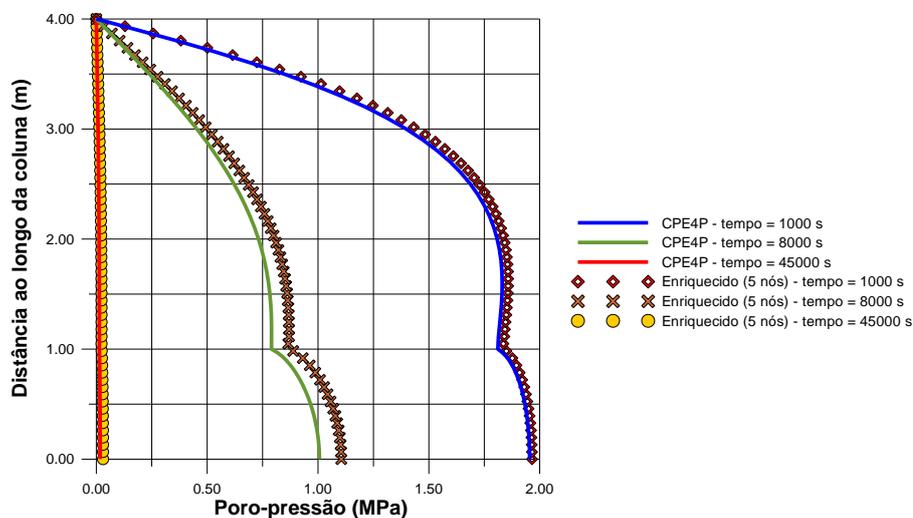
As malhas utilizadas neste exemplo são as mesmas das figuras 5-20(c) e 5-20(d). Quanto à comparação dos resultados obtidos pelos elementos CPE4P e

enriquecido, os valores de poro-pressão são lidos apenas na posição 1 (Figura 5-13).

A Figura 5-25 mostra a curva de poro-pressão ao longo da posição 1 para o caso I. Como no exemplo de fluxo em regime permanente, a resposta do elemento enriquecido (com 3 ou 5 nós) é muito próxima a do elemento CPE4P. Para o tempo de 1000 s, a resposta dos dois elementos foi praticamente idêntica.



a)



b)

Figura 5-26: Curvas de poro-pressão obtidas pelo elemento enriquecido para o caso II: (a) 3 nós, (b) 5 nós

Para os tempos de 1000 s e 8000 s, observa-se que a parte acima da descontinuidade (distância de 1,00 m) apresenta uma redução de poro-pressão maior e mais rápida do que a parte abaixo da descontinuidade. Isto provavelmente

está associado ao fato da descontinuidade agir de modo similar a uma barreira. Esta diferença na variação de poro-pressão, abaixo e acima da descontinuidade, explica o aumento do salto de poro-pressão entre o intervalo de tempo de 1000 até 8000 s.

À medida que o tempo aumenta, a poro-pressão ao longo da coluna tende a se aproximar do valor de poro-pressão prescrita no topo da coluna. A curva de poro-pressão para o tempo de 45000 s reflete este comportamento, tanto a região acima como abaixo da descontinuidade apresentam valores próximos de 0 MPa.

O aumento do tempo não interfere somente no valor de poro-pressão ao longo da coluna. Nota-se que os valores de poro-pressão obtidos pelos elementos CPE4P e enriquecido afastam-se ligeiramente à medida que o tempo aumenta. Apesar desta pequena diferença, o comportamento descrito pelas curvas é idêntico. Provavelmente, a diferença está associada ao valor do parâmetro de armazenamento (s).

A Figura 5-26 mostra a curva de poro-pressão ao longo da posição 1 para a situação em que a descontinuidade é um meio condutor (caso II). Do mesmo modo que no caso I, a resposta do elemento enriquecido (com 3 ou 5 nós) é muito próxima a do elemento CPE4P. Até mesmo para o tempo de 1000 s, a mesma concordância de resultados foi obtida.

Diferentemente do caso I, ao impor uma permeabilidade alta, a descontinuidade passa a agir como um meio condutor permitindo uma redução de poro-pressão mais rápida ao longo de toda a coluna. Esta situação é facilmente identificada ao ler os valores de poro-pressão na base da coluna. Observando-se a curva de poro-pressão do elemento CPE4P para o tempo de 8000 s, a poro-pressão mudou de 1,65 MPa (caso I) para 1,00 MPa (caso II). Para o tempo de 45000s, a poro-pressão já foi totalmente dissipada.

O salto de poro-pressão visto no caso I deixa de existir e dá lugar a uma transição contínua de poro-pressão. O formato em v da curva de poro-pressão, próximo à distância de 1,00 m, é um efeito do aspecto de material condutor que a descontinuidade assumiu. Deve-se atentar que as duas aproximações de elemento enriquecido com 3 e 5 nós conseguiram capturar este efeito. Ressaltando-se que o desempenho dos dois elementos foi igual devido ao refinamento de malha adotado.

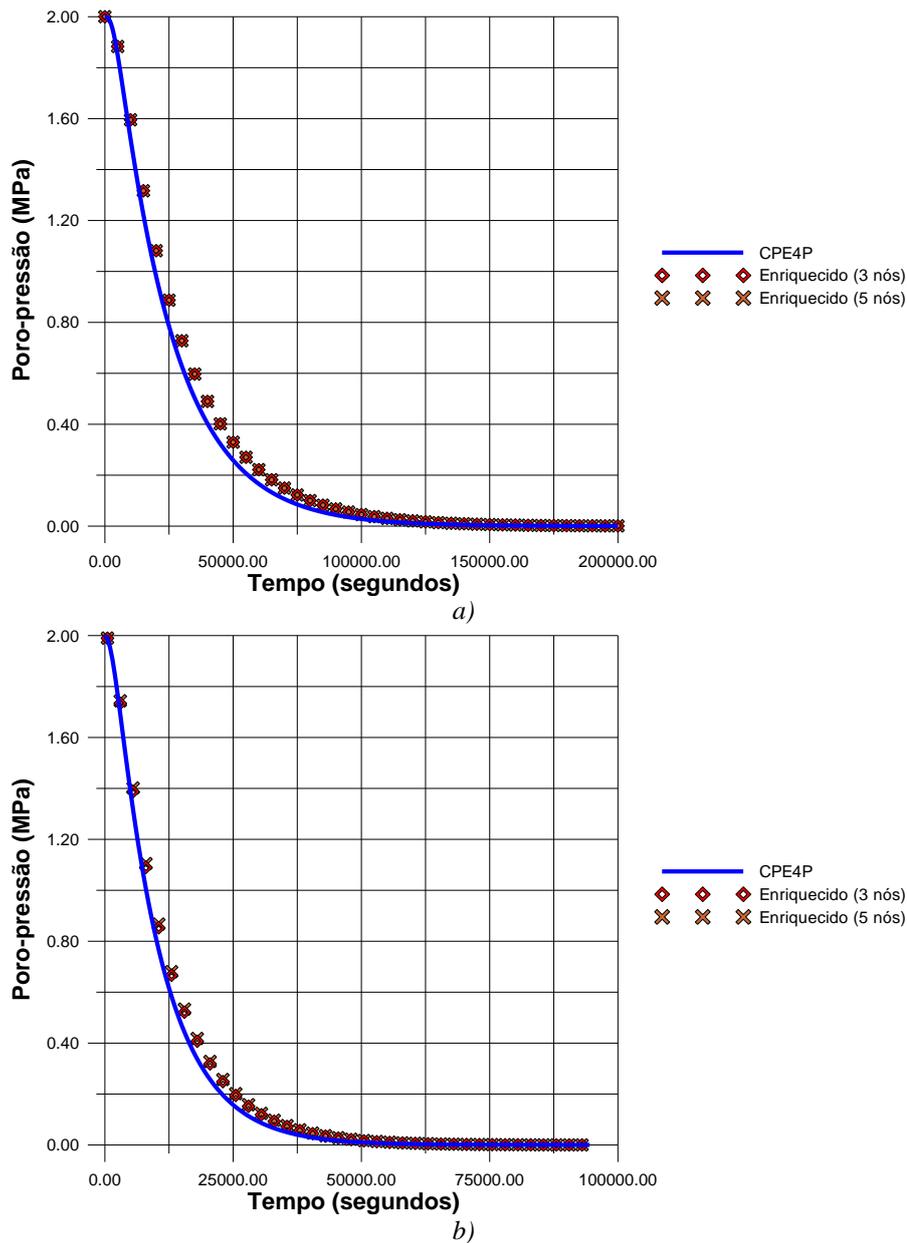


Figura 5-27: Curva de poro-pressão ao longo do tempo na base da coluna: (a) caso I, (b) caso II

De forma similar ao caso I, um ligeiro afastamento dos valores de poro-pressão obtidos pelos elementos CPE4P e enriquecido é percebido à medida que o tempo aumenta. O afastamento é pequeno e não influencia o comportamento das curvas de poro-pressão. Como visto nas figuras 5-25 e 5-26, a mudança dos valores de permeabilidade na descontinuidade não alterou o paralelismo entre as curvas de poro-pressão determinadas pelos dois elementos.

Além disto, o paralelismo das curvas de poro-pressão ilustrado nas figuras 5-25 e 5-26 mostrou que a matriz de armazenamento do elemento enriquecido consegue capturar o salto de poro-pressão ao longo do tempo.

Este fator junto à boa concordância de resultados conseguida no exemplo fluxo em regime permanente elimina qualquer possibilidade de limitação ou erro na formulação da matriz de fluxo do elemento enriquecido. Isto sugere que a diferença de resultados está associada provavelmente ao valor do parâmetro de armazenamento (s), pois ele é que determina a variação de poro-pressão com o tempo.

Observando as curvas de poro-pressão descritas nos casos I e II, o parâmetro s do elemento enriquecido parece ser um pouco maior do que o utilizado pelo elemento CPE4P. Porém, isto afeta pouco a resposta de poro-pressão ao longo do tempo. A Figura 5-27 ilustra a variação de poro-pressão ao longo do tempo para o ponto localizado na base da coluna (distância 0 m, posição 1) para os casos I e II. Nota-se que a resposta de poro-pressão determinada pelas duas aproximações de elemento enriquecido afasta-se pouco daquela determinada pelo elemento CPE4P.

Face aos resultados descritos no exemplo de fluxo transiente, pode-se dizer que a matriz de armazenamento do elemento enriquecido foi estabelecida de modo apropriado e satisfatório. Há uma leve diferença de resultados, mas ela não compromete a eficiência do elemento na representação do fluxo através de uma descontinuidade. Cabe mencionar que esta diferença é até normal, pois, a princípio, o elemento enriquecido não seguiu as hipóteses da formulação do elemento CPE4P.

5.3.3.

Coluna de arenito submetida a um fluxo de fluido em uma condição de acoplamento fluido-mecânico

Até o momento, a segunda seção do capítulo de resultados apresentou exemplos de problemas mecânicos e de fluxo de fluido desacoplados. Esta sequência de exemplos foi útil, pois permitiu testar separadamente a componente mecânica e de fluxo da formulação acoplada do elemento enriquecido. Considerando-se a forma matricial do elemento enriquecido acoplado, os exemplos apresentados permitiram analisar três das quatro submatrizes que o formam.

Neste item, aplicações que envolvam o acoplamento fluido-mecânico são ilustradas e as diferenças encontradas entre os modelos numéricos que utilizam os elementos CPE4P, *cohesive* e enriquecido poderão ser associadas de modo mais claro e direto ao termo de acoplamento.

Duas aplicações com acoplamento fluido-mecânico são modeladas: uma para o regime permanente e outra para o transiente. No que se refere à aplicação com o regime permanente, o arenito Weber é substituído pelo Berea. A troca foi necessária porque a modelagem com o elemento *cohesive* apresentou problemas de convergência ao usar o arenito Weber. Porém, a troca de materiais não traz nenhum prejuízo à comparação entre os elementos. Apenas a resposta do elemento enriquecido com 3 nós será ilustrada, mas todas as observações feitas são válidas para o elemento enriquecido com 5 nós.

A modelagem do acoplamento fluido-mecânico seguiu o *default* do ABAQUS. Por *default*, o ABAQUS utiliza excesso de poro-pressão e tensão efetiva para modelar o acoplamento fluido-mecânico. Para usar valores de tensão total e poro-pressão é necessário adicionar forças de massa. Optou-se por seguir o default do ABAQUS a fim de limitar o número de carregamentos aplicados e facilitar a interpretação de qualquer diferença de resultados que venha a ocorrer.

5.3.3.1. Regime de fluxo permanente

O exemplo consiste na modelagem de uma coluna de arenito submetida a um fluxo ascendente prescrito (q) de 5×10^{-5} m/s como ilustrado na Figura 5-28, página 153. O deslocamento é restringido na direção x ao longo das faces da coluna e na direção y na base da coluna. A poro-pressão na base é 5 MPa, mas a condição prescrita na modelagem é um valor nulo de excesso de poro-pressão. A coluna possui uma descontinuidade no seu interior com uma espessura (e) de 5 mm e uma inclinação (ω) em relação ao eixo x . O arenito é um material linear elástico isotrópico (arenito Berea) e que obedece ao estado plano de deformação, enquanto a descontinuidade é formada por um material linear elástico anisotrópico. Os parâmetros de material do arenito e da descontinuidade são listados na tabela 5-6. O fluido no meio poroso possui uma viscosidade (μ) de 2,5 cP, peso específico (γ) de 8 KN/m³ e um módulo de variação volumétrica (K_f) de

3,3 GPa. Para este exemplo, a semelhança do arenito, a viscosidade do fluido também foi trocada.

Pelo fato da descontinuidade encontrar-se no interior da coluna, valores nulos de salto de deslocamento e poro-pressão são impostos nas duas extremidades da descontinuidade. Esta restrição visa garantir que a poro-pressão e o deslocamento tenham apenas um valor nestes pontos.

Tabela 5-6: Parâmetros da coluna de arenito submetida a um fluxo prescrito.

Arenito		Descontinuidade	
E (GPa)	14,40	r_{nn} (GPa/m)	5,00
ν	0,20	r_{ss} (GPa/m)	1,00
k (mD)	190,00	k_n (mD)	0,19
ϕ	0,19	k_t (mD)	0,19
Ks (GPa)	36,00	ϕ	0,19
***	***	Ks (GPa)	36,00

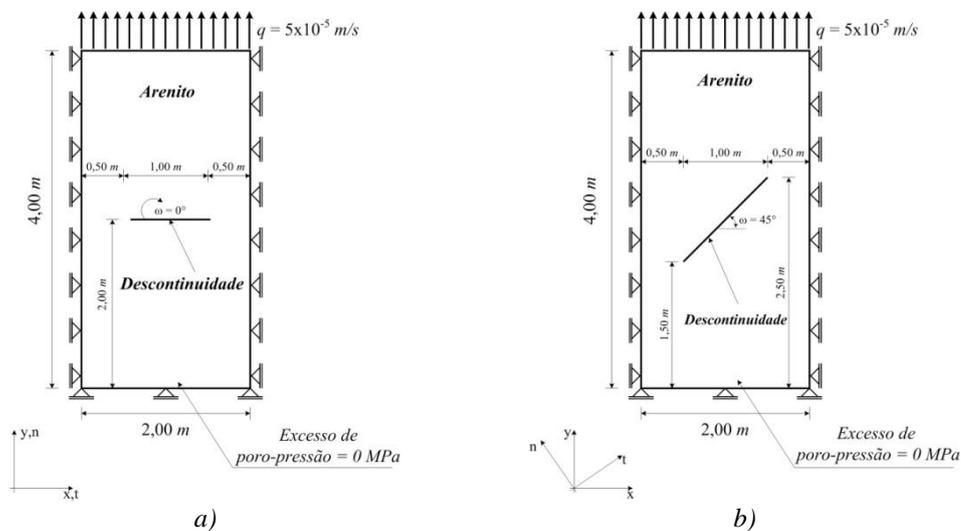


Figura 5-28: Coluna de arenito submetida a um fluxo prescrito: a) coluna 1a, b) coluna

2a

Seguindo a relação do apêndice D e utilizando os parâmetros da Tabela 5-6, o coeficiente de *Leak off* assume o valor 3×10^{-5} (m/s)/MPa. O coeficiente *Gap Flow* não é definido para esta modelagem. Nesta situação, o ABAQUS trata o fluxo tangencial como desprezível o que é uma condição similar ao problema

descrito aqui. Para o elemento CPE4P, o módulo de Young (E_y), módulo de cisalhamento (G_{xy}) e coeficiente de Poisson (ν_{xy}) iguais a 25 MPa, 5 MPa e 0 respectivamente.

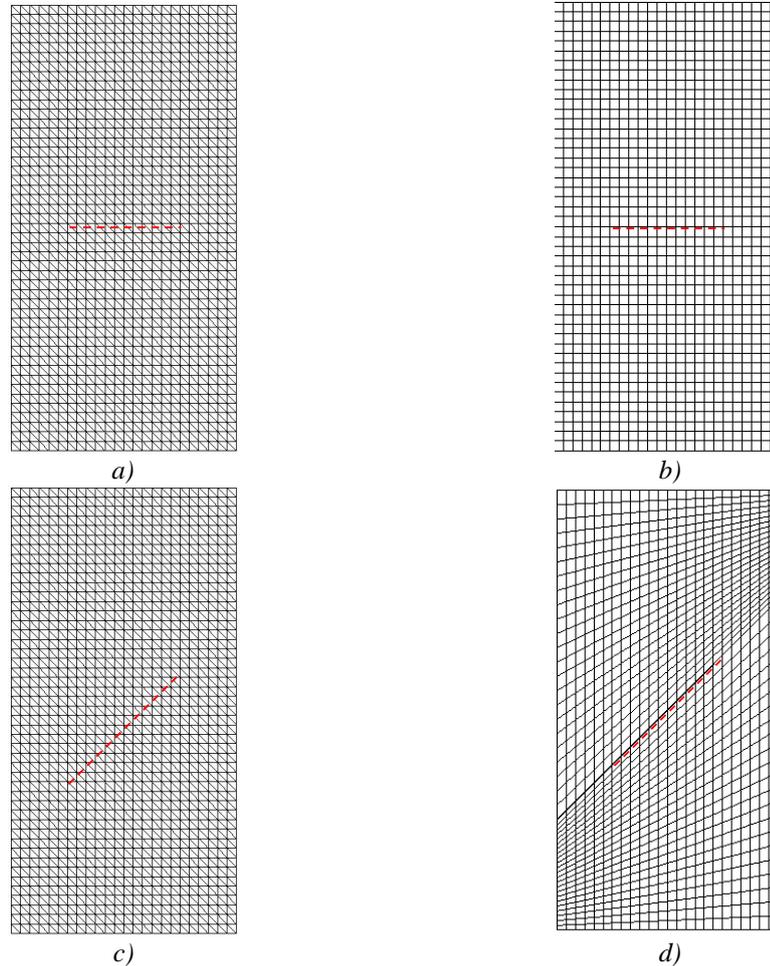


Figura 5-29: Malhas geradas: a) GiD para a coluna 1a, b) ABAQUS-CAE para a coluna 1a, c) GiD para a coluna 2a, d) ABAQUS-CAE para a coluna 2ª.

O coeficiente *Gap Flow*, ao ser introduzido na modelagem, automaticamente torna o fluxo no elemento *cohesive* dependente da espessura da descontinuidade. O código em que o elemento enriquecido foi escrito não representa esta característica. Por este motivo, o coeficiente foi retirado da descrição do elemento.

As malhas utilizadas neste exemplo estão ilustradas na Figura 5-29:, elas são as mesmas do exemplo de fluxo. Para efetuar a comparação entre os elementos CPE4P, enriquecido e *cohesive*, as respostas de deslocamento e poro-pressão são lidas nas posições 1, 2 e 3 como indicado na Figura 5-13.

