

4 Exemplos

Este capítulo apresenta exemplos utilizados na validação das implementações computacionais realizadas neste trabalho, incluindo um teste comparativo entre os métodos de Picard e BFGS. São apresentados também nove exemplos para demonstrar o sistema desenvolvido. Um dos exemplos avalia a capacidade do programa FracGen3D e os outros apresentam resultados de análises numéricas de fluxo e transporte (soluto e partículas), realizadas em condições saturadas e não saturadas, e em meios porosos, fraturados e porosos fraturados. Os resultados de carga de pressão, carga total, concentração e campo de velocidade são visualizados usando o pós-processador Pos3D (Pos3D, 2005), enquanto que as trajetórias de partículas são ilustradas a partir da utilização de um módulo desenvolvido no Matlab (2005).

4.1. Validação da análise de fluxo e transporte de soluto no meio fraturado

A validação das análises de fluxo e transporte de soluto implementadas neste trabalho foi feita através da comparação de resultados (carga de pressão e concentração) obtidos com o programa SWMS2D (Simunek *et al.*, 1992). Apesar de trabalharem com dimensões de números diferentes, é possível reproduzir resultados do SWMS2D na análise tridimensional quando as fraturas analisadas têm posição horizontal ou vertical.

Nesta seção são apresentados três testes, correspondentes a três posições diferentes para uma mesma fratura (uma fratura que apresenta as mesmas características de malha, condições de contorno e parâmetros de fluxo e transporte de soluto). A Figura 4.1 apresenta as configurações utilizadas nos testes.

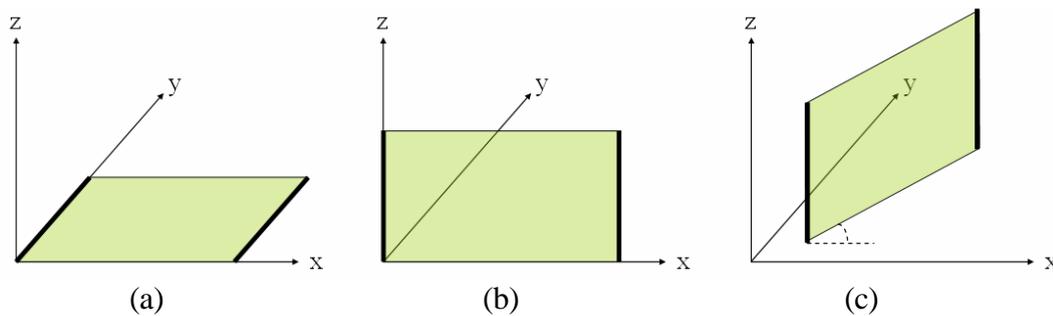


Figura 4.1: Posições espaciais da fratura.

Deve-se notar que a posição da fratura indicada pela Figura 4.1c não pode ser representada pelo programa SWMS2D. Isto ocorre porque a sua posição espacial é tridimensional. No entanto, como esta fratura foi somente rotacionada em relação ao eixo z , ou seja, não houve variação nas coordenadas z dos nós, e como os resultados considerados são escalares, é possível comparar os resultados obtidos nesta posição com aqueles obtidos na fratura ilustrada na Figura 4.1b.

Os três testes foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa, é realizada a análise de fluxo não saturado, em regime transiente. Essa etapa foi realizada com objetivo de validar os resultados de carga de pressão. Na segunda etapa é realizada a análise de fluxo e transporte de soluto, em regime transiente, considerando uma fonte de contaminação, cuja localização pode ser vista na Figura 4.2. Essa etapa foi realizada com objetivo de validar os resultados de concentração de soluto.

As dimensões do modelo são de 8.0x4.0m e a malha de elementos finitos, gerada pelo modelador MG, possui 41 nós e 56 elementos. A Figura 4.2 apresenta a malha de elementos finitos do modelo. Essa figura apresenta ainda a posição do nó A (localizado a 3.0 m da fonte), onde todos os resultados são comparados.