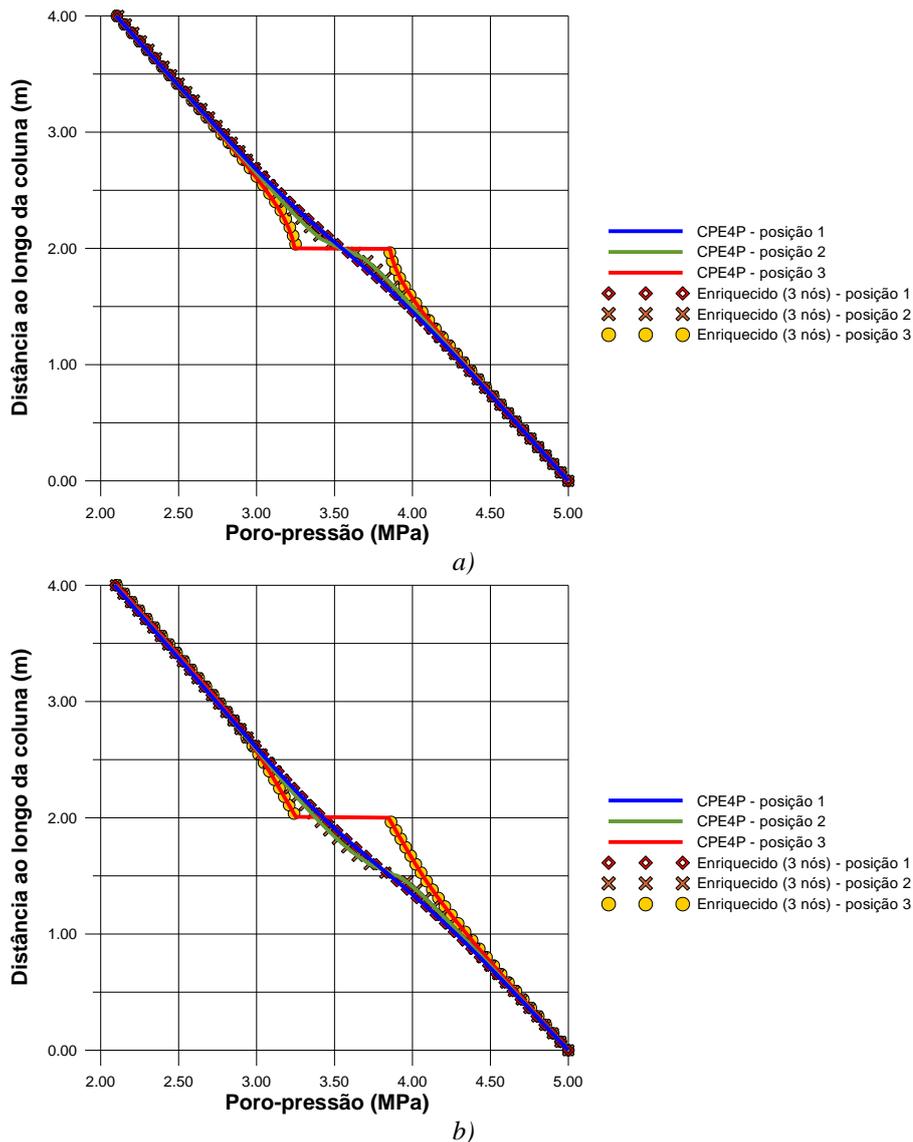


Figura 5-30 – Curvas de poro-pressão obtidas pelos elementos CPE4P e enriquecido (com 3 nós): (a) coluna 1a, (b) coluna 2a

Ilustrada na Figura 5-30, a primeira resposta a ser avaliada é a de poro-pressão. Apesar de a modelagem ter sido feita utilizando excesso de poro-pressão, o gráfico foi construído com o valor total de poro-pressão. Os valores no gráfico correspondem à soma do excesso de poro-pressão mais a poro-pressão na base de 5 MPa.

Observando as curvas descritas pelo elemento CPE4P, indicada pelas linhas cheias, a coluna 1a permite visualizar duas curvas com uma variação suave de poro-pressão. A primeira curva, ao longo da posição 1, tem a forma de uma reta. A segunda curva, ao longo da posição 2, é praticamente idêntica à primeira, apresentando apenas uma leve variação de poro-pressão nas distâncias

compreendidas entre 1,50 e 2,50m. Esta variação está associada à presença da descontinuidade.

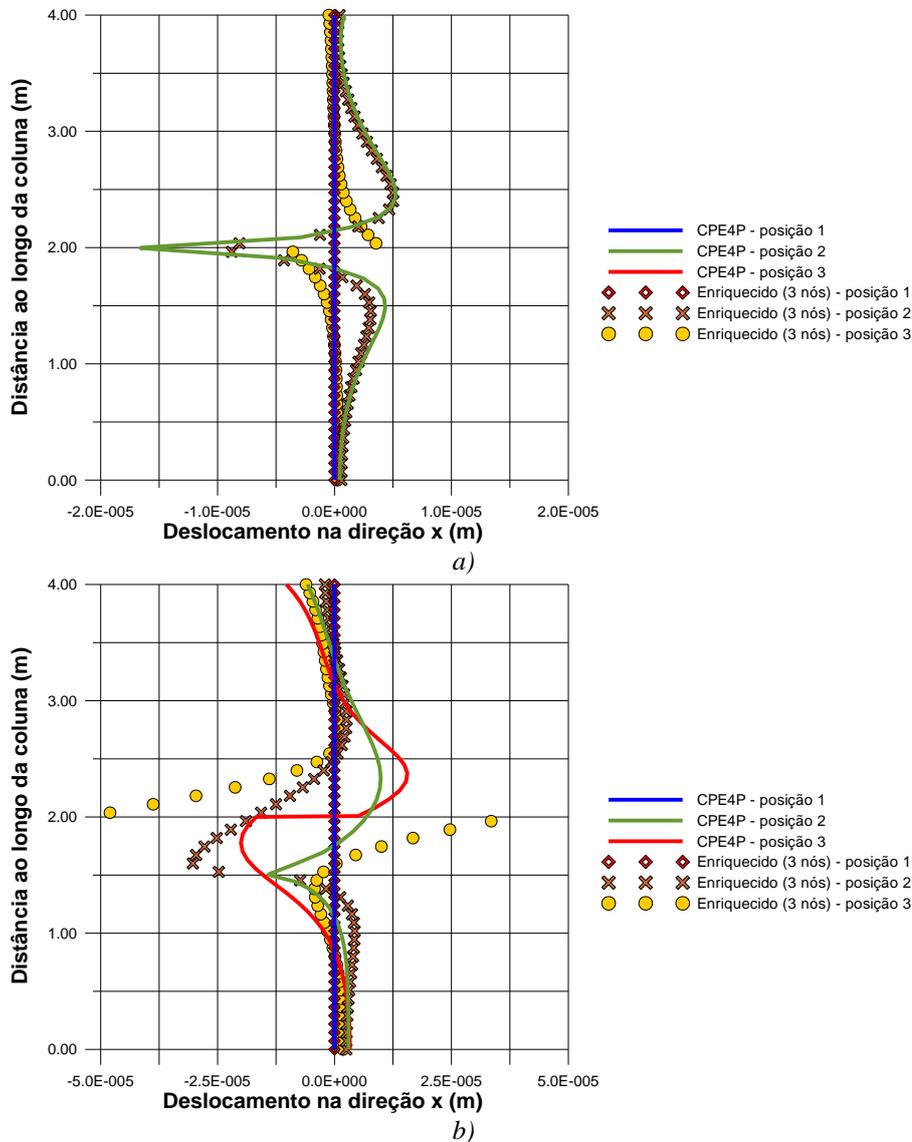


Figura 5-31: Curvas de deslocamento na direção x obtidas pelos elementos CPE4P e enriquecido (com 3 nós): a) coluna 1a, b) coluna 2a

A influência da descontinuidade é nítida ao notar o salto de poro-pressão localizado na distância de 2,00 m (linha cheia vermelha, posição 3). Ao mudar a inclinação (ω) de 0° para 45° , praticamente nenhuma alteração nos valores de poro-pressão é observada. A única mudança é a leve variação de poro-pressão na posição 2 que passa da distância 2,00 m (Figura 5-30(a)) para a distância 1,50m (Figura 5-30(b)).

A aparente indiferença da poro-pressão em relação à inclinação (ω) está associada ao baixo valor de permeabilidade tangencial (K_t). Como o valor é

pequeno, o fluxo ao longo da direção tangencial à descontinuidade também é. Para esta situação, a descontinuidade age sempre como uma barreira introduzindo o mesmo salto de poro-pressão na coluna. Caso o valor K_t fosse alto, o fluxo tangencial seria maior permitindo uma mudança de poro-pressão ao longo da coluna como foi ilustrado nas figuras 5-21 e 5-22.

A concordância das curvas de poro-pressão, inclusive na posição 2, mostra que a imposição do salto de poro-pressão nulo nas extremidades da descontinuidade garante a continuidade (ou valor único) de poro-pressão nestes pontos. Não será ilustrado neste texto, mas os mesmos resultados são obtidos com o elemento enriquecido com 5 nós.

A Figura 5-31 mostra o deslocamento na direção x obtido pelos elementos CPE4P e enriquecido (com 3 nós) para as colunas 1a e 2a. Para a coluna 1a, nota-se que as respostas dos dois elementos são praticamente iguais, exceto pela diferença de salto de deslocamento ao longo da posição 3 (Figura 5-31(a)). O comportamento das curvas de deslocamento é idêntico ao descrito no exemplo mecânico, seção 5.3.1. Como apontado na seção 5.3.1, a diferença de salto de deslocamento possivelmente está associada a um resíduo numérico.

A mesma semelhança na resposta de deslocamento não foi obtida para a coluna 2a, apresentada na Figura 5-31:(b), página 156. Ao longo da posição 2, as curvas de deslocamento obtidas pelos elementos CPE4P e enriquecido têm um comportamento parecido, mas os valores de deslocamento são diferentes. Como na seção 5.3.1, próximo ao início da descontinuidade (distância de 1,50 m aproximadamente), um pico de deslocamento é observado.

A maior diferença entre as curvas de deslocamento determinadas pelos dois elementos é vista ao longo da posição 3. Para as distâncias abaixo de 1,25 m e acima de 3,00 m, há uma proximidade nas respostas. Porém, para distâncias compreendidas no intervalo de 1,25 e 3,00 m, os valores e o comportamento das curvas de deslocamento diferem muito.

Ao iniciar o capítulo de exemplos foi apontada uma limitação para a comparação entre os elementos CPE4P e enriquecido. Esta limitação está associada à existência de dois deslocamentos e tensões normais no elemento CPE4P o que não é compatível com a idealização adotada para a descontinuidade. A descontinuidade descreve apenas um movimento (salto) e tensão (força de superfície) normal.

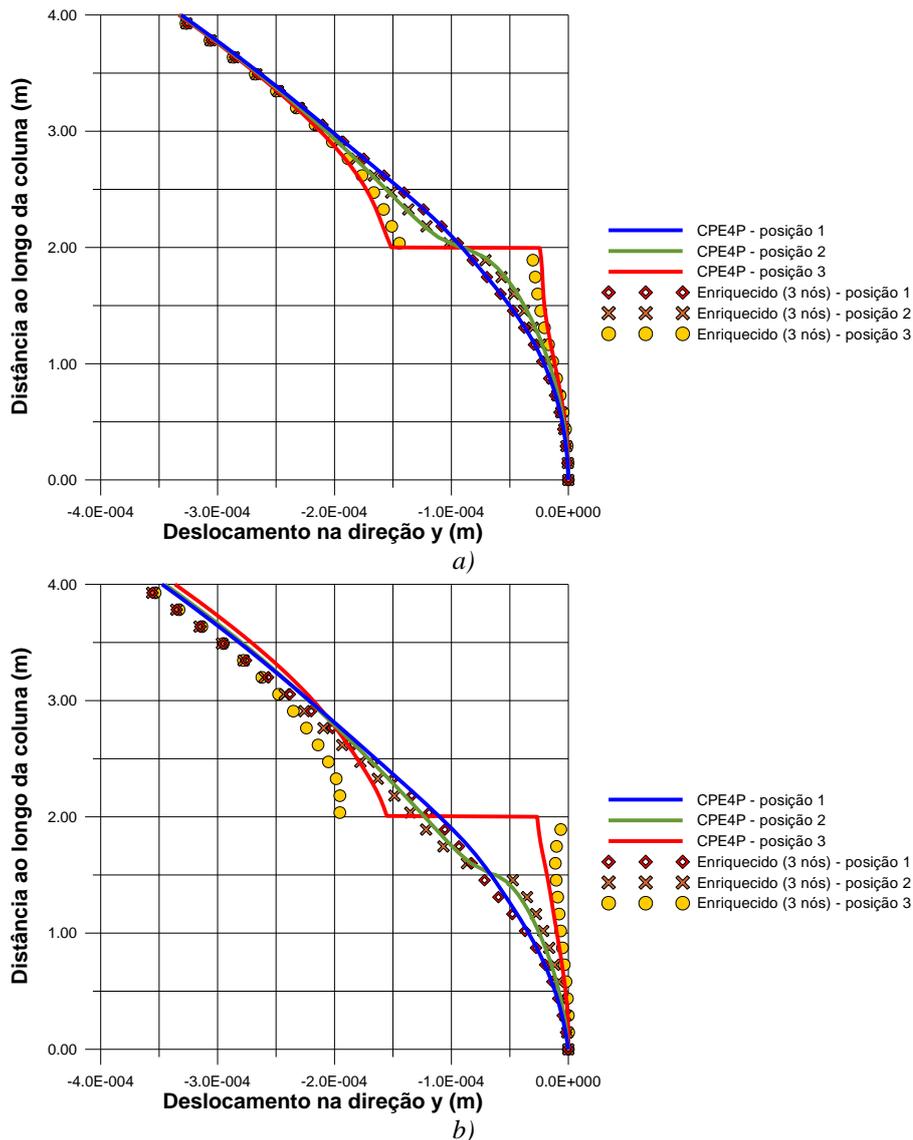


Figura 5-32: Curvas de deslocamento na direção y obtidas pelos elementos CPE4P e enriquecido (com 3 nós): a) coluna 1a, b) coluna 2a

Aparentemente, a limitação do elemento CPE4P não afeta a resposta de deslocamento para um problema mecânico desacoplado como ilustrado no exemplo da seção 5.3.1, Figura 5-17. Naquele exemplo, os baixos valores de módulo de Young (E_y) e Cisalhamento (G_{xy}), introduzidos no elemento CPE4P, conseguiram minimizar qualquer resistência ao movimento ao longo da direção tangencial à descontinuidade.

Uma possível razão para este artifício não ter tido o mesmo efeito no caso do acoplamento fluido-mecânico é a existência de poro-pressão nas componentes normais de tensão normal do elemento CPE4P. A fim de esclarecer melhor esta

observação sobre o elemento CPE4P, uma interpretação da expressão (4.8) referente ao incremento de tensão total do elemento enriquecido será empregada.

A expressão (4.8) permite ver que baixos valores de módulo de Young e Cisalhamento podem reduzir ou, até mesmo, eliminar a componente de tensão efetiva normal do elemento CPE4P ao longo da direção tangencial à descontinuidade. Porém, eles não possibilitam que a componente de poro-pressão (segundo termo do lado direito da igualdade) seja eliminada. Logo, a tensão normal do elemento CPE4P ao longo da direção tangencial à descontinuidade não é reduzida.

O elemento CPE4P contabiliza corretamente a poro-pressão (ou excesso) na direção normal à descontinuidade, mas não na direção tangencial. A componente de poro-pressão na direção tangencial não deveria existir, pois, de acordo com a idealização da descontinuidade, na direção tangencial existe apenas esforço de cisalhamento. Isto é, o elemento CPE4P introduz uma sollicitação ao longo da direção tangencial maior do que deveria. Acredita-se que esta seja a razão para a diferença de resultados vista na coluna 2a.

Quanto à boa correspondência de resultados observados para a coluna 1a, isto provavelmente está associado à inclinação (ω) que não favorece o surgimento de deslocamento na direção x ao longo da descontinuidade.

No que se refere ao deslocamento na direção y ilustrado na Figura 5-32, a existência das componentes normais de deslocamento e de tensão do elemento CPE4P na direção tangencial à descontinuidade parece ter tido menor efeito. Para a coluna 1a, as respostas de deslocamento dos elementos CPE4P e enriquecido são praticamente idênticas (Figura 5-32(a)). Para a coluna 2a, as respostas de deslocamento deixam de ter valores idênticos, mas o comportamento descrito pelas curvas é o mesmo (Figura 5-32(b)).

Observando a Figura 5-32(a), identifica-se claramente um formato curvo para o deslocamento ao longo da posição 1. Este formato lembra o aspecto parabólico do deslocamento relacionado à ação do fluxo de fluido visto na solução analítica unidimensional. Comportamento idêntico é visto ao longo da posição 2, exceto pela leve variação de deslocamento entre as distâncias 1,25 e 2,75 m. Esta variação ocorre devido à presença da descontinuidade localizada na distância 2,00 m. As mesmas observações são válidas para a coluna 2a (Figura 5-32(b)).

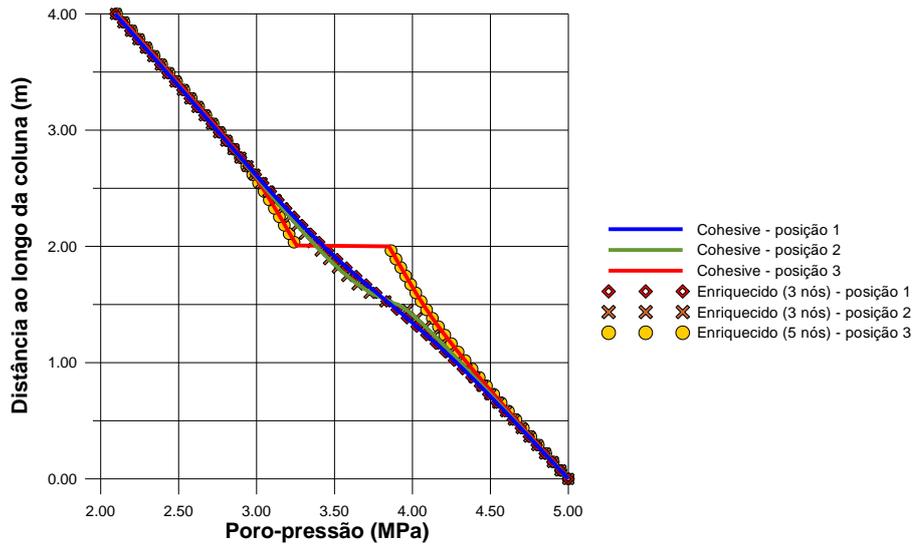


Figura 5-33: Curvas de poro-pressão obtidas pelos elementos cohesive e enriquecido para a coluna 2a

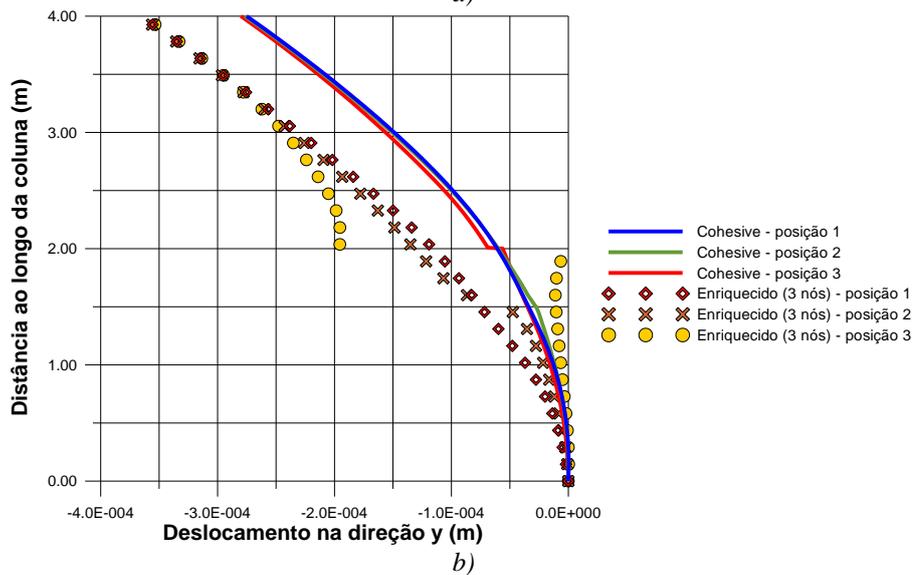
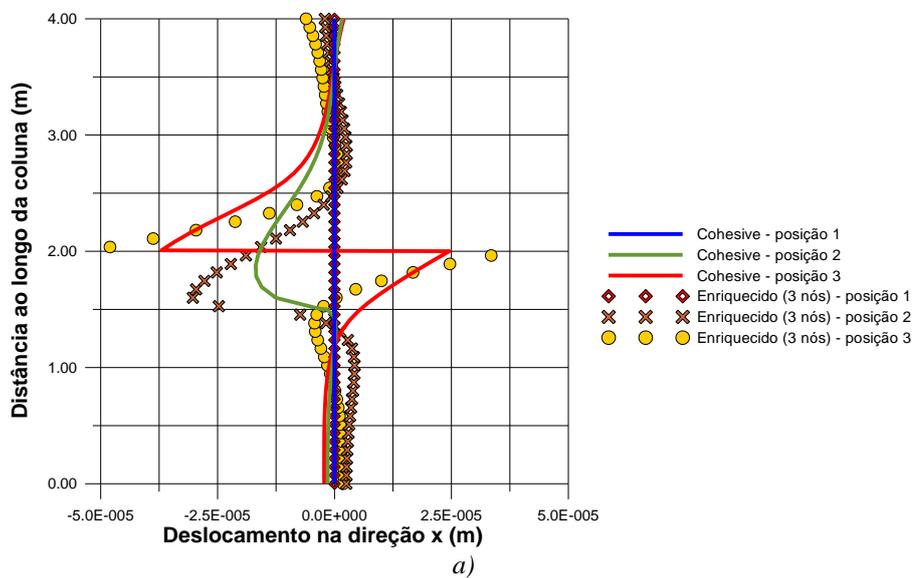


Figura 5-34: Curvas de deslocamento obtidas pelos elementos cohesive e enriquecido para a coluna 2a: a) direção x, b) direção y

De modo similar a outros exemplos, a posição 3 permite visualizar nitidamente o salto de deslocamento através da descontinuidade. Ao comparar as curvas de deslocamento na direção y das colunas 1a e 2a na posição 3 (distância 2,00 m), nota-se que o salto de deslocamento da primeira coluna é menor. É uma situação diferente daquela apontada no exemplo mecânico desacoplado.

Apesar da diferença de respostas vista na Figura 5-31(b), os resultados ilustrados mostram que o elemento enriquecido acoplado produz uma resposta coerente e, dependendo da característica do problema, até idêntica à resposta de um modelo em que a descontinuidade é discretizada. Deve-se atentar que os elementos CPE4P e enriquecido não adotam as mesmas hipóteses de comportamento mecânico para descrever a descontinuidade, mesmo assim os resultados foram semelhantes.

Uma segunda comparação do elemento enriquecido acoplado é feita com o elemento *cohesive*. A fim de evitar uma descrição longa e devido à similaridade entre os exemplos da coluna 1a e a coluna unidimensional (seção 5.2), apenas a coluna 2a é modelada novamente.

A Figura 5-33 mostra as curvas de poro-pressão obtidas pelos elementos *cohesive* e enriquecido para a coluna 2a. A resposta de poro-pressão dos dois elementos é idêntica. Quanto ao comportamento das curvas, os mesmos comentários feitos a respeito da Figura 5-30(b) são aplicáveis para a Figura 5-33. Este resultado indica que, para uma descontinuidade com baixo valor de permeabilidade, a ausência do coeficiente *Gap Flow* não interfere na resposta de poro-pressão.

Referente ao deslocamento ao longo da coluna 2a, a resposta dos dois elementos não coincidiram como ilustrado na Figura 5-34. Observa-se que as curvas de deslocamento na direção y ao longo das posições 1 e 2 apresentam certo paralelismo, principalmente acima da distância de 2,00 m, mas não os mesmos valores. Assim como para a coluna unidimensional, o salto de deslocamento na direção y determinado pelo elemento *cohesive* (distância 2,00m, posição 3) é muito pequeno, algo em torno de $1,25 \times 10^{-5}$ m.

Diferentemente do que foi visto na Figura 5-31(b), as curvas de deslocamento na direção x descritas pelos elementos *cohesive* e enriquecido possuem um comportamento similar ao longo de toda a coluna (Figura 5-34(a)). Até mesmo para a posição 3, próximo à descontinuidade, o formato das curvas é

parecido. Na direção x , o valor do salto de deslocamento determinado pelo elemento *cohesive* é aproximadamente $6,15 \times 10^{-5}$ m.

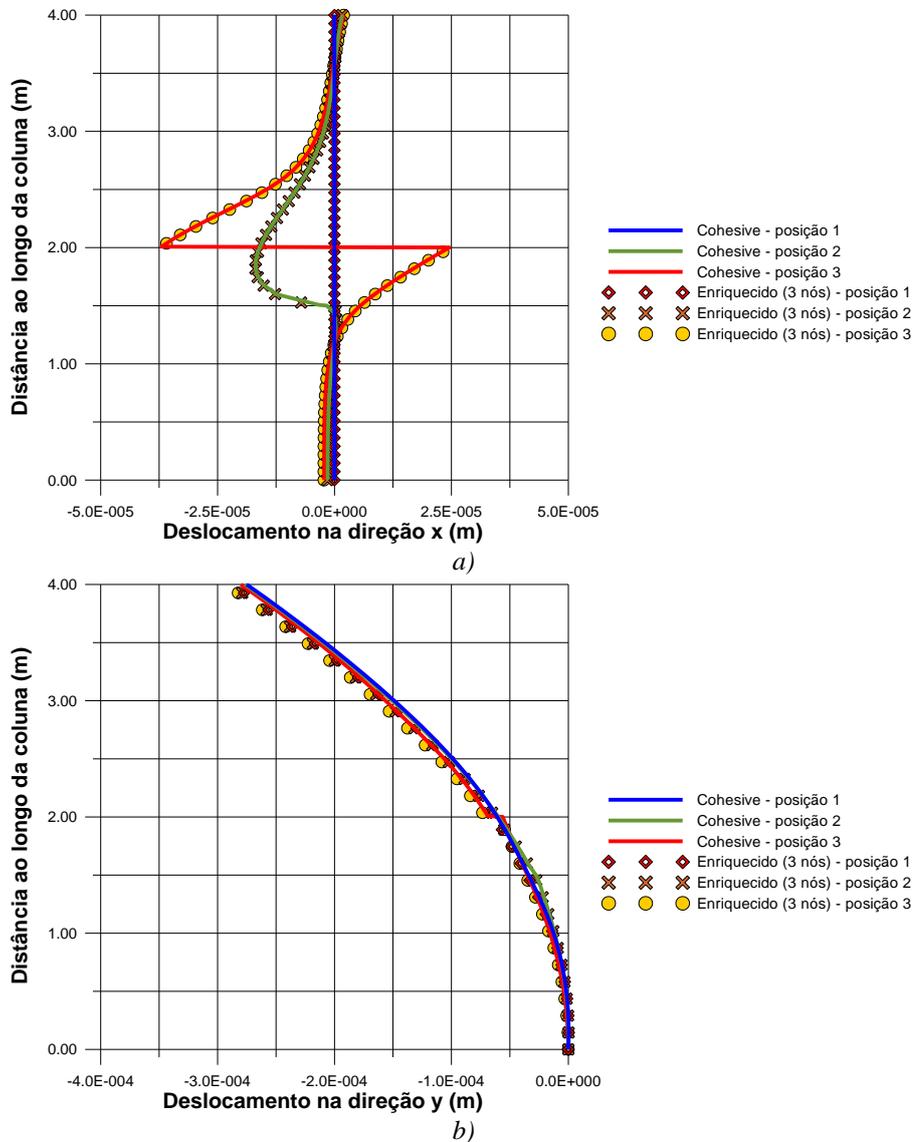


Figura 5-35: Curvas de deslocamento obtidas pelos elementos cohesive e enriquecido (com 3 nós e sem o termo de acoplamento na descontinuidade): (a) direção x , (b) direção y

Anteriormente, no exemplo da coluna unidimensional, foi apontado que o elemento *cohesive* não possui o termo de acoplamento na descontinuidade (quarto termo do lado esquerdo da igualdade na expressão (4.9)). Esta observação foi feita após retirar o termo de acoplamento do elemento enriquecido e comparar, sob esta condição, as respostas dos dois elementos. O mesmo procedimento será feito neste exemplo. A Figura 5-35 ilustra os resultados obtidos.

Como no estudo da coluna unidimensional, ao se retirar o termo de acoplamento na descontinuidade, as respostas dos elementos *cohesive* e enriquecido (com 3 nós) tornam-se idênticas. Nota-se que a retirada do termo de acoplamento reduziu o valor do salto de deslocamento nas direções x e y (posição 3 na Figura 5-35), sendo que a maior redução ocorreu na direção y. O salto na direção y passou de $2,00 \times 10^{-4}$ m para $1,50 \times 10^{-5}$ m, enquanto na direção x, o salto passou de $8,75 \times 10^{-5}$ m para $6,15 \times 10^{-5}$ m.

Apesar de o salto de deslocamento na direção x ser maior, o deslocamento na direção x ao longo da coluna é pequeno quando comparado ao deslocamento na direção y. A Figura 5-35 transmite a impressão de que o deslocamento em x é maior, mas isto está simplesmente associado aos limites de deslocamento adotados na construção dos gráficos.

A ótima concordância de resultados da Figura 5-35 permite fazer alguns comentários. Recorrendo a notação matricial do elemento enriquecido acoplado (expressões (4.33) a (4.37)), observa-se que o termo de acoplamento na descontinuidade (segunda integral do lado direito da submatriz $L_e^{\beta\beta}$) não faz parte das submatrizes de rigidez e de fluxo do elemento. Como a ausência do termo não afeta as submatrizes de rigidez e fluxo, pode-se afirmar que elas estão estabelecidas corretamente. Isto apenas confirma as observações feitas nos exemplos mecânico e de fluxo desacoplados.

Quanto à matriz de acoplamento L_e do elemento enriquecido (expressão (4.37)), deve-se lembrar que, mesmo sem o termo de acoplamento na descontinuidade, os campos de deslocamento e poro-pressão ainda são descontínuos. Logo, o resultado da Figura 5-35 possibilita dizer que o uso da função N^β para descrever estes campos no acoplamento fluido-mecânico é correto. Além disto, verifica-se que a porção da matriz L_e que representa a região fora da descontinuidade também está correta.

O resultado ilustrado na Figura 5-35 fornece outra interpretação interessante. A retirada do termo de acoplamento da descontinuidade não elimina os saltos de deslocamento ou de poro-pressão. O resultado indica que a principal função do termo de acoplamento da descontinuidade é atribuir um maior ou menor valor ao salto de deslocamento. Este papel é facilmente visto pelas reduções de salto de deslocamento citadas anteriormente.

A comparação entre os elementos *cohesive* e enriquecido ilustrada na Figura 5-35 indica que todos os termos do elemento enriquecido acoplado, excluindo o termo de acoplamento na descontinuidade, estão corretos.

No que concerne ao termo de acoplamento na descontinuidade, a concordância das curvas de deslocamento para a coluna 1a, ilustradas nas figuras 5-31(a) e 5-32(a), formam um forte indício que o termo está elaborado corretamente. Tendo em mente a diferença de descrição do comportamento da descontinuidade pelos elementos CPE4P e enriquecido, o paralelismo das curvas de deslocamento na direção y da coluna 2a, visto nas figuras 5-31(b) e 5-32(b), é outro indício de que o termo de acoplamento na descontinuidade é estabelecido de modo apropriado.

5.3.3.2. Regime de fluxo transiente

Este exemplo é semelhante ao anterior consistindo na modelagem de uma coluna de arenito submetida a um fluxo ascendente como ilustrado na Figura 5-36, página 165. O deslocamento é restringido na direção x ao longo das faces direita e esquerda da coluna e na direção y na base da coluna. A poro-pressão inicial em toda a coluna é igual a 5 MPa, mas a condição imposta na modelagem é um valor nulo de excesso de poro-pressão. Para um tempo acima de 0s, prescreve-se um valor de excesso de poro-pressão no topo da coluna igual a -5 MPa. A coluna possui uma descontinuidade no seu interior com inclinação (ω) em relação ao eixo x e uma espessura (e) de 5 mm. A coluna é formada por um arenito com comportamento linear elástico isotrópico (arenito Weber) obedecendo ao estado plano de deformação, enquanto a descontinuidade é formada por um material linear elástico anisotrópico. Os parâmetros de material do arenito e da descontinuidade são listados na Tabela 5-7, página 165. O fluido no meio poroso possui uma viscosidade (μ) de 50,0 cP, peso específico (γ) de 8 KN/m³ e um módulo de variação volumétrica (K_f) de 3,3 GPa.

Como no exemplo anterior, valores nulos de salto de deslocamento e excesso de poro-pressão são impostos nas duas extremidades da descontinuidade. Esta restrição visa garantir que a poro-pressão e o deslocamento sejam contínuos nestes pontos.

Tabela 5-7: Parâmetros da coluna de arenito submetida a um fluxo em regime transiente

Arenito		Descontinuidade	
E (GPa)	27,60	r_{nn} (GPa/m)	5,00
ν	0,15	r_{ss} (GPa/m)	1,00
k (mD)	1,00	k_n (mD)	0,001
ϕ	0,06	k_t (mD)	0,001
K_s (GPa)	36,00	ϕ	0,19
***	***	K_s (GPa)	36,00

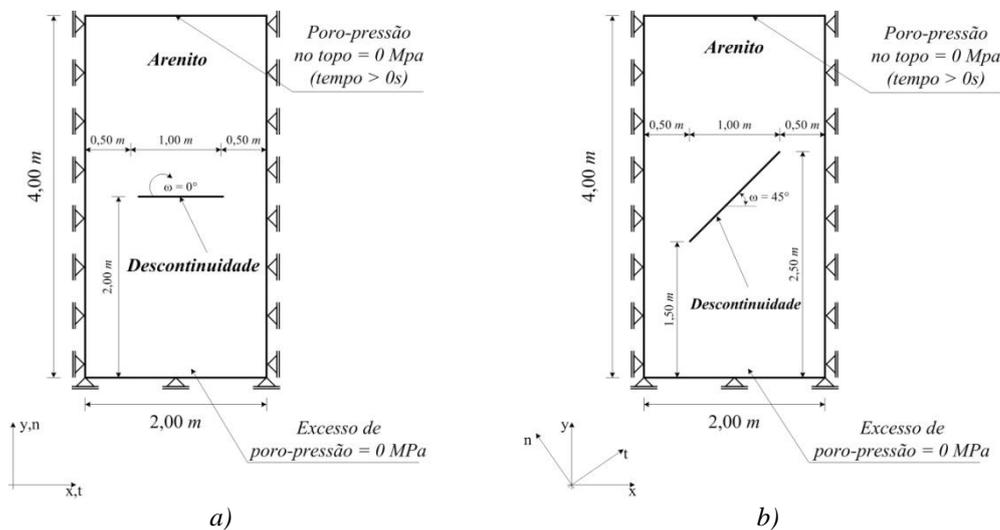


Figura 5-36: Coluna de arenito submetida a um fluxo em regime transiente: (a) coluna 1a, (b) coluna 2a

As malhas utilizadas neste exemplo são as mesmas do exemplo de fluxo em regime permanente (ilustradas na Figura 5-29). As respostas de poro-pressão e de deslocamento serão lidas apenas para a posição 3 (indicada na Figura 5-13). A Figura 5-37, página 166, mostra a resposta de poro-pressão para as colunas 1a e 2a em três instantes do tempo.

Ilustrada na figura 5-37, a primeira resposta a ser avaliada é a de poro-pressão. Apesar de a modelagem ter sido feita utilizando excesso de poro-pressão, o gráfico foi construído com o valor total de poro-pressão. Os valores no gráfico correspondem a soma do excesso de poro-pressão mais a poro-pressão na base de 5 MPa.

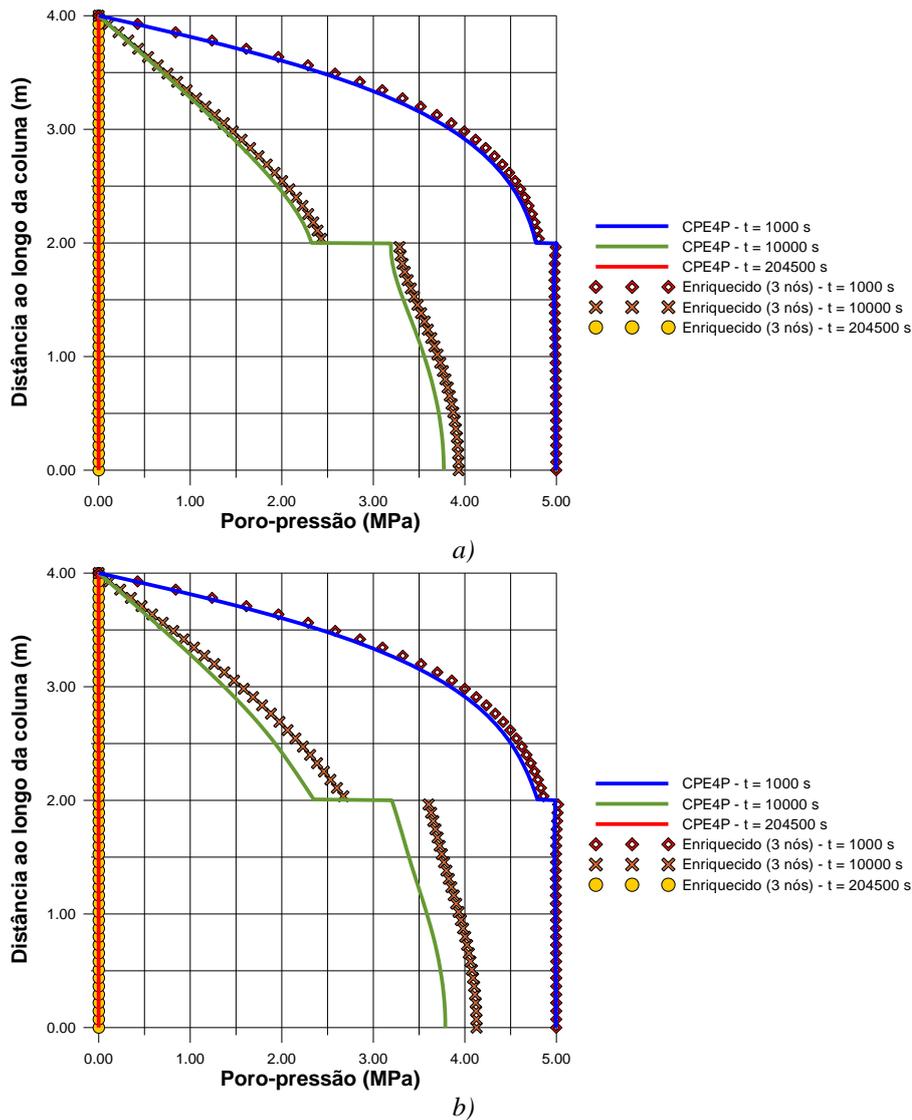


Figura 5-37: Curvas de poro-pressão em três instantes de tempo: (a) coluna 1a, (b) coluna 2a

De modo semelhante ao exemplo de fluxo desacoplado em regime transiente, seção 5.3.2.2, as respostas de poro-pressão obtidas pelos elementos CPE4P e enriquecido com 3 nós para a coluna 1a são muito próximas. Para o tempo de 1000 s, a resposta dos dois elementos foi idêntica.