Algumas informações adicionais adotadas nestas duas etapas são apresentadas abaixo:

- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 20.0 m na face representada por x_{min} , e
 - carga total prescrita de 12.0 m na face representada por x_{max} ;
- Condutividade hidráulica: 0.002 m/dia;
- Armazenamento específico: 0.0001 m^{-1} ;
- Método iterativo (não linear): Picard;

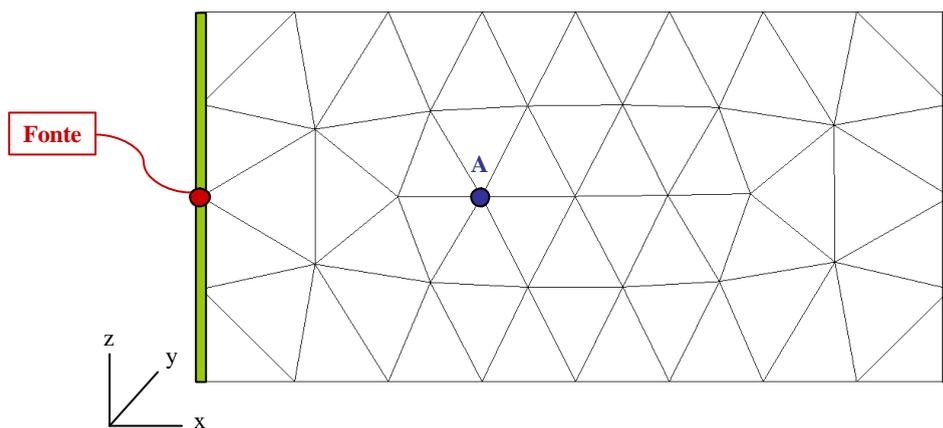


Figura 4.2: Malha de elementos finitos, posição da fonte de contaminação e posição do nó A onde os resultados serão comparados.

Primeira etapa

Nesta etapa, como dito anteriormente, é realizada a análise de fluxo não saturado, em regime transiente. A condição inicial de fluxo em todo modelo é de -5.0 m (carga de pressão) e o tempo de término da simulação corresponde ao tempo em que o fluxo atinge o regime permanente.

Nesta etapa, dois testes são considerados. O primeiro teste está relacionado a comparação dos resultados de carga de pressão da fratura na posição ilustrada pela Figura 4.1a. São realizadas nesse teste duas análises. Uma análise utiliza o programa SWMS2D e é denominada de A_swms2d. A outra usa o programa FTPF-3D e é denominada de A_ftpf3d.

No segundo teste também são comparados os resultados de carga de pressão, mas agora, considerando a fratura nas posições ilustradas na Figura 4.1b e na Figura 4.1c. Para esse teste são realizadas três análises. A primeira análise utiliza o programa SWMS2D e é denominada de B_swms2d, enquanto que a segunda análise usa o programa FTPF-3D e é denominada de B_ftpf3d. A terceira análise também utiliza o programa FTPF-3D, mas considera a fratura na posição ilustrada pela Figura 4.1c. Esta análise é denominada de C_ftpf3d.

As comparações dos resultados do primeiro e do segundo testes são apresentadas na Figura 4.3 e na Figura 4.4, respectivamente.