Observando a resposta de poro-pressão ao longo da coluna 1a (Figura 5-37(a)), até o momento de 1000 s, somente a região acima da descontinuidade (distância 2,00 m) sofre redução de poro-pressão. O salto de poro-pressão é muito pequeno neste instante de tempo. Posteriormente, no tempo de 10000 s, a coluna inteira apresenta redução de poro-pressão e o salto de poro-pressão torna-se perceptível. A coluna encontra-se totalmente drenada no instante 202500 s.

À medida que o tempo aumenta, as curvas deixam de ser coincidentes (tempo de 1000 s) e passam a apresentar uma pequena diferença (tempo de 10000 s). Como apontado no exemplo de fluxo transiente desacoplado, a razão desta diferença, possivelmente, está associada ao valor do parâmetro de armazenamento (s).

Os mesmos comentários da coluna 1a se aplicam à coluna 2a, exceto o referente à diferença de resposta entre os elementos CPE4P e enriquecido no instante 10000 s. Comparando-se a coluna 2a a 1a, nota-se que a curva de poro-pressão prevista pelo elemento enriquecido teve um ligeiro aumento. Na base da coluna, este aumento foi de aproximadamente 0,20 MPa como ilustrado na Figura 5-37(b).

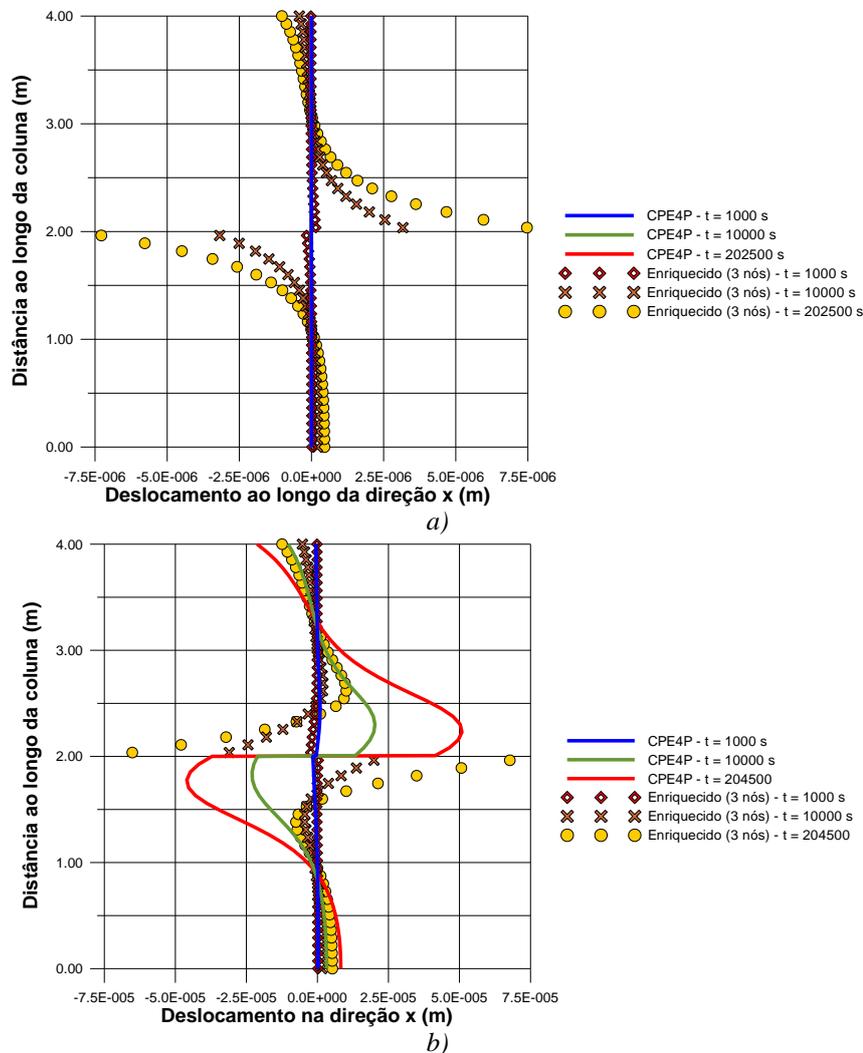


Figura 5-38: Curvas de deslocamento na direção x em três instantes de tempo: a) coluna 1a, b) coluna 2a

O aumento de poro-pressão na base está relacionado à mudança de inclinação (ω). Voltando à Figura 5-25, para a mesma inclinação (ω), verifica-se que a diferença de valores de poro-pressão previstos pelos os elementos CPE4P e enriquecido é pequena. Isto permite dizer que o aumento de poro-pressão visto na Figura 5-37(b) não tem relação com a submatriz de armazenamento do elemento enriquecido. O motivo deste aumento é a influência do termo de acoplamento na equação de fluxo, o que não ocorria na modelagem da coluna em uma condição de fluxo em regime permanente.

A Figura 5-38 ilustra a mudança de deslocamento na direção x associada à variação da inclinação (ω). Para a coluna 1a, Figura 5-38(a), apenas o elemento enriquecido descreve valores não nulos de deslocamento. O resultado obtido perde importância ao comparar a ordem de grandeza dos deslocamentos nas direções x e y (Figura 5-39(a), página 169), verifica-se que os valores de deslocamento na direção x são desprezíveis. A diferença de ordem de grandeza, em torno de 200 vezes, sugere que o deslocamento na direção x seja apenas um resíduo numérico.

Quanto à coluna 2a, os dois elementos apresentam valores não nulos de deslocamento na direção x (Figura 5-38(b)). Porém, os valores obtidos pelos elementos CPE4P e enriquecido diferem muito. Como apontado na seção 5.3.3.1, a existência de componentes normais de deslocamento e tensão no elemento CPE4P, ao longo da direção tangencial à descontinuidade, não permite uma comparação fiel com o elemento enriquecido.

A Figura 5-39, página 169, mostra o deslocamento na direção y . Novamente, para uma inclinação (ω) de 0° (Figura 5-39(a)), a resposta de deslocamento determinada pelos elementos CPE4P e enriquecido tiveram uma boa concordância. Deve-se atentar que diferentemente da resposta de poro-pressão, o salto de deslocamento não desaparece com o tempo. Ao contrário, ele aumenta.

Ao mudar a inclinação (ω) de 0° para 45° , as curvas de deslocamento na direção y obtidas pelos elementos CPE4P e enriquecido deixam ter uma boa concordância para todos os tempos como ilustrado na Figura 5-39(b). A concordância é perdida quando o fluxo atinge a condição permanente (tempo de 204500 s), mas as curvas de deslocamento ainda apresentam o mesmo comportamento. Para o tempo de 204500 s, os valores de deslocamento

determinados pelos elementos CPE4P e enriquecido com 3 nós foram $-5,548 \times 10^{-4}$ m e $-6,178 \times 10^{-4}$ m respectivamente.

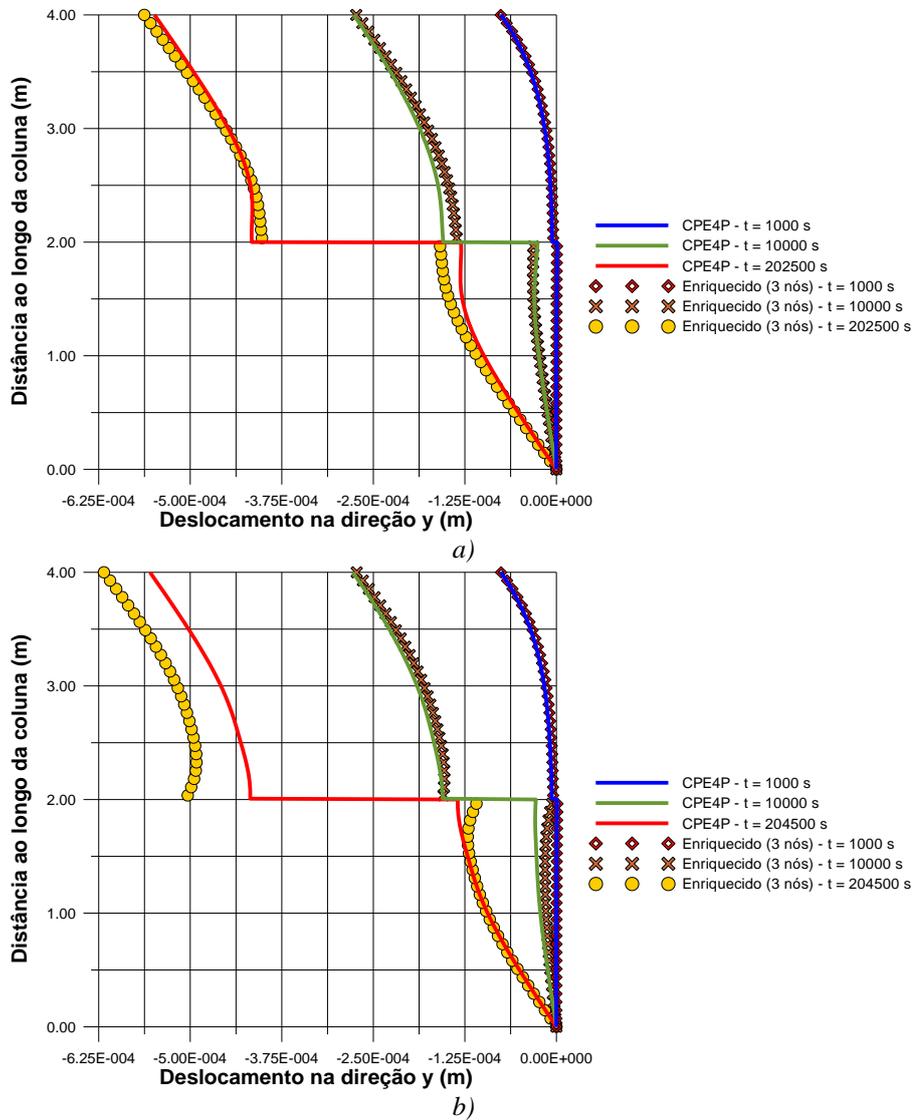


Figura 5-39: Curvas de deslocamento na direção y em três instantes de tempo: a) coluna 1a, b) coluna 2a

Do mesmo modo que no regime permanente, o campo de deslocamento determinado pelos elementos CPE4P e enriquecido foram praticamente idênticos para a coluna 1a no regime transiente. Este resultado junto à modelagem de fluxo em regime transiente sem acoplamento, seção 5.3.2.2, mostra que a matriz de armazenamento do elemento enriquecido está formulada de modo apropriado.

5.4.

Aplicação do elemento enriquecido em um modelo de reservatório bidimensional

A seção 5.3 apresentou comparações entre modelos numéricos que utilizam o elemento enriquecido com modelos em que a descontinuidade é discretizada. Em todos os exemplos, malhas refinadas foram empregadas. Porém, o uso de malhas refinadas em modelos de reservatório não é algo comum. Frequentemente, malhas grosseiras com elementos com dimensões entre dezena a centena de metros são usadas. Visando avaliar a resposta do elemento enriquecido nesta condição, dois exemplos de reservatório bidimensional são mostrados nesta seção. A primeira aplicação aborda o problema de fluxo de fluido, a segunda aplicação considera o acoplamento fluido-mecânico.

As malhas empregadas na modelagem numérica são grosseiras e não passaram por qualquer estudo de refinamento. A finalidade das duas aplicações é mostrar se, mesmo em malhas grosseiras e com refinamentos semelhantes, o modelo numérico que faz uso do elemento enriquecido é capaz de produzir uma resposta próxima daquele em que a descontinuidade é discretizada.

Os exemplos são idealizados como seções transversais de um reservatório, isto é, são planos horizontais (plano xy) cuja normal é o eixo z (paralelo à direção vertical). Cabe ressaltar que os exemplos de reservatório ilustrados são simples e apenas ilustrativos. Não há intenção em reproduzir um cenário real de produção.

5.4.1.

Fluxo de fluido através de um reservatório com uma falha pré-existente

Procurando verificar a capacidade do elemento enriquecido em reproduzir o aspecto selante ou não selante de uma falha, três exemplos de fluxo são apresentados. O primeiro exemplo trata a falha como um meio selante, o segundo e o terceiro exemplos como um meio condutor. Devido à equivalência entre os elementos CPE4P e enriquecido na representação do fluxo através da descontinuidade, uma comparação com o ABAQUS é realizada. Essa comparação permite avaliar a resposta do elemento enriquecido de modo quantitativo.

5.4.1.1. Falha selante

A fim de averiguar se o elemento enriquecido é capaz de reproduzir o aspecto selante de uma falha, um reservatório com uma falha incluída no seu interior foi idealizado como mostrado na Figura 5-40. O reservatório possui dimensões de 2000 m na direção x, 1000 m na direção y e uma espessura unitária na direção z (perpendicular ao plano xy). A falha é um segmento de reta limitado entre os pontos (300, 275) m e (1800, 775) m com uma inclinação de $18,45^\circ$ em relação ao eixo x, possuindo uma espessura de 10 cm no plano xy.

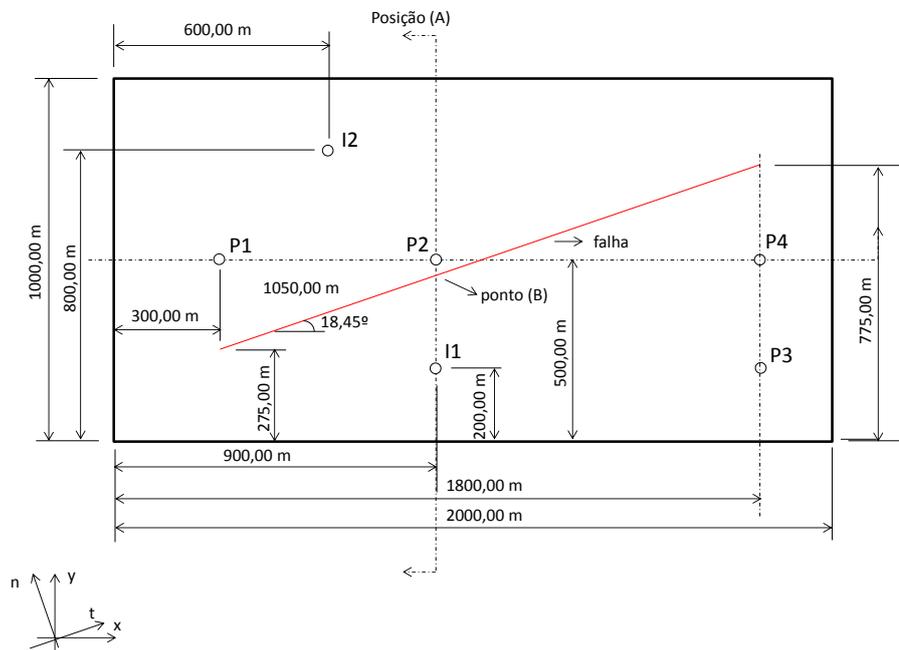


Figura 5-40: Reservatório bidimensional com uma falha incluída

Seis poços são localizados no reservatório, sendo quatro deles poços produtores e os outros dois injetores. Os poços produtores, indicados pela letra P seguida por um número na Figura 5-40, operam com uma pressão de fundo de poço (p_{wf}) de 24,52 MPa (250 Kgf/cm²), os poços injetores, indicados pela letra I seguida por um número, operam a uma pressão de 34,23 MPa (350 Kgf/cm²). A pressão estática (p_e) no reservatório é de 29,42 MPa (300 Kgf/cm²) no tempo de 0 s. Nenhuma condição de poro-pressão é prescrita no contorno do reservatório. O fluxo de fluido ocorre em regime transiente, sendo adotado um incremento de tempo constante de 86400 s (1 dia) para a integração através do tempo. O incremento é suficientemente alto para evitar qualquer problema na resposta do

elemento enriquecido com 5 nós. Os parâmetros de material do arenito (Berea) e da falha estão listados na Tabela 5-8. O fluido que ocupa o meio poroso tem uma viscosidade de 6 cP, peso específico de 8 KN/m^3 e um módulo volumétrico (K_f) de 3,3 GPa.

Tabela 5-8: Parâmetros de material para o reservatório com falha selante

Arenito		Falha	
E (GPa)	14,40	r_{nn} (GPa/m)	5,00
ν	0,20	r_{ss} (GPa/m)	1,00
k (mD)	190,00	k_n (mD)	0,001
ϕ	0,19	k_t (mD)	0,01
Ks (GPa)	36,00	ϕ	0,19
***	***	Ks (GPa)	36,00

Dois malhas foram geradas para o exemplo (ilustradas na Figura 5-41, página 173), elas foram construídas de modo que cada poço fique posicionado em um nó. A malha em que o elemento enriquecido é introduzido, gerada pelo GiD, contém 1600 elementos e 922 nós (sendo 61 nós associados à falha). Os elementos têm a forma de um triângulo retângulo isósceles com dimensões de 50 x 50 x 70,71 m. A malha em que a descontinuidade é discretizada, gerada pelo ABAQUS-CAE, possui 1051 elementos e 1114 nós. Os elementos desta malha possuem tamanho variável sendo que o maior deles tem 50 x 50 m. A linha vermelha tracejada indica a posição aproximada da falha.

É interessante observar a necessidade que o ABAQUS-CAE tem em gerar mais elementos para acomodar a falha discretizada na malha (Figura 5-41 (b)). Essa necessidade fez com que a malha apresentasse uma distribuição heterogênea de elementos, tanto em número como em tamanho, principalmente na região próxima às extremidades da falha, ao passo que o elemento enriquecido possibilitou o uso de uma malha uniforme (Figura 5-41 (a)).

A fim de comparar as respostas obtidas pelos elementos CPE4P e enriquecido, valores de poro-pressão são medidos ao longo da posição (A) (Figura 5-40). Como referência, adota-se que o ponto com distância 0 m ao longo da posição (A) está localizado no eixo x (y igual a 0 m). A Figura 5-42, página 174,

mostra a resposta de poro-pressão ao longo da posição (A) para três instantes do tempo.

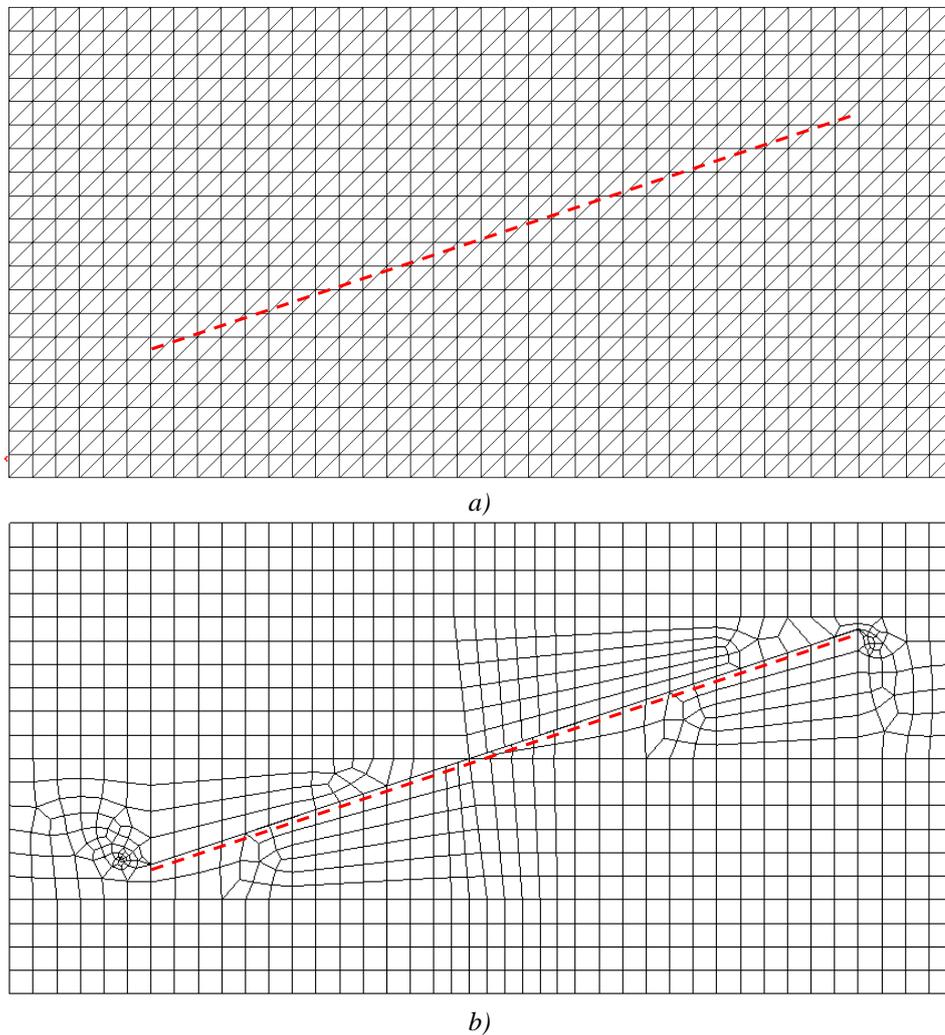


Figura 5-41 – Malhas geradas para o exemplo de reservatório: a) GiD, b) ABAQUS-CAE

Ao tomar a distância de 475 m como referência, indicada pelo ponto B na Figura 5-40 como a interseção entre a falha e a posição (A), a Figura 5-42 mostra que a maior redução de poro-pressão ocorre à direita da falha. No tempo de 133 dias, o fluxo passou da condição de regime transiente para permanente.

Observando as curvas de poro-pressão previstas pelo elemento CPE4P, indicadas pelas curvas em linha cheia, um ponto de mínimo e outro de máximo de poro-pressão são identificados. Localizado à direita da falha (distância de 500 m), o ponto com valor mínimo de poro-pressão corresponde à pressão p_{wf} aplicada no poço produtor P2 (24,50 MPa). À esquerda da falha, o valor máximo de poro-

pressão representa a pressão p_{wf} aplicada no poço injetor I1 (34,00 MPa aproximadamente).

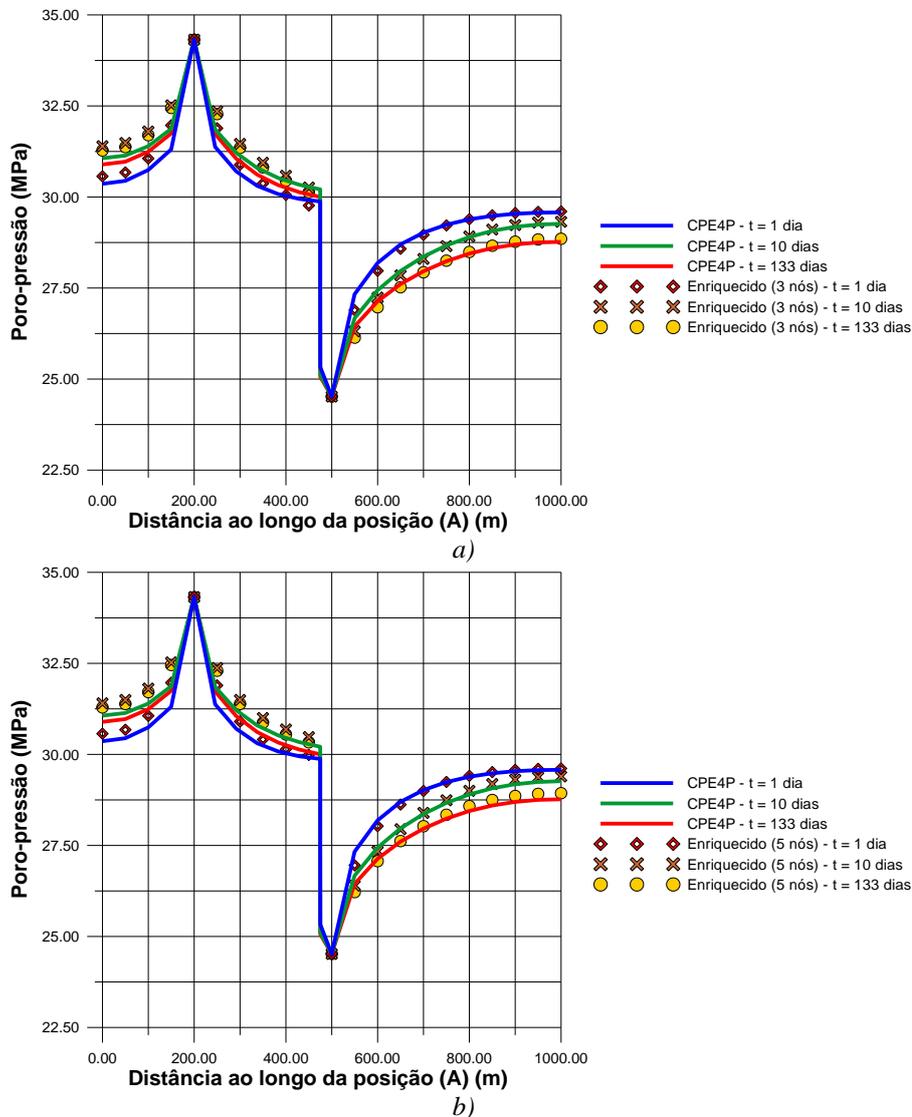


Figura 5-42: Curvas de poro-pressão previstas pelo elemento enriquecido ao longo da posição A: a) 3 nós, b) 5 nós

Considerando ainda a resposta do elemento CPE4P, dois comportamentos são vistos nitidamente na Figura 5-42. À direita da falha, distância acima de 475 m, a poro-pressão no reservatório diminui devido à ação do poço produtor P2. Por exemplo, para o contorno do reservatório (distância de 1000 m), a pressão estática (p_e) reduz de 29,5 para 28,7 MPa entre os tempos de 1 e 133 dias. À esquerda da falha, a poro-pressão no reservatório aumenta com o tempo devido à injeção de fluido pelo poço I1.

Para distâncias menores que 475 m, a curva de poro-pressão tende a ser simétrica em relação ao poço I1 (distância de 200 m). O mesmo comportamento não é visto para distâncias maiores que 475 m. À esquerda do poço P2 (distância de 500 m), a curva de poro-pressão apresenta uma forma similar a uma curva logarítmica, enquanto, à direita do poço P2, a variação de poro-pressão é descrita praticamente por uma reta vertical. Essa variação praticamente vertical de poro-pressão é o indício de que a falha age como meio selante.

Independentemente do tempo considerado, a Figura 5-42 mostra que a resposta de poro-pressão prevista pelo elemento enriquecido com 3 ou 5 nós é muito próxima daquela determinada pelo elemento CPE4P. A pequena diferença vista entre as curvas de poro-pressão pode ser atribuída ao maior refinamento da malha gerada pelo ABAQUS e, possivelmente, ao valor do parâmetro de armazenamento.

Para malhas que tenham refinamento semelhante, o resultado da Figura 5-42 permite dizer que, mesmo em malhas grosseiras, o modelo numérico que faz uso do elemento enriquecido com 3 ou 5 nós reproduz de modo satisfatório a resposta de poro-pressão de um modelo em que a falha selante é discretizada.

A fim de ilustrar o comportamento do fluxo de fluido no interior do reservatório, um mapa de vetor de fluxo é ilustrado na Figura 5-43, página 176. Cada vetor no mapa corresponde ao vetor unitário do fluxo determinado pela lei de Darcy. Optou-se por usar o vetor unitário porque o módulo do vetor de fluxo é muito pequeno quando comparado à dimensão do reservatório. Para permitir a visualização dos vetores no mapa, um fator de amplificação igual 70 vezes foi adotado.

O mapa é construído determinando o vetor de fluxo no centroide dos elementos CST. Para o elemento enriquecido são necessários três vetores: dois para os subdomínios e um para a descontinuidade. Idêntico ao elemento CST, o vetor de fluxo no elemento enriquecido é calculado no centroide de cada subdomínio. O mapa é feito apenas com resposta obtida pelo modelo que utiliza o elemento enriquecido com 3 nós.

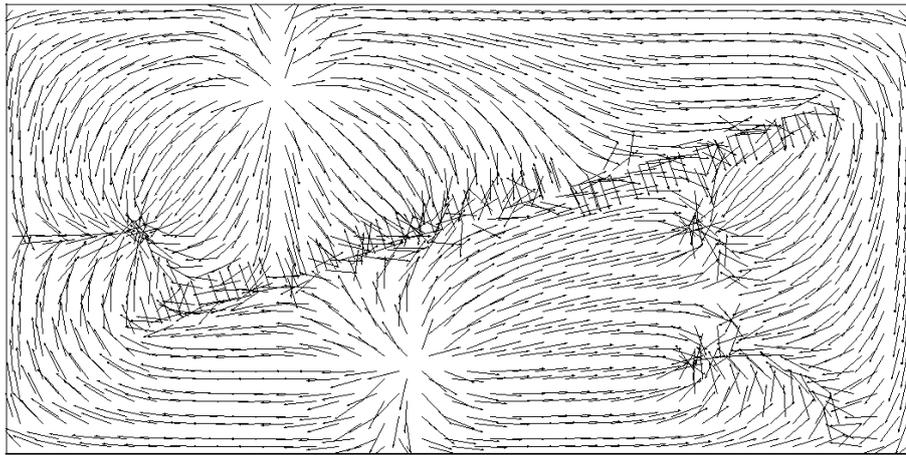


Figura 5-43: Mapa de vetor unitário de fluxo para o reservatório com uma falha selante obtido pelo elemento enriquecido com 3 nós para o tempo de 133 dias

Dois comportamentos podem ser observados na Figura 5-43. O primeiro comportamento é referente aos poços. Observa-se que, na vizinhança dos poços P1, P3 e P4, os vetores de fluxo tendem a se aproximar ou convergir, indicando que o fluido flui de regiões distantes do reservatório para os poços. O poço P2 também tem este comportamento, mas a proximidade com a falha atrapalha a visualização. Ao redor dos poços I1 e I2, os vetores de fluxo tendem a se afastar ou divergir, indicando que o fluido migra do poço para regiões mais distantes do reservatório.

O segundo comportamento é relativo à falha. Por ter uma permeabilidade menor do que o arenito, a falha induz os vetores de fluxo a terem uma direção quase paralela a ela mostrando que o fluido não atravessa a falha. Esse paralelismo é visto mais facilmente próximo aos poços P4 e I1. Ao longo da falha, é possível identificar vetores de fluxo perpendiculares a ela e orientados em direção aos poços P1 e P4. Estes vetores não atravessam a falha, eles partem (ou têm origem) exatamente em cada face da falha.

A título de ilustração, a Figura 5-44 mostra os mapas de poro-pressão do reservatório para o tempo de 133 dias obtidos pelos elementos CPE4P e enriquecido com 3 nós. O contraste do campo de poro-pressão no reservatório acima e abaixo da falha, área limitada pelos poços P1, P2 e I1, é outro indicio de que o elemento enriquecido é capaz de reproduzir o aspecto selante da falha.

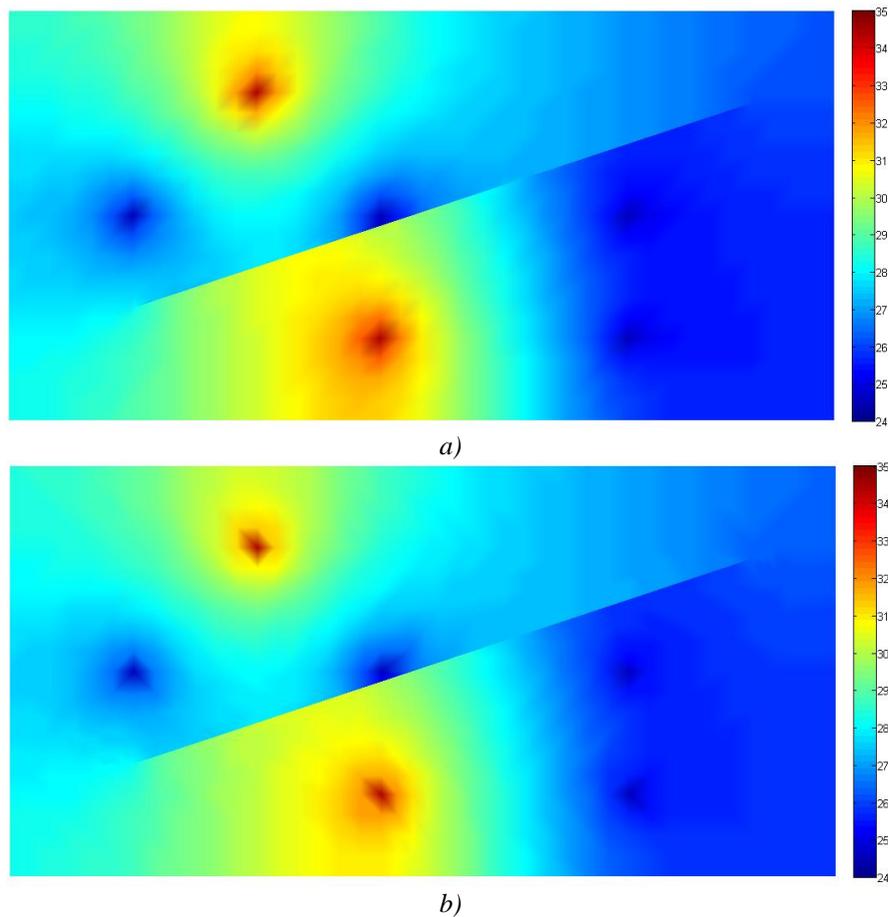


Figura 5-44: Mapas de poro-pressão para o reservatório com uma falha selante para o tempo de 133 dias: (a) elemento enriquecido com 3 nós, (b) elemento CPE4P

5.4.1.2. Falha condutora

Para ilustrar a representação de uma falha condutora pelo elemento enriquecido, dois exemplos de fluxo são apresentados nesta seção. Identificado pelo nome exemplo I, o primeiro exemplo é idêntico ao reservatório com falha selante, exceto pelo valor de permeabilidade adotado para a falha. O segundo exemplo, identificado pelo nome exemplo II, tem o *layout* de poços e todos os parâmetros de material alterados.

Ao alterar o *layout* dos poços e o contraste de permeabilidade entre o arenito e a falha, os exemplos de reservatório permitem ilustrar a influência da aproximação de poro-pressão na descontinuidade, mencionada na seção 3.2.2, sobre a resposta de poro-pressão obtida pelo elemento enriquecido.

O primeiro exemplo a ser apresentado é o exemplo I. Exceto pelo valor de permeabilidade na falha, tal exemplo é idêntico ao reservatório com uma falha

selante abordado na seção 5.4.1.1. Para o exemplo I, as permeabilidades k_n e k_t da falha passam a ter os valores 1D e 10 D respectivamente. A permeabilidade k_t é aproximadamente 53 vezes maior que a permeabilidade do arenito k , uma razão de permeabilidade (k_t/k) relativamente baixa. Pelo fato do exemplo I ser idêntico ao exemplo de falha selante, nenhuma descrição a respeito de parâmetros de material, condições de contorno e malhas são apresentados nesta seção. Apenas os resultados do exemplo I são descritos neste item.

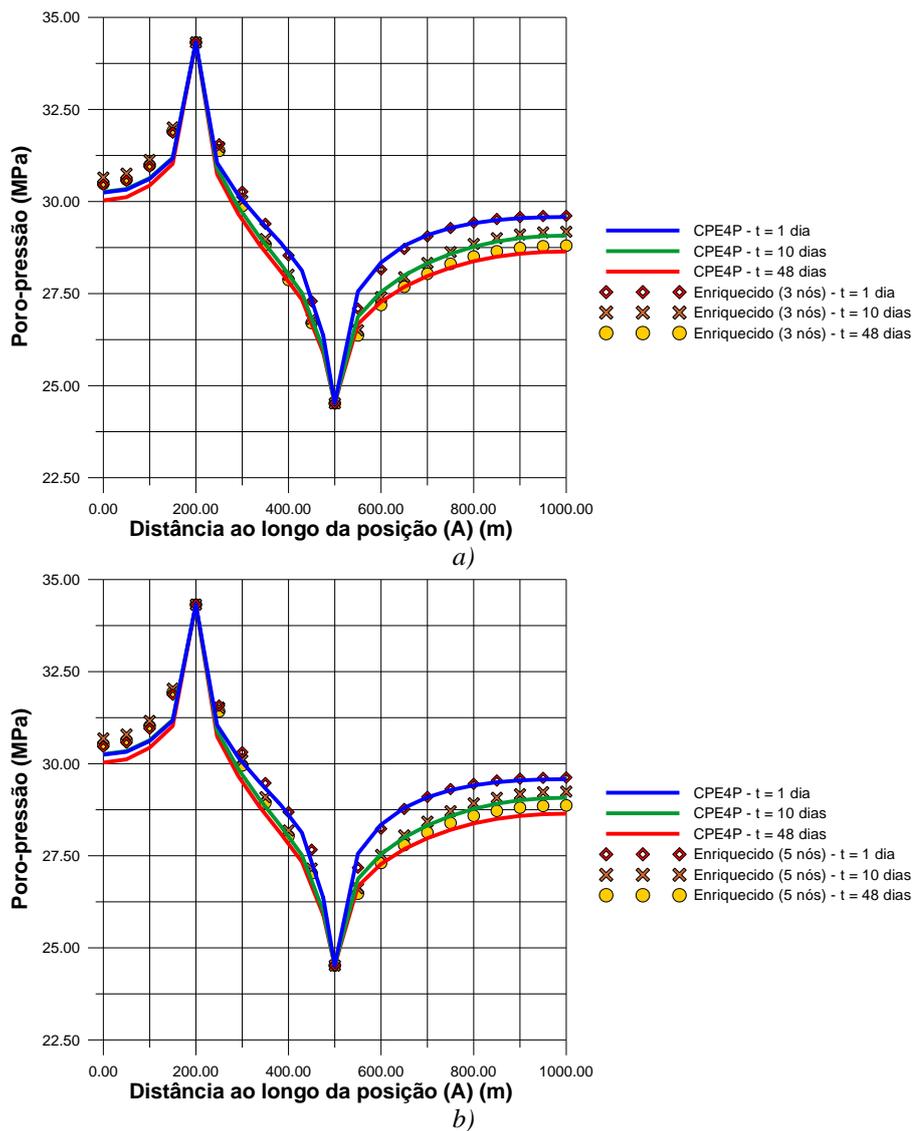


Figura 5-45: Curvas de poro-pressão previstas pelo elemento enriquecido ao longo da posição A: a) 3 nós, b) 5 nós

De forma idêntica ao exemplo de falha selante, a comparação dos elementos CPE4P e enriquecido é feita pela leitura dos valores de poro-pressão ao longo da

posição (A) indicada na Figura 5-40. A Figura 5-45 mostra a resposta de poro-pressão do exemplo I, ao longo da posição (A), para três instantes do tempo. O fluxo passa da condição de regime transiente para permanente no tempo de 48 dias.