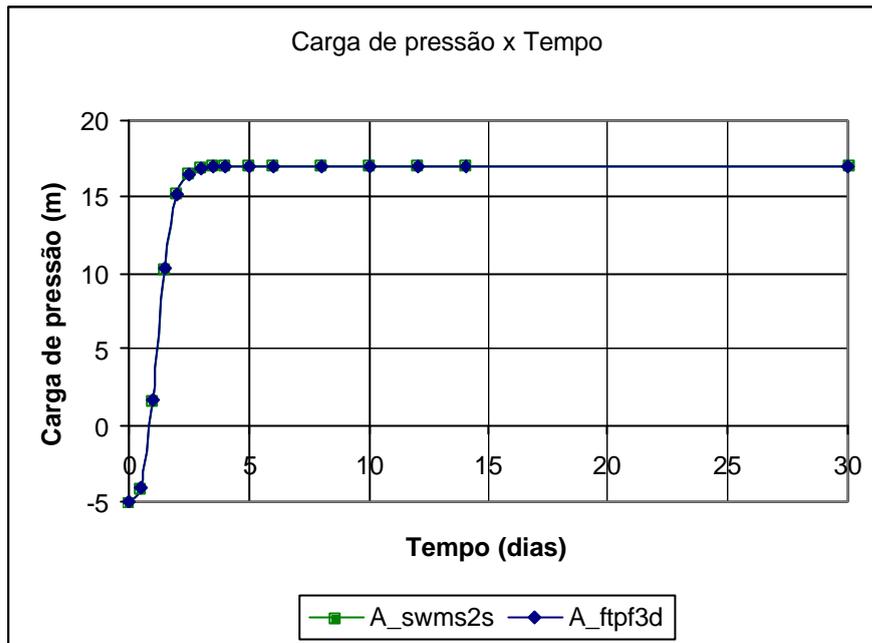


Figura 4.3: Comparação dos resultados de carga de pressão da fratura na posição ilustrada pela Figura 4.1a.

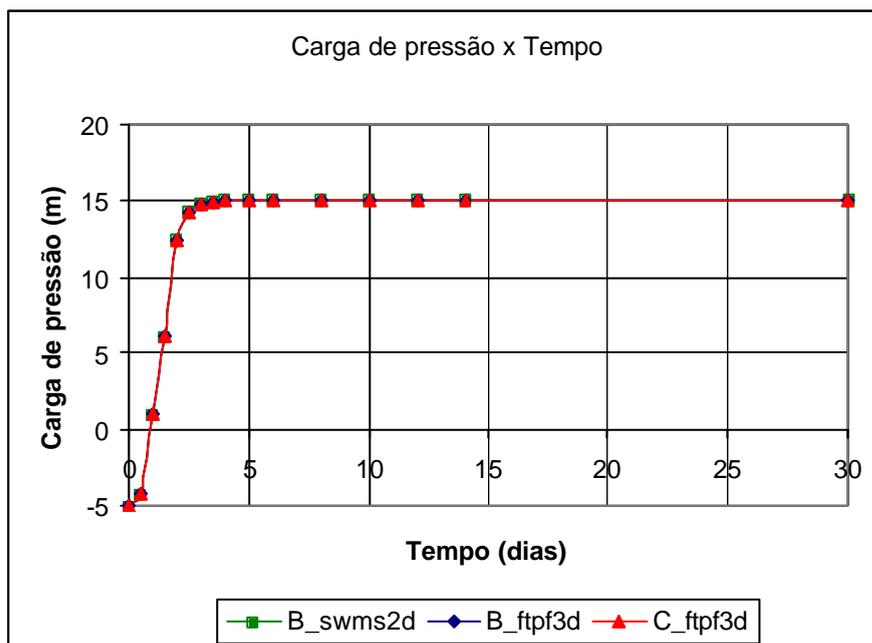


Figura 4.4: Comparação dos resultados de carga de pressão da fratura nas posições ilustradas pela Figura 4.1b e Figura 4.1c.

Analisando a Figura 4.3 e a Figura 4.4, conclui-se que os resultados obtidos foram idênticos em ambos os testes. Além disso, observa-se que a fratura localizada na posição ilustrada pela Figura 4.1c apresenta resultados iguais aos da fratura na posição mostrada na Figura 4.1b. Esses resultados validam as

implementações computacionais da equação de fluxo não saturado do meio fraturado. Pode-se observar na Figura 4.3 e na Figura 4.4 também, que o regime permanente de fluxo é alcançado no tempo de 5 dias, aproximadamente.

Segunda etapa

Nesta etapa realizam-se as análises de fluxo e transporte de soluto em regime transiente. Aqui, as condições iniciais de fluxo são os resultados obtidos na análise realizada na primeira etapa (resultados considerando o regime permanente). O valor da concentração da fonte é de 1000 mg/l, os valores de dispersividade longitudinal e transversal são de 10 m, o coeficiente de difusão é zero, e o tempo total de simulação é de 60 dias.

Nesta etapa é realizado o terceiro teste, onde são comparados os resultados de concentração de soluto. Para isto, cinco análises são realizadas. Duas consideram a fratura na posição ilustrada pela Figura 4.1a e utilizam os programas SWMS2D e FTPF-3D. Essas análises são denominadas de A_swms2d e A_ftpf3d, respectivamente. Outras duas análises consideram a fratura na posição mostrada na Figura 4.1b e também utilizam os programas SWMS2D e FTPF-3D. Essas análises são denominadas de B_swms2d e B_ftpf3d, respectivamente. A quinta análise considera a fratura na posição ilustrada na Figura 4.1c, utiliza o programa computacional FTPF-3D e é denominada de C_ftpf3d.