Observando as curvas de poro-pressão determinadas pelo elemento CPE4P, indicadas pelas curvas em linha cheia, um ponto de mínimo e outro de máximo de poro-pressão são identificados. Localizado na distância de 500 m, o ponto com valor mínimo de poro-pressão corresponde à pressão p_{wf} de 24,52 MPa aplicada no poço produtor P2. O ponto com valor máximo de poro-pressão, localizado na distância de 200 m, representa a pressão p_{wf} de 34,23 MPa aplicada no poço injetor I1.

Ao contrário do exemplo de falha selante, aparentemente, a falha ao atuar como meio condutor não cria uma discrepância no campo de poro-pressão. A Figura 5-45 mostra uma variação suave de poro-pressão no espaço compreendido entre o poço I1 e o P2. Mesmo sobre a falha, distância de 475 m (ponto B indicado na Figura 5-40), não há nenhuma alteração visível.

A suavidade nas curvas de poro-pressão entre os poços I1 e P2 está associada ao fato de que a falha, agindo como meio condutor, facilita a passagem de fluido através dela o que evita a variação brusca de poro-pressão vista no caso da falha selante.

Outro efeito relacionado à natureza de meio condutor da falha é a pequena diferença nas curvas de poro-pressão à esquerda e à direita do poço P2. Avaliando ainda a resposta do elemento CPE4P, nota-se que a curva de poro-pressão à esquerda do poço P2 tem uma redução menor do que à direita dele para um mesmo instante de tempo. Para o tempo de 1 dia, a poro-pressão na distância de 400 m é igual a 28,75 MPa, enquanto a poro-pressão na distância de 600 m é igual a 28,00 MPa aproximadamente. A redução de poro-pressão é menor do lado esquerdo do poço (distâncias menores do que 500 m) devido à injeção de fluido pelo poço injetor I1.

Para distâncias abaixo de 200 m (à esquerda do poço I1) e acima de 500 m (à direita do poço P2), as curvas de poro-pressão do exemplo I têm valores praticamente iguais aos obtidos para o exemplo de reservatório com falha selante.

Além disso, conforme visto na Figura 5-45, a resposta de poro-pressão prevista pelo elemento enriquecido com 3 ou 5 nós é muito próxima daquela determinada pelo elemento CPE4P independente do tempo considerado.

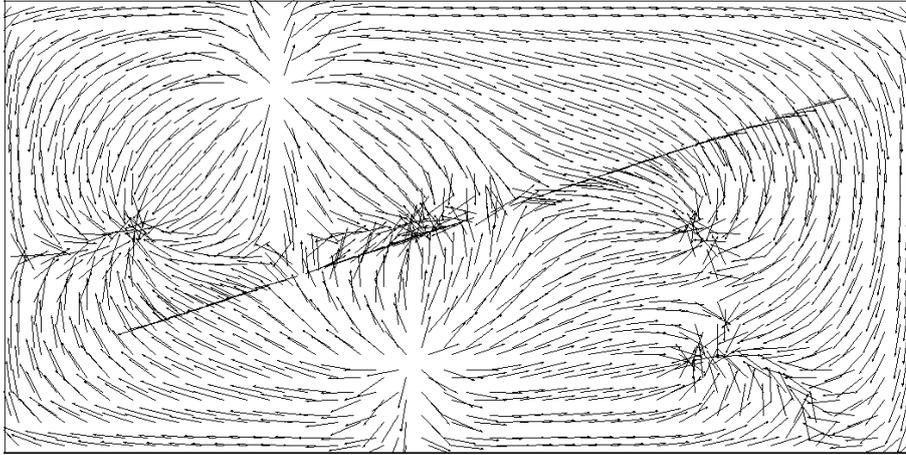


Figura 5-46: Mapa de vetor unitário de fluxo para o reservatório com uma falha condutora obtida pelo elemento enriquecido com 3 nós para o tempo de 48 dias.

De modo idêntico ao exemplo de reservatório com falha selante, a Figura 5-46 ilustra um mapa de vetor de fluxo obtido pelo elemento enriquecido com 3 nós para o exemplo I. O mesmo procedimento para a construção do mapa de vetor da Figura 5-43 é adotado aqui.

Dois comportamentos são identificados na Figura 5-46. O primeiro comportamento é referente aos poços. Ao redor dos poços I1 e I2, os vetores de fluxo tendem a se afastar ou divergir, indicando que o fluido flui dos poços para regiões mais afastadas. Para os poços P1, P2, P3 e P4, o comportamento observado é a concentração ou convergência dos vetores de fluxo, indicando que o fluido migra de regiões distantes do reservatório para os poços.

O segundo comportamento é relativo à falha. Por ter uma permeabilidade maior do que o arenito, nenhuma mudança na orientação dos vetores próximos à falha é vista. Esse comportamento é observado pelos vetores de fluxo que atravessam a falha, principalmente entre os poços I1, P1 e P2. A falha age como um meio condutor, mas sua influência é pequena. Apenas uma pequena parte dos vetores de fluxo tende a se alinhar à falha.

O exemplo I mostrou que, para um razão de permeabilidade relativamente baixa (k_f/k), a resposta de poro-pressão prevista pelos elementos enriquecidos com

3 e 5 nós é idêntica. Visando explicitar a influência da aproximação de poro-pressão na descontinuidade, um segundo exemplo de reservatório é modelado (exemplo II). A Figura 5-47 ilustra o reservatório adotado para o exemplo II.

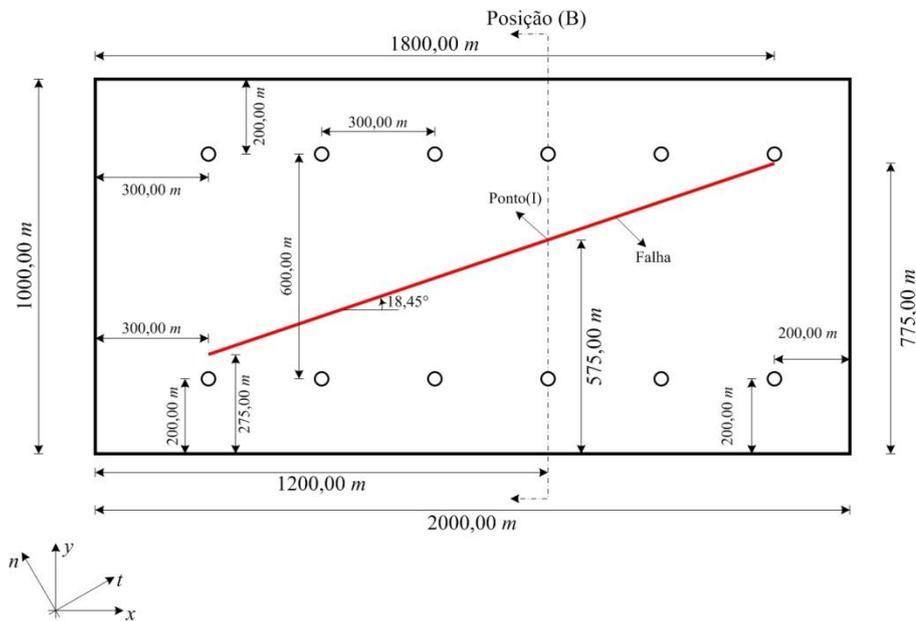


Figura 5-47: Reservatório com uma falha condutora (exemplo II)

As dimensões do reservatório do exemplo II são as mesmas do reservatório com selante (seção 5.4.1.1), isto é, ele tem 2000 m na direção x, 1000 m na direção y e uma espessura unitária na direção z (perpendicular ao plano xy). A falha é um segmento de reta limitado entre os pontos (300, 275) m e (1800, 775) m com uma inclinação de 18,45° em relação ao eixo x. A espessura da falha no plano xy é igual a 10 cm. Um novo *layout* de poços é adotado a fim de permitir uma visualização mais nítida da falha em um mapa de poro-pressão.

Doze poços produtores são locados no reservatório. Usando o eixo xy como referência, cada poço é posicionado a uma distância de 300 m em relação ao outro na direção x e 600 m na direção y. Existem apenas poços produtores e todos eles operam com uma pressão de fundo de poço (p_{wf}) de 24,52 MPa (250 Kgf/cm²). A pressão estática (p_e) no reservatório é de 29,42 MPa (300 Kgf/cm²) no tempo de 0 s. Nenhuma condição de poro-pressão é prescrita no contorno do reservatório. O fluxo de fluido ocorre em regime transiente, sendo adotado um incremento de tempo constante de 86400 s (1 dia) para a integração através do tempo. O arenito Berea é substituído pelo arenito Weber. A falha praticamente não possui material de preenchimento, sendo tratada como um meio de altíssima permeabilidade. Os

parâmetros de material do arenito Weber e da falha estão listados na Tabela 5-9. O fluido que ocupa o meio poroso tem uma viscosidade de 6 cP e peso específico de 8 KN/m³.

Tabela 5-9: Parâmetros de material para o reservatório com falha condutora.

Arenito		Falha	
E (GPa)	27,60	r_{nn} (GPa/m)	***
ν	0,15	r_{ss} (GPa/m)	***
k (mD)	1 mD	k_n (D)	100
ϕ	0,06	k_t (D)	100
Ks (GPa)	36,00	ϕ	***
***	***	Ks (GPa)	***

A troca do arenito Berea pelo Weber tem por finalidade aumentar o contraste de permeabilidade entre o arenito e a falha. Para o exemplo II, a razão de permeabilidade (k_t/k) é igual a 1×10^6 . Cabe ressaltar que, em uma situação real, dificilmente o reservatório idealizado seria colocado em produção. O arenito Weber é muito fechado, isto é, possui baixa permeabilidade.

As mesmas malhas empregadas na modelagem do reservatório de falha selante (Figura 5-41) são utilizadas no exemplo II. A comparação entre os elementos CPE4P e enriquecido é feita pela medição dos valores de poro-pressão ao longo da posição (B) (Figura 5-47). Como referência, adota-se que o ponto com distância 0 m ao longo da posição (B) está localizado no eixo x (y igual a 0 m). A Figura 5-48, página 183, mostra a resposta de poro-pressão ao longo da posição (B) obtida pelo elemento enriquecido com 3 nós.

Observando a resposta do elemento CPE4P na Figura 5-48, indicada pelas curvas em linha cheia, são identificados dois pontos com um valor mínimo de poro-pressão (aproximadamente 24,5 MPa no gráfico) para um tempo igual ou menor que 120 dias. Esses pontos representam a pressão p_{wf} aplicada nos poços produtores. O fluxo passa da condição de regime transiente para permanente no tempo igual a 810 dias.

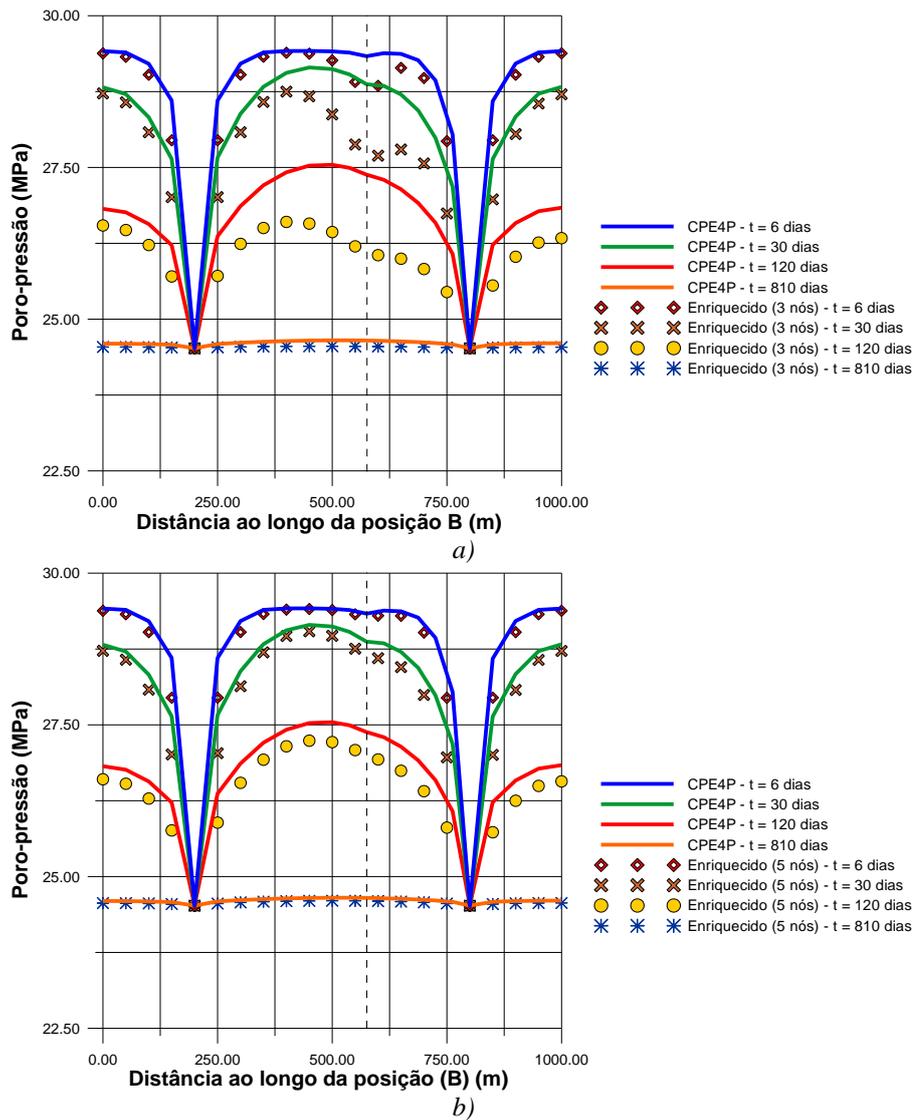


Figura 5-48: Curvas de poro-pressão previstas pelo elemento enriquecido ao longo da posição (B): a) 3 nós, b) 5 nós.

Ao longo da posição (B), as curvas de poro-pressão do elemento CPE4P tendem a ter uma distribuição simétrica em relação à distância 500 m, sugerindo que a falha condutora exerce pouca influência neste exemplo também. Localizada na distância de 575 m sobre a posição (B) (indicada na Figura 5-48 por uma linha tracejada, cor preta), a falha introduz uma variação pequena de poro-pressão. Esta variação é vista mais facilmente nas curvas associadas aos tempos de 6 e 30 dias. Para o tempo de 810 dias, os valores de poro-pressão ao longo da posição (B) praticamente se igualam a pressão p_{wf} .

Diferentemente do exemplo I, as respostas das duas aproximações do elemento enriquecido para o exemplo II não são iguais. A resposta de poro-

pressão prevista pelo elemento enriquecido com 3 nós próximo à falha é muito menor do que a determinada pelo elemento CPE4P (Figura 5-48(a)). À medida que o tempo aumenta, a resposta do elemento enriquecido afasta-se mais da resposta prevista pelo elemento CPE4P e passa a afetar pontos mais distantes da falha.

A razão da resposta do elemento enriquecido com 3 nós ter sido tão diferente do elemento CPE4P está ligada à interpolação do valor de poro-pressão na falha. Como descrito na seção 3.2.2, ao interpolar a poro-pressão na descontinuidade, a submatriz de fluxo tangencial à descontinuidade passa a ter a mesma ordem da matriz de fluxo do elemento enriquecido. Ao definir um valor de permeabilidade tangencial muito alto, a matriz inteira do elemento enriquecido passa a ser muito permeável. Como o refinamento da malha é grosseiro, o elemento enriquecido com 3 nós introduz regiões muito grandes e com alta permeabilidade no reservatório. Essas regiões permitem uma dissipação maior de poro-pressão, acentuando a redução de poro-pressão no reservatório.

Por outro lado, as respostas dos elementos CPE4P e enriquecido com 5 nós são muito próximas como ilustrado na Figura 5-48(b). Para os tempos de 6 e 30 dias, as curvas de poro-pressão determinadas pelos elementos CPE4P e enriquecido com 5 nós tendem a ser coincidentes. Para o tempo de 120 dias, as curvas afastam-se, mas voltam a se igualar no tempo de 810 dias. A pequena diferença observada nas respostas está ligada ao refinamento da malha e, possivelmente, a definição do parâmetro de armazenamento.

A definição da poro-pressão na descontinuidade como um grau de liberdade independente, hipótese do elemento enriquecido com 5 nós, limita a influência da permeabilidade tangencial sobre a matriz de fluxo do elemento enriquecido. Essa característica é o fator que permitiu ao elemento enriquecido com 5 nós obter uma resposta de poro-pressão semelhante à determinada pelo elemento CPE4P.

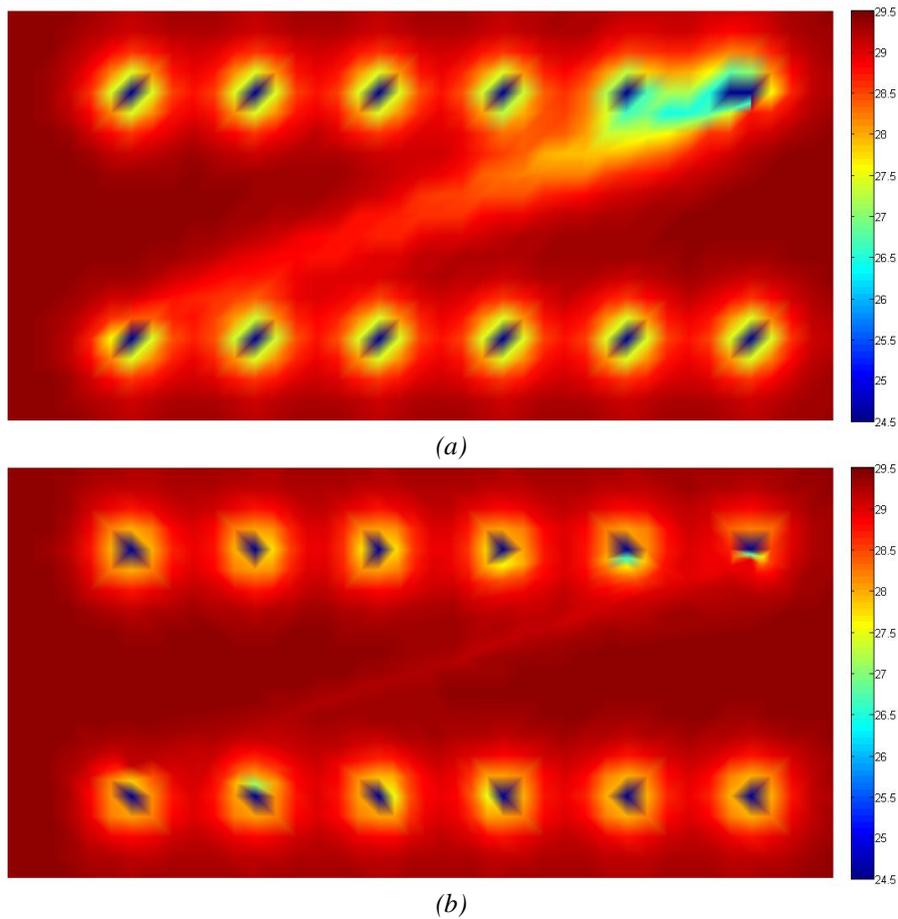


Figura 5-49: Mapas de poro-pressão do reservatório com uma falha condutora para o tempo de 15 dias: (a) elemento enriquecido com 3 nós, (b) elemento CPE4P

O efeito da aproximação de poro-pressão na descontinuidade é visualizado de modo mais claro através de mapas de poro-pressão. A Figura 5-49 mostra os mapas de poro-pressão obtidos pelos elementos CPE4P e enriquecido (com 3 nós) para o tempo de 15 dias. A Figura 5-50, página 186, mostra os mesmos mapas, desta vez, determinados pelos elementos CPE4P e enriquecido com 5 nós. Optou-se plotar o mapa de poro-pressão no tempo de 15 dias, pois ele permite observar a ação da falha com maior facilidade.

Ao observar os mapas de poro-pressão da Figura 5-49, é visível que o elemento enriquecido com 3 nós impõe uma redução de poro-pressão a uma região muito maior do que a descrita pela falha. Esta região está indicada no mapa pela cor laranja, valores de poro-pressão entre 28,00 a 28,50 MPa. O efeito da interpolação de poro-pressão na descontinuidade é mais perceptível próximo do poço com coordenadas (1800, 800) m, onde a poro-pressão no reservatório assume valores em torno de 27,00 MPa.

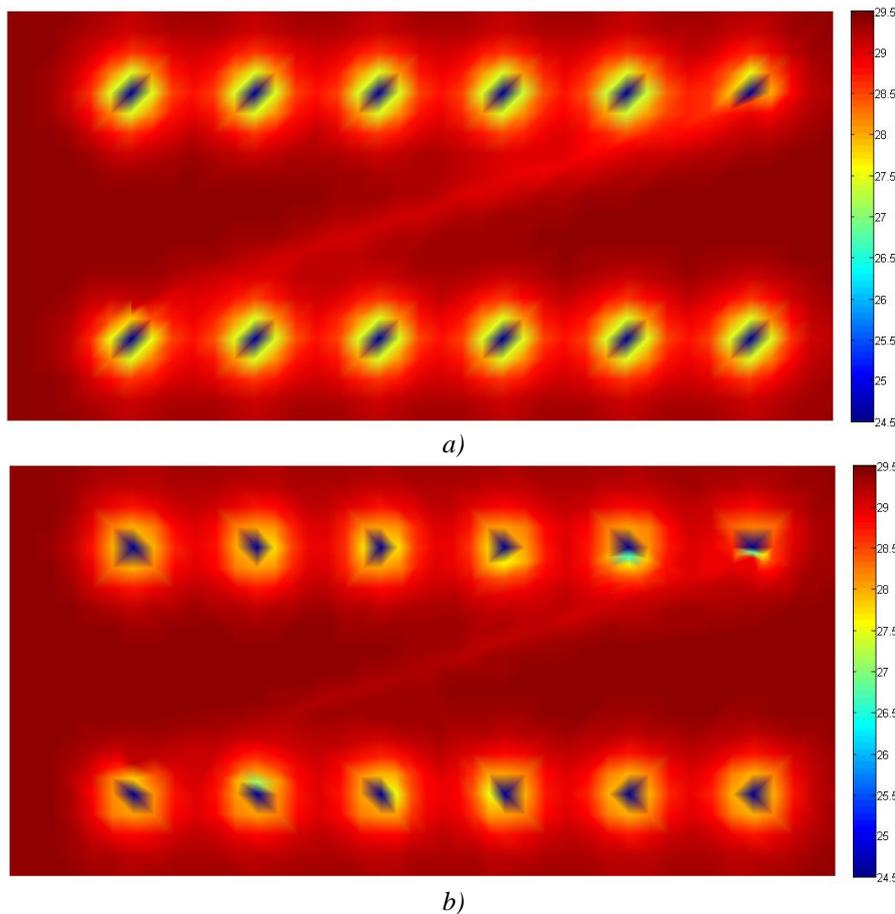


Figura 5-50 – Mapas de poro-pressão do reservatório com uma falha condutora para o tempo de 15 dias: a) elemento enriquecido com 5 nós, b) elemento CPE4P

A influência da falha no campo de poro-pressão do reservatório torna-se menor ao usar o elemento enriquecido (com 5 nós) para representá-la como ilustrado na Figura 5-50(a). A falha introduz no reservatório apenas uma estreita faixa de poro-pressão com um valor de 28,50 MPa aproximadamente.

Os resultados ilustrados nas figuras 5-46, 5-47 e 5-48 indicam que o uso do elemento enriquecido para descrever falhas condutoras, em modelos numéricos com malhas grosseiras, requer mais critério. Para esta condição de modelagem, o elemento enriquecido com 5 nós produz bons resultados aparentando ser indiferente quanto ao valor de permeabilidade tangencial adotado.

Para malhas grosseiras e em que a falha atua como meio condutor, o elemento enriquecido com 3 nós prevê uma boa resposta de poro-pressão quando o contraste de permeabilidade entre a falha e o arenito é baixo conforme mostrado no exemplo I. Caso o contraste de permeabilidade entre a falha e o arenito seja

muito alto, a previsão da resposta de poro-pressão pelo elemento enriquecido com 3 nós perde qualidade como apontado no exemplo II.

O uso de valores de permeabilidade tangencial não descarta o uso do elemento enriquecido com 3 nós. Como visto no exemplo de fluxo desacoplado (seção 5.3.2) e no estudo de refinamento (apêndice A), o elemento enriquecido com 3 nós obtém ótimos resultados para malhas que tenham um bom refinamento. Isso garante a aplicação do elemento enriquecido com 3 nós na representação de falhas condutoras, mas é preciso um cuidado maior em relação ao refinamento de malha.

5.4.2. Acoplamento fluido-mecânico em um reservatório com uma falha pré-existente

Esta seção ilustra a representação de uma falha selante pelo elemento enriquecido com 3 nós para um reservatório em uma condição de acoplamento fluido-mecânico. Os resultados obtidos são comparados à resposta determinada pelo elemento CPE4P do programa ABAQUS. Pelo fato dos dois elementos não descreverem de modo equivalente o comportamento mecânico da falha, a comparação tem um caráter mais qualitativo. Os resultados obtidos pelo elemento enriquecido com 5 nós não são apresentados, mas eles são idênticos aos obtidos pelo elemento enriquecido com 3 nós.

O exemplo de reservatório apresentado nesta seção é diferente daqueles ilustrados para o fluxo de fluido. A posição e a dimensão da falha são alteradas de modo que o reservatório seja dividido completamente por uma falha selante como mostrado na Figura 5-51, página 188. O propósito dessa alteração é criar duas regiões no reservatório incomunicáveis, isto é, que não permitam o fluxo de fluido de uma região para outra. As dimensões do reservatório são 2000 m na direção x, 1000 m na direção y e 1 m na direção z (perpendicular ao plano xy e paralela à direção vertical). A falha está compreendida entre os pontos (555, 0) m e (1555, 1000) m, possui uma inclinação de 45° em relação ao eixo x e uma espessura de 10 cm no plano xy.

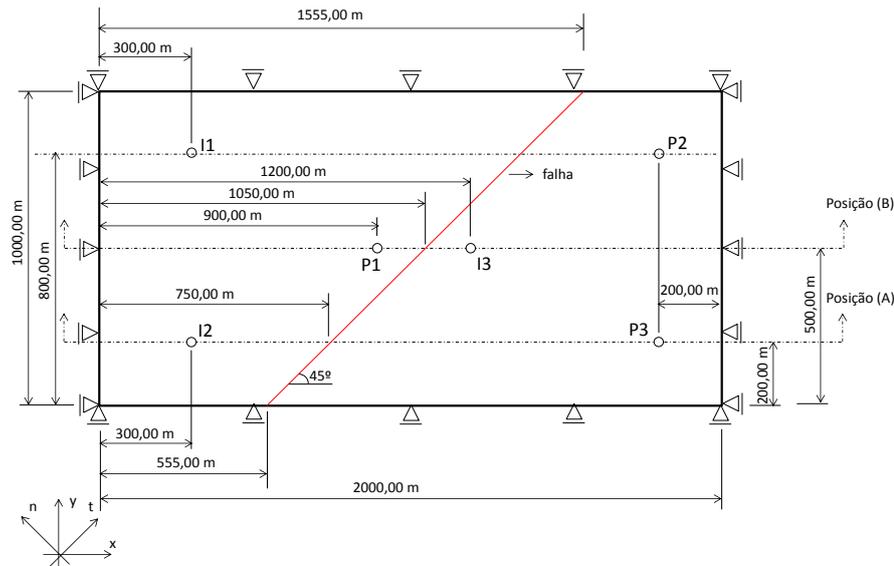


Figura 5-51: Reservatório bidimensional cortado por uma falha selante pré-existente

Três poços produtores e outros três injetores são localizados no reservatório. Os poços produtores, indicados pela letra P seguida por um número na Figura 5-51, operam com uma pressão de fundo de poço (p_{wf}) de 24,52 MPa (250 Kgf/cm²), os poços injetores, indicados pela letra I seguida por um número, operam a uma pressão de 34,23 MPa (350 Kgf/cm²). A pressão estática (p_e) no reservatório é igual a 29,42 MPa (300 Kgf/cm²) no tempo de 0 s. Nenhuma condição de poropressão é prescrita no contorno do reservatório. Nas faces do reservatório, o deslocamento na direção normal é restringido. Essa condição admite como hipótese que a região fora do reservatório é muito mais rígida. O fluxo de fluido ocorre em regime transiente, sendo adotado um incremento de tempo constante de 86400 s (1 dia) para a integração através do tempo. Os parâmetros de material do arenito (Berea) e da falha são os mesmos listados na Tabela 5-8. O fluido que ocupa o meio poroso tem uma viscosidade de 6 cP, peso específico de 8 KN/m³ e um módulo de variação volumétrica (K_f) igual a 3,3 GPa.

Considerando que o reservatório está situado a uma profundidade de 2500 m e um gradiente de *overburden* de 0,023 MPa (1 Psi/ft), define-se um estado inicial de tensão total σ_h , σ_H e σ_v igual a 43,22, 47,22 e 57,5 MPa respectivamente. As tensões σ_h , σ_H e σ_v são paralelas aos eixos x, y e z respectivamente. Utilizando os parâmetros E e K_s da Tabela 5-8 e a definição do coeficiente de Biot, o estado inicial de tensão efetiva correspondente é 19,98, 23,98 e 34,98 MPa. O coeficiente de Biot para o arenito é igual a 0,79.

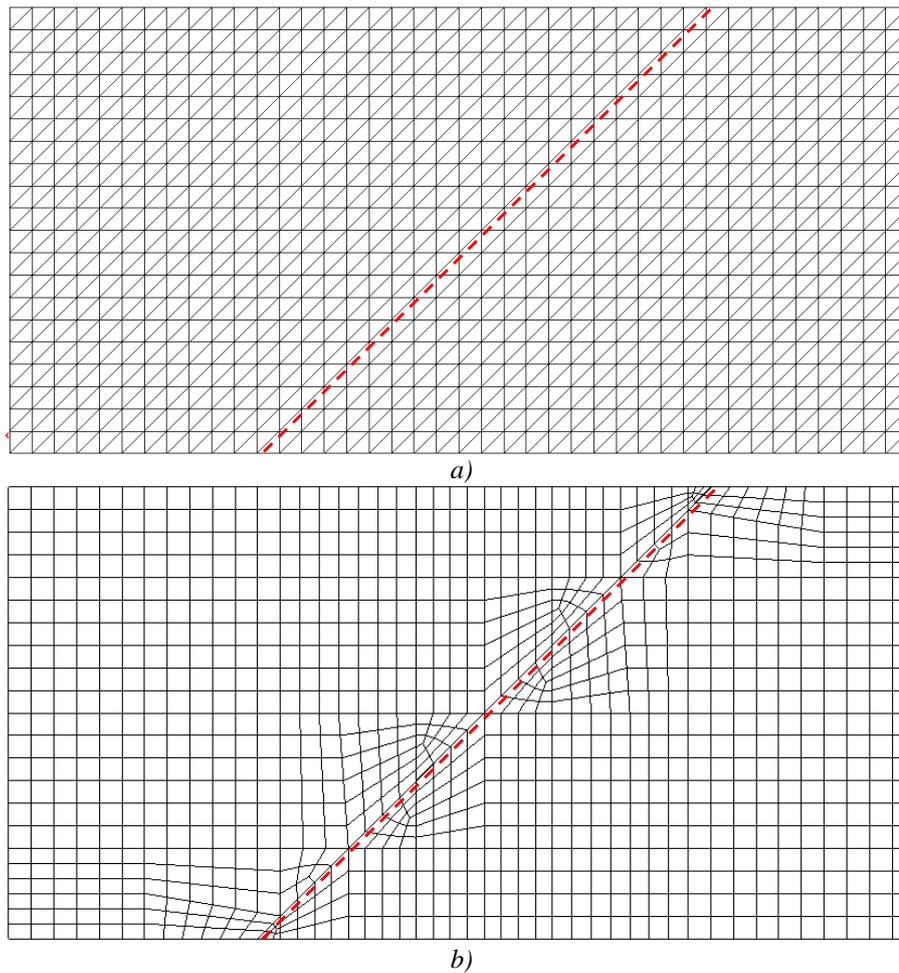


Figura 5-52: Malhas geradas para o exemplo de reservatório acoplado: a) GiD, b) Abaqus-CAE.

As malhas utilizadas no exemplo são ilustradas na Figura 5-52. A malha em que o elemento enriquecido é introduzido, gerada pelo GiD, contém 1600 elementos e 922 nós, sendo 41 nós associados à falha. Ela é a mesma do exemplo de fluxo (seção 5.4.1). A malha em que a descontinuidade é discretizada, gerada pelo ABAQUS-CAE, possui 1054 elementos e 1126 nós. Os elementos desta malha possuem tamanho variável sendo que o maior deles tem 50 x 50 m. A linha vermelha tracejada indica a posição aproximada da falha. Os poços são posicionados nos nós da malha.

Para comparar as respostas dos elementos CPE4P e enriquecido, três posições são definidas no reservatório (Figura 5-51). As posições (A) e (b) são usadas para medir as respostas de deslocamento na direção y e poro-pressão. A terceira posição é a face direita da falha onde são lidos os valores de deslocamento nas direções x e y . Como referência, adota-se que a distância 0 m para as posições

(A) e (B) está localizada na face esquerda do reservatório (x igual a 0 m). Para a face direita da falha, o ponto com distância 0 m está localizado no eixo y .

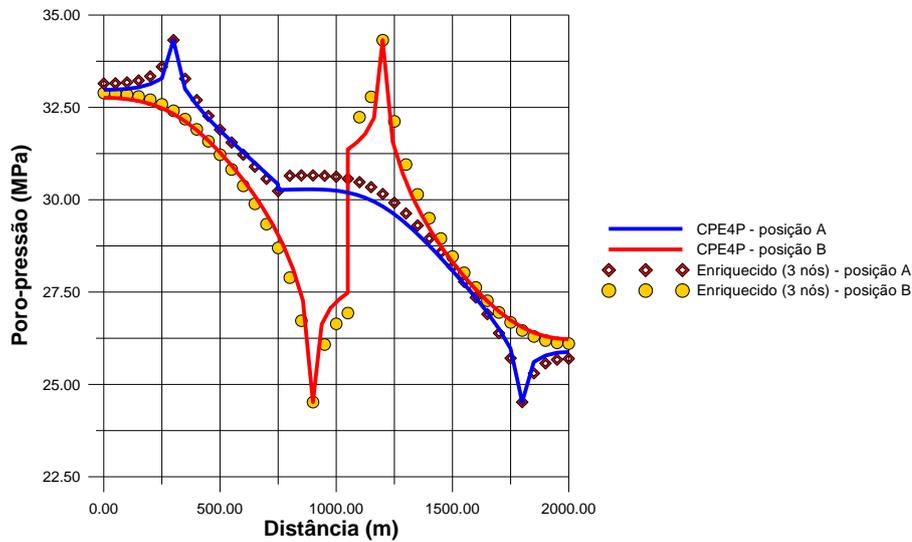


Figura 5-53: Curvas de poro-pressão ao longo das posições (A) e (B) para o tempo de 50 dias

A Figura 5-53 ilustra a resposta de poro-pressão obtida pelos elementos CPE4P e enriquecido com 3 nós, ao longo das posições (A) e (B), para o tempo de 50 dias (instante de tempo em que o fluxo de fluido atinge à condição de regime permanente). As curvas em linha cheia representam a resposta do elemento CPE4P, enquanto os pontos a resposta do elemento enriquecido com 3 nós.

Analisando a curva de poro-pressão obtida pelo elemento CPE4P para a posição B, dois pontos se destacam. O primeiro ponto é referente ao valor mínimo e máximo de poro-pressão na curva, 24,5 MPa e 34,00 MPa para as distâncias 900 e 1200 m respectivamente. Esses valores correspondem à pressão p_{wf} aplicada nos poços P1 e I3 respectivamente. O segundo ponto é a reta vertical vista na distância 1050 m. Essa reta representa a variação de poro-pressão (3,75 MPa aproximadamente) existente nos pontos imediatamente à esquerda e à direita da falha.

A curva de poro-pressão ao longo da posição (A) determinada pelo elemento CPE4P, exceto pelas distâncias, apresenta os mesmos valores mínimo e máximo de poro-pressão identificadas na posição B. Somente a variação de poro-pressão através da falha não é vista.

A curva de poro-pressão ao longo da posição A não exhibe uma variação nítida de poro-pressão, porém pode-se interpretar que a falha age como um meio

selante. Isso pode ser afirmado por dois motivos. O primeiro deles é que a curva de poro-pressão muda abruptamente na distância de 750 m. Caso a falha permitisse a passagem do fluido (condição não selante), a curva seria suave nesta distância. O segundo motivo é que o valor de poro-pressão tende a reduzir à direita da falha, enquanto, à esquerda, o valor de poro-pressão tende a aumentar. Este comportamento deixa evidente que há uma interrupção no fluxo de fluido do lado esquerdo para o direito da falha.

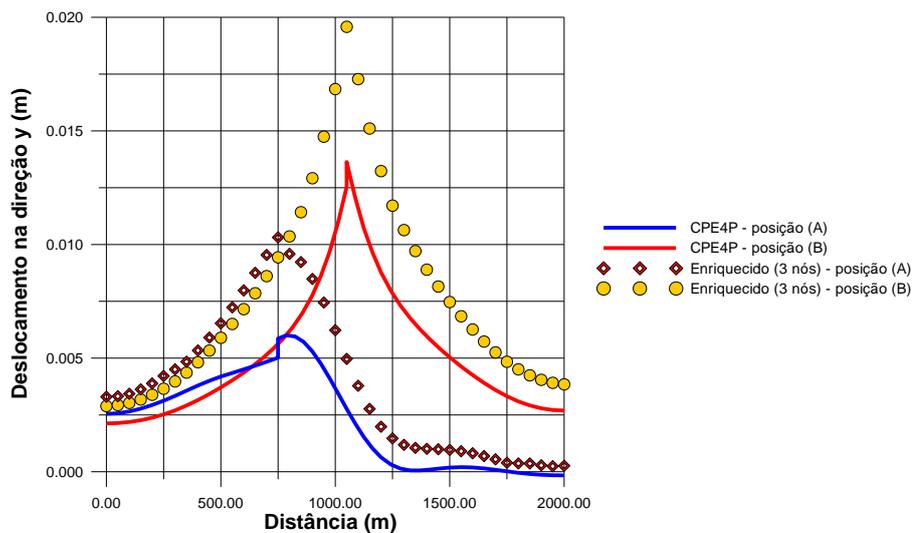


Figura 5-54: Curvas de deslocamento ao longo das posições (A) e (B) para o tempo de 50 dias.