A comparação dos resultados do terceiro teste é apresentada na Figura 4.5. Como pode-se observar na figura, os resultados em todas as análises realizadas nesta etapa são idênticos, validando as implementações computacionais da equação de transporte de soluto do meio fraturado apresentadas no trabalho.

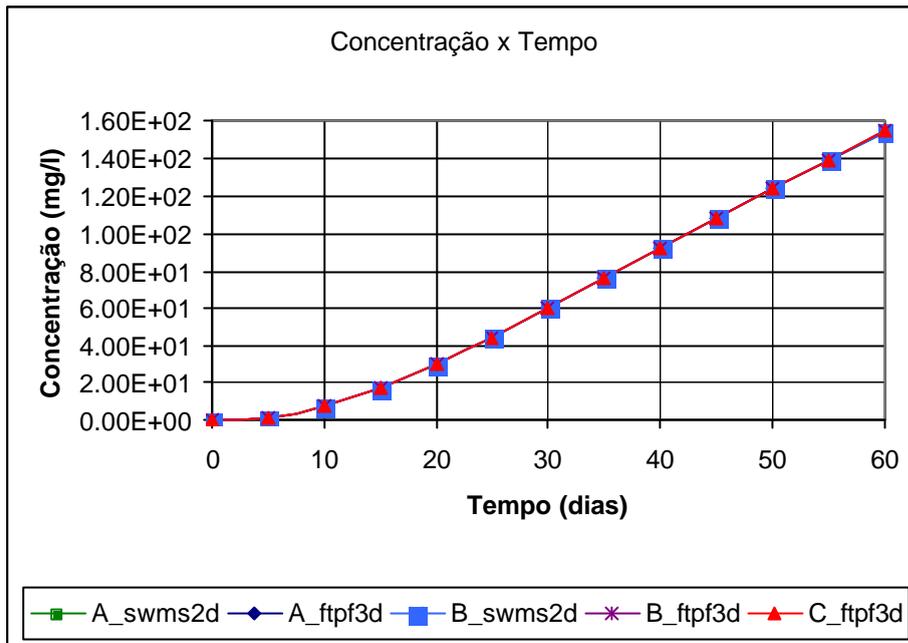


Figura 4.5: Comparação dos resultados de concentração de soluto da fratura nas posições ilustradas pela Figura 4.1a, Figura 4.1b e Figura 4.1c.

4.2.

Comparação entre os métodos de Picard e BFGS

Nesta seção são apresentados dois testes realizados com objetivo de comparar os resultados de carga de pressão obtidos pelos métodos iterativos não lineares de Picard e BFGS.

Primeiro teste

O primeiro teste considera um plano horizontal de dimensões de 100.0x50.0m. A malha de elementos finitos, gerada pelo modelador MG, possui 121 nós e 200 elementos. A Figura 4.6 apresenta a malha de elementos finitos do modelo. Essa figura mostra ainda a posição do nó A (localizado a 30.0 m da face representada por x_{min} e a 25.0 m da face representada por y_{min}), onde todos os resultados são comparados.

Algumas informações adicionais são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo: carga de pressão de -5.0 m em todo modelo;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 1200.0 m na face representada por x_{min} , e
 - carga total prescrita de 1000.0 m na face representada por x_{max} ;

- Condutividade hidráulica: 0.0002 m/dia;
- Armazenamento específico: 0.0001 m⁻¹;
- Tolerância utilizada no teste de convergência: 10⁻⁶;
- Tempo total de simulação: 200.0 dias;
- Análise realizada em regime transiente.

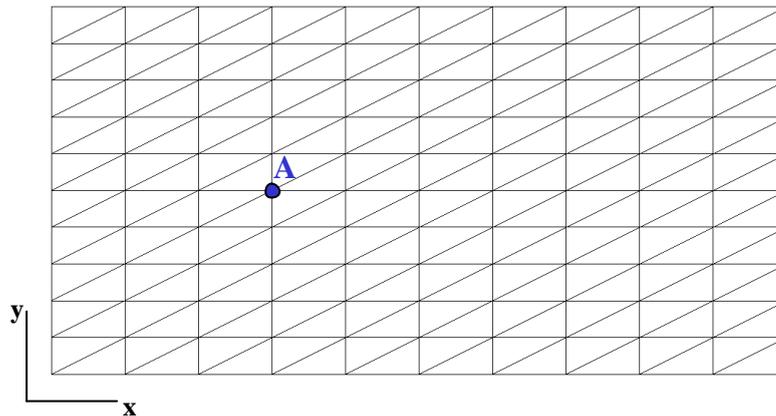


Figura 4.6: Primeiro teste – Malha de elementos finitos e posição do nó A onde os resultados são comparados.

A comparação dos resultados de carga de pressão, obtidos pelos métodos de Picard e BFGS são apresentados na Figura 4.7.

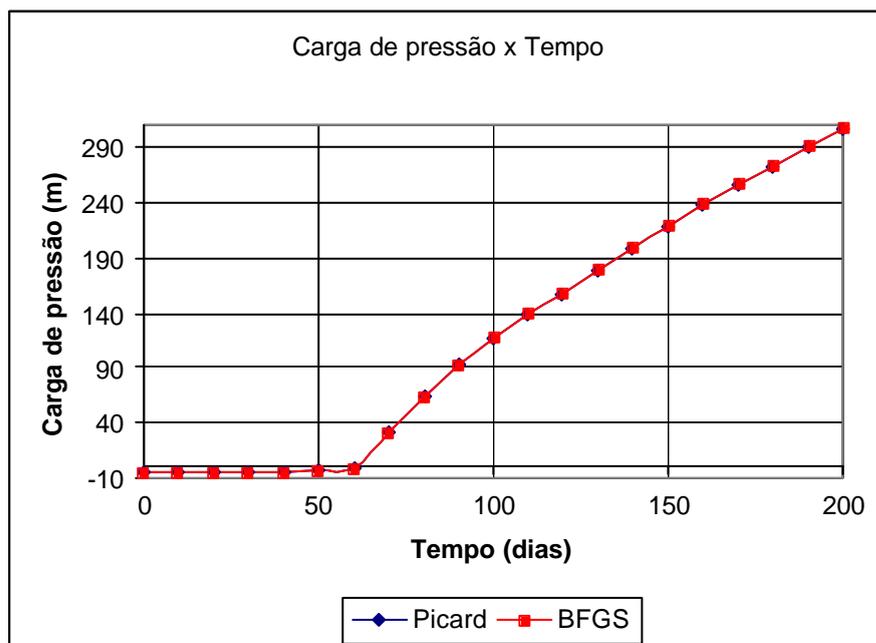


Figura 4.7: Primeiro teste – Comparação dos resultados de carga de pressão utilizando os métodos de Picard e BFGS.

Pode-se observar na figura acima que os resultados obtidos pelos dois métodos são idênticos e o regime permanente de fluxo não é alcançado para o tempo total de simulação de 200.0 dias.

Segundo teste

O segundo teste apresenta um modelo tridimensional com número de nós e de elementos maior que o modelo apresentado no primeiro teste. Aqui, é considerado um paralelepípedo de dimensões de 40.0x20.0x10.0m. A malha de elementos finitos, gerada pelo modelador MG, possui 487 nós e 1972 elementos. A Figura 4.8 apresenta a malha de elementos finitos do modelo. Essa figura mostra ainda a posição do nó A (localizado a 18.07 m da face representada por x_{min} e a 7.5 m da face representada por y_{min}), onde todos os resultados são comparados.