Ao comparar as respostas de poro-pressão previstas pelos elementos CPE4P e enriquecido com 3 nós, observa-se que elas são muito próximas. A maior diferença nas respostas de poro-pressão é vista nas distâncias 750 e 1050 m, distâncias em que a falha intercepta as posições A e B respectivamente. Lembrando-se da ótima concordância de resultados obtidos pelos dois elementos no exemplo de fluxo em um reservatório com falha selante (seção 5.4.1.1, Figura 5-42) e de que a condição de regime permanente no tempo de 50 dias é atingida, é pouco provável que a diferença de respostas citada esteja relacionada ao valor do parâmetro de armazenamento. O motivo desta diferença possivelmente está associado ao termo de acoplamento na descontinuidade e ao refinamento de malha adotado nos dois modelos.

A mesma proximidade vista nas respostas de poro-pressão dos elementos CPE4P e enriquecido não é obtida para o deslocamento na direção y como ilustrado na Figura 5-54. Para o ponto imediatamente à direita da falha sobre a

posição B (distância de 1050 m), o deslocamento previsto pelo elemento CPE4P é igual a 1,363 cm, enquanto o deslocamento calculado pelo elemento enriquecido é igual a 1,958 cm. Retornando a explicação da seção 5.3.3.1, a provável razão desta diferença está associada à adição do valor de poro-pressão à componente de tensão normal do elemento CPE4P paralela à direção tangencial à falha.

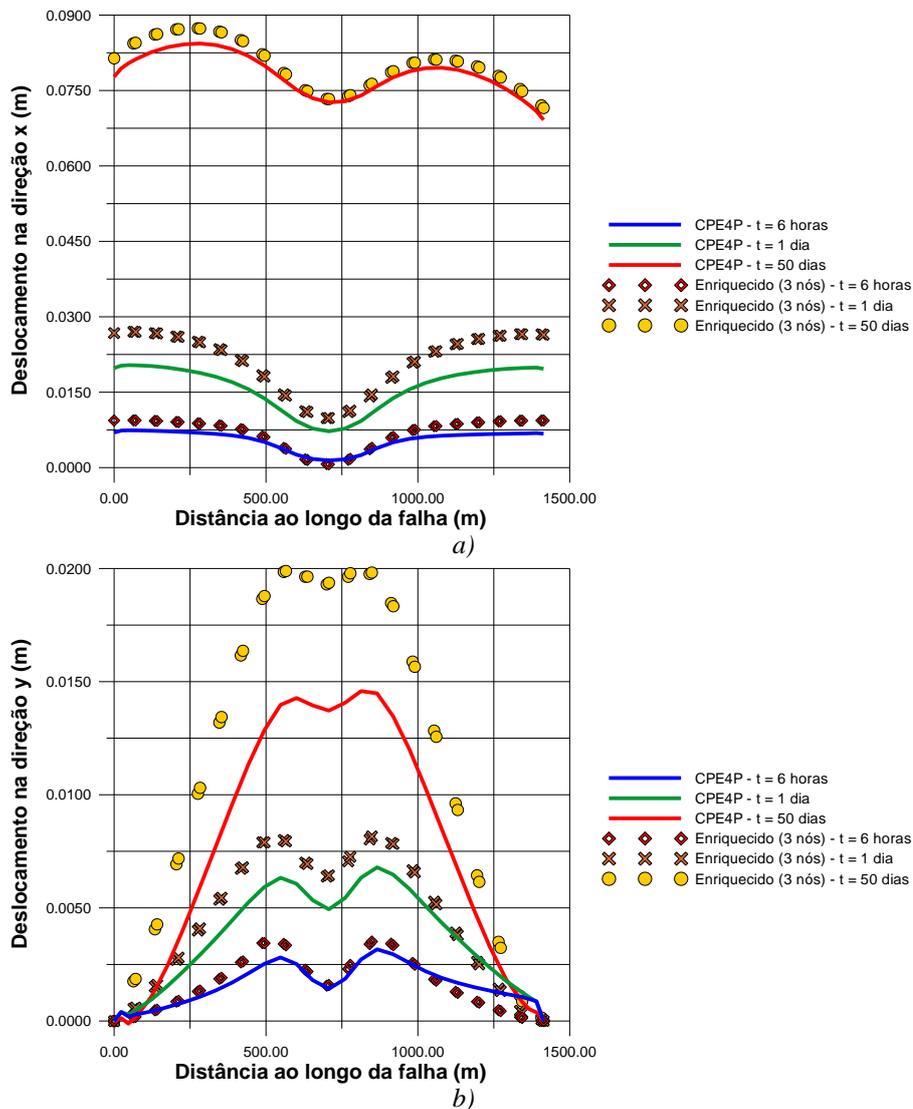


Figura 5-55: Curvas de deslocamento previstas pelos elementos CPE4P e enriquecido com 3 nós ao longo da falha: (a) direção x, (b) direção y

Em termos quantitativos, as respostas obtidas pelos elementos CPE4P e enriquecido não são próximas, mas, qualitativamente, os elementos descreveram o mesmo comportamento. As curvas previstas pelos dois elementos para as posições

A e B são praticamente paralelas e indicam uma forte variação na região próxima à falha.

Adicionalmente às posições (A) e (B), curvas de deslocamento nas direções x e y são construídas ao longo da face direita da falha para os tempos de 6 h, 1 e 50 dias. Para os três tempos citados, as curvas de deslocamento determinadas pelos elementos CPE4P e enriquecido com 3 nós apresentam o mesmo comportamento como ilustrado na Figura 5-55, página 192.

Ao avaliar a resposta de deslocamento na direção y através do tempo, verifica-se que a diferença de resultados entre os elementos CPE4P e enriquecido com 3 nós aumenta com o tempo como ilustrado na Figura 5-55(b). A maior diferença ocorre para o tempo de 50 dias. Para o ponto localizado na distância 500 m, tempo 50 dias, a resposta deslocamento obtida pelo elemento CPE4P é igual a 1,285 cm, enquanto o valor determinado pelo elemento enriquecido é igual a 1,878 cm.

O aspecto de simetria exibido pelas curvas de deslocamento na direção y em relação à distância de 700 m (metade do comprimento da falha) provavelmente está associado à disposição dos poços. Quanto ao aspecto de letra v descrito pelas curvas no intervalo compreendido entre as distâncias 500 e 1000 m, o provável motivo deve ser o diferencial de poro-pressão estabelecido entre os poços P1 e I3 (Figura 5-51).

Diferentemente do deslocamento na direção y, as curvas de deslocamento na direção x obtidas pelos elementos CPE4P e enriquecido com 3 nós apresentaram pouca diferença em termos quantitativos conforme ilustrado na Figura 5-55(a). Para a mesma distância de 500 m, tempo 50 dias, o deslocamento na direção x previsto pelo elemento CPE4P é igual a 7,997 cm, enquanto o deslocamento determinado pelo elemento enriquecido é igual a 8,193 cm. Ao comparar os deslocamentos nas direções x e y, indicando que o reservatório tende a ter uma movimentação maior na direção x.

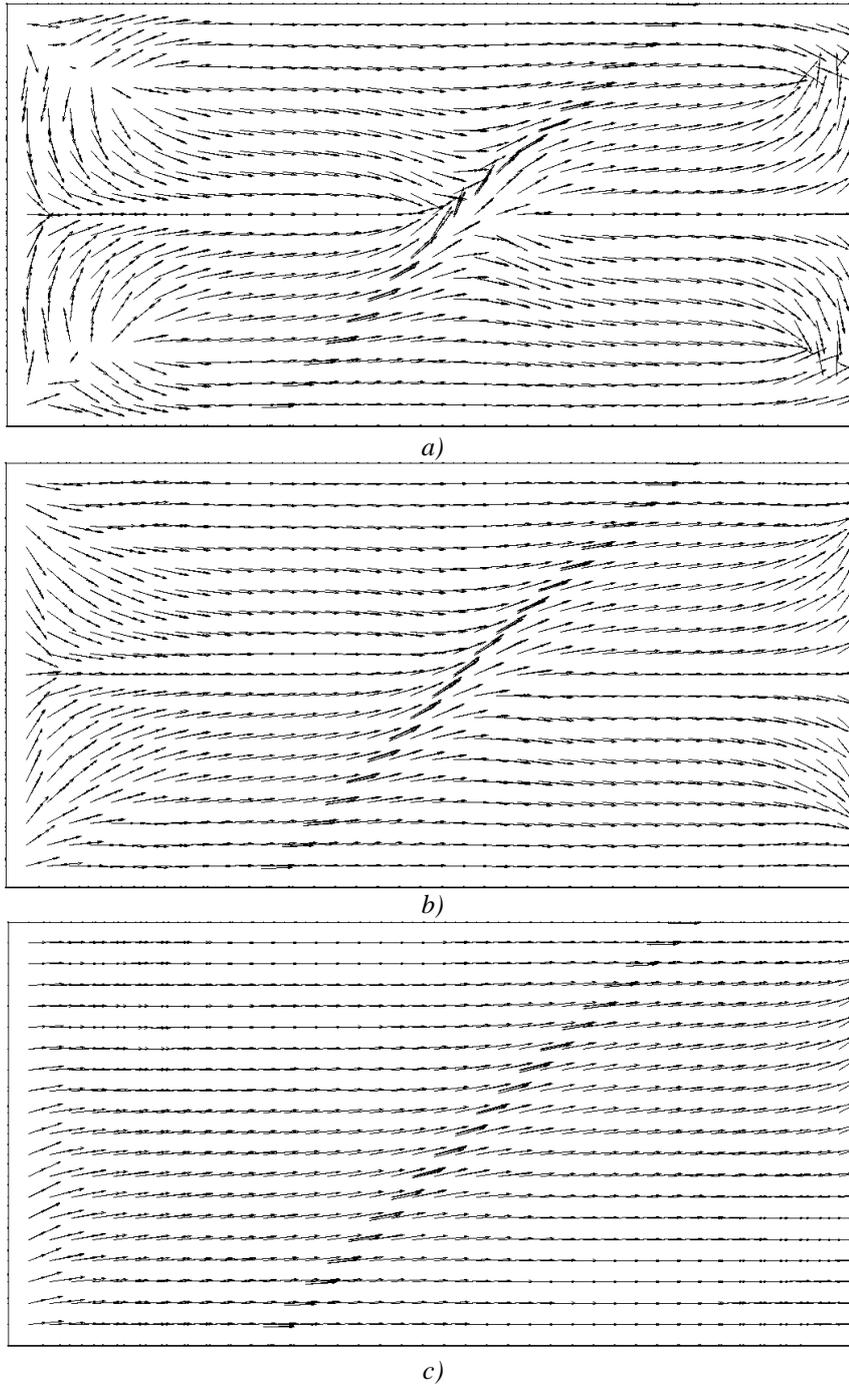


Figura 5-56: Mapas de vetor de deslocamento obtidos pelo elemento enriquecido com 3 nós para os tempos: a) 6 horas, b) 1 dia, c) 50 dias

Considerando a diferença existente entre os elementos CPE4P e enriquecido ao representarem a falha, o resultado das figuras 5-54 e 5-55 desperta atenção devido ao paralelismo das curvas previstas pelos dois elementos. O paralelismo das curvas e a proximidade dos valores de deslocamento x obtidos sugerem que o elemento enriquecido é capaz de reproduzir adequadamente o comportamento de uma falha em uma condição de acoplamento fluido-mecânico.

Para visualizar o campo de deslocamento no reservatório ao longo do tempo, três mapas de vetor de deslocamento são construídos como ilustrado na Figura 5-56. O mesmo procedimento para a construção dos mapas de vetor de fluxo foi seguido, exceto os valores de magnitude do vetor e fator de ampliação. A magnitude do vetor de deslocamento é igual à resultante das componentes de deslocamentos nas direções x e y , o fator de ampliação utilizado é igual a 2.

Os mapas de vetor de deslocamento que apresentam menor uniformidade são aqueles associados para os tempos de 6 h e 1 dia. Para o tempo de 6 h, é possível perceber que os vetores de deslocamento ao redor dos poços injetores tendem a se afastar um dos outros (divergir), movimento que é oposto ao redor dos poços produtores onde os vetores tendem a se aproximar (convergir). Para áreas afastadas dos poços, exceto a região da falha, os vetores são praticamente paralelos à direção x .

O afastamento dos vetores ao redor dos poços injetores reflete a expansão do meio poroso pelo aumento de poro-pressão, enquanto a aproximação dos vetores reflete a compressão do meio poroso pela redução de poro-pressão devido à ação dos poços produtores.

À medida que o tempo aumenta, os vetores de deslocamento próximos aos poços produtores e injetores deixam de apresentar o comportamento de convergência e divergência, tendendo a ficar paralelos à direção x como pode ser visto para os tempos de 1 e 50 dias.

Parte da falha e uma região vizinha a ela também apresentam uma mudança na direção dos vetores de deslocamento ao longo do tempo. Observando especificamente a falha, próximo à posição B (indicada na Figura 5-51), o vetor deslocamento é praticamente paralelo à falha no tempo de 6 h. Para os tempos de 1 e 50 dias, o vetor deslocamento é reorientado e passa a ser paralelo à direção x .

A mudança na orientação dos vetores ao longo da falha ilustrada na Figura 5-56 pode ser vista também através da Figura 5-55. Visualizando o intervalo compreendido entre as distâncias 625 e 875 m na Figura 5-55, para o tempo de 6 h, verifica-se que os valores de deslocamento nas direções x e y são muito parecidos. Aproximadamente na distância 700 m, os valores de deslocamento nas direções x e y obtidos pelo elemento enriquecido são 1,596 e 1,598 mm respectivamente. Ao ter componentes de deslocamento com valores semelhantes,

o ângulo da resultante de deslocamento com o eixo x passa a ter um ângulo próximo de 45° , valor que é praticamente idêntico à inclinação da falha.

Prosseguindo a análise para o mesmo intervalo citado ao longo do tempo, o deslocamento na direção x torna-se maior do que o deslocamento na direção y. Para o tempo de 50 dias e a mesma distância de 700 m, os valores de deslocamento nas direções x e y são 7,333 cm e 1,929 cm respectivamente o que justifica o paralelismo do vetor deslocamento em relação ao eixo x. Para distâncias abaixo de 625 m e acima de 875 m ao longo da falha, para qualquer tempo, a componente de deslocamento na direção y é menor do que na direção x como pode ser observado na Figura 5-55, comportamento que é confirmado pelos mapas de vetor de deslocamento.

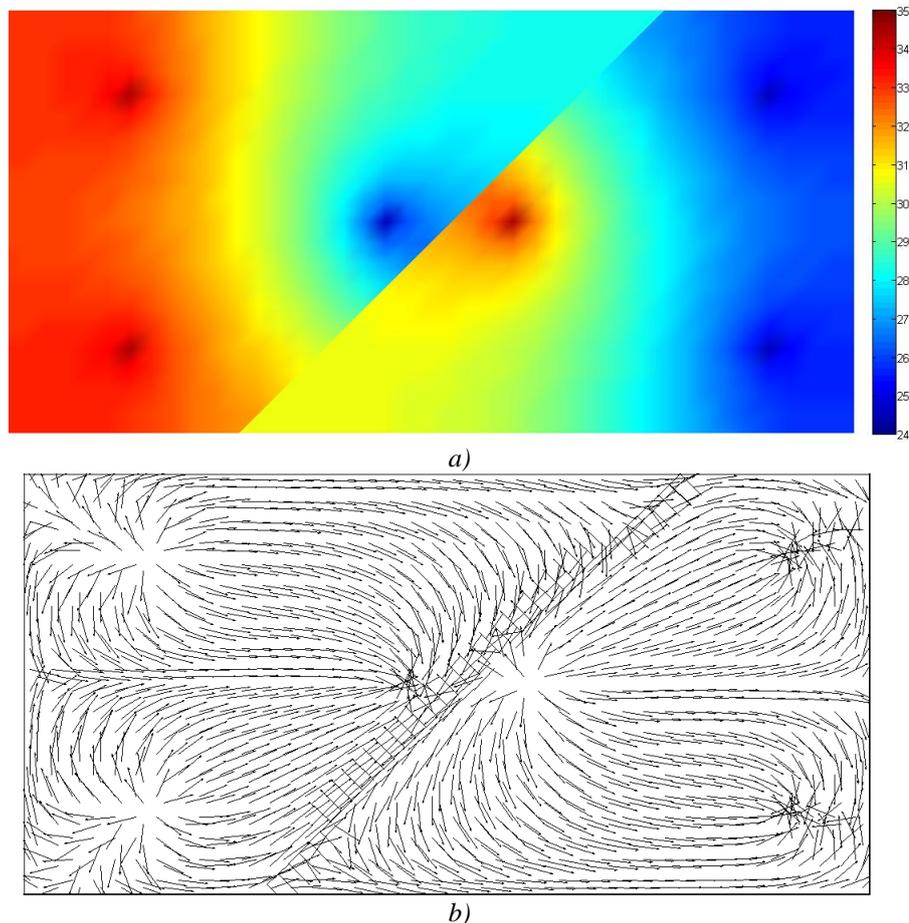


Figura 5-57: Mapas de poro-pressão e vetor de fluxo unitário obtido pelo elemento enriquecido com 3 nós para o tempo de 50 dias

A mudança na orientação dos vetores de deslocamento, ilustrada na Figura 5-56, permite fazer uma observação interessante. Se associarmos a direção do

vetor deslocamento às forças de superfície normal e tangencial atuantes na falha, pode-se dizer que há uma mudança na trajetória de tensões. Examinando o intervalo compreendido entre as distâncias 625 e 875 m ao longo da falha, o vetor deslocamento paralelo à falha induz a uma interpretação de que a força de superfície tangencial seja maior do que a normal para os tempos de 6 h e 1 dia. À medida que o tempo passa, o esforço normal aumenta seguindo a orientação do vetor deslocamento.

Outro ponto interessante a ser notado a partir desta associação é que o posicionamento dos poços em relação à falha pode influenciar significativamente a trajetória de tensões. A mudança na trajetória de tensões ocorre ao redor dos poços P1 e I3, mas longe deles a trajetória é praticamente constante visto que a direção do vetor deslocamento não é alterada. Isso indica que a falha pode ter diferentes comportamentos ao longo do seu comprimento.

A Figura 5-57 mostra os mapas de poro-pressão e de vetor de fluxo obtidos pelo elemento enriquecido para o tempo de 50 dias. O contraste de poro-pressão existente entre os poços P1 e I3, ilustrado na Figura 5-57(a), indica que o elemento enriquecido é capaz de reproduzir o aspecto selante da falha.

De modo idêntico ao exemplo de fluxo em falha selante da seção 5.4.1.1, os vetores de fluxo ao redor dos poços produtores tendem a convergir, enquanto os vetores de fluxo na vizinhança dos poços injetores tendem a divergir como ilustrado na Figura 5-57(b).

O mapa de vetores permite verificar que a falha criou duas regiões distintas de fluxo no reservatório. Os vetores de fluxo imediatamente à esquerda e à direita da falha são paralelos a ela, os vetores não tendem a se orientar do poço injetor I3 para o poço produtor P1 o que seria natural caso não houvesse uma barreira. O comportamento descrito pelos vetores de fluxo é mais um indício de que o elemento enriquecido pode reproduzir satisfatoriamente o fluxo de fluido.