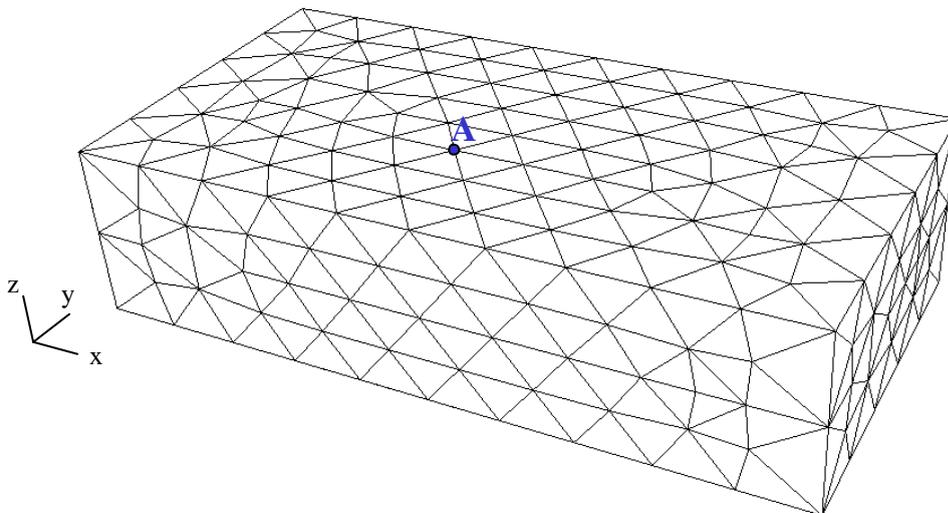


Figura 4.8: Segundo teste – Malha de elementos finitos e posição do nó A onde os resultados são comparados

Algumas informações adicionais são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo: carga de pressão de -5.0 m em todo modelo;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 1000.0 m na face representada por x_{min} , e
 - carga total prescrita de 920.0 m na face representada por x_{max} ;
- Condutividade hidráulica: 0.0002 m/dia;

- Armazenamento específico: 0.0001 m^{-1} ;
- Tolerância utilizada no teste de convergência: 10^{-6} ;
- Tempo total de simulação: 200.0 dias;
- Análise realizada em regime transiente.

A comparação dos resultados de carga de pressão, obtidos pelos métodos de Picard e BFGS são apresentados na Figura 4.9.

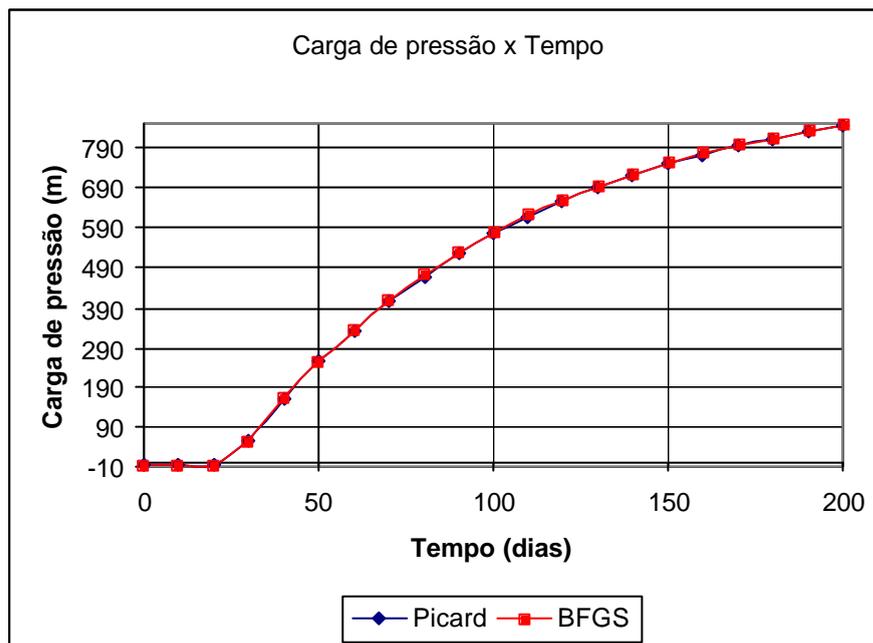


Figura 4.9: Segundo teste – Comparação dos resultados de carga de pressão utilizando os métodos de Picard e BFGS.

Da Figura 4.9, pode-se observar que os resultados obtidos são muito parecidos e que o regime permanente de fluxo não é alcançado para o tempo total de simulação. Deve-se ressaltar, entretanto, que com apenas dois testes comparativos, não é possível avaliar de uma forma mais ampla os métodos aqui discutidos. Novos testes devem ser realizados variando as condições de contorno, condições iniciais, tamanho da malha e os parâmetros de fluxo.

4.3.

Exemplo 1 – Teste de capacitação do gerador de fraturas FracGen3D

O objetivo principal deste exemplo é testar a capacidade do FracGen3D no que diz respeito ao número de fraturas geradas. No exemplo, são geradas 60 famílias de fraturas, em uma região cujas dimensões são 500.0x500.0x500.0m. As fraturas de cada família são obtidas aleatoriamente, com as seguintes características: densidade de 0.1 m^{-1} (número de fraturas por comprimento linear); número de lados igual a 8; tamanho da fratura variando de 30.0 m a 50.0 m, seguindo uma distribuição uniforme; orientação com valores de direção de mergulho e mergulho variados; e abertura variando de 0.5 mm a 1.0 mm, seguindo uma distribuição uniforme. No total foram geradas 2738 fraturas, como podem ser vistas na Figura 4.10.

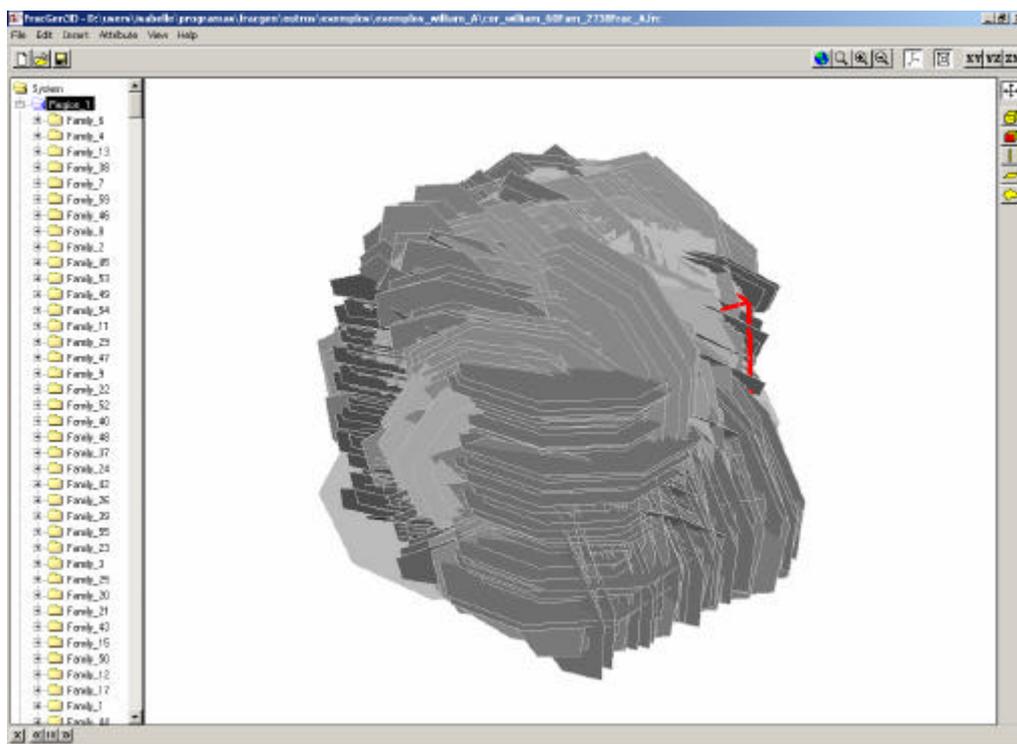


Figura 4.10: Distribuição espacial com 2738 fraturas geradas aleatoriamente.

Este exemplo permite concluir que o gerador de fraturas FracGen3D não apresenta limitações em relação ao número de fraturas obtidas, ficando limitado apenas a capacidade de memória do computador utilizado.

4.4.

Exemplo 2 – Análise de fluxo em meio fraturado

O exemplo 2 apresenta os resultados da análise numérica de fluxo em uma região fraturada, não saturada. A Figura 4.11 apresenta as superfícies de topo e base da região modelada cujas dimensões são 350.0x500.0x76.0m, aproximadamente. Essas superfícies foram geradas no Gocad e importadas pelo programa FracGen3D.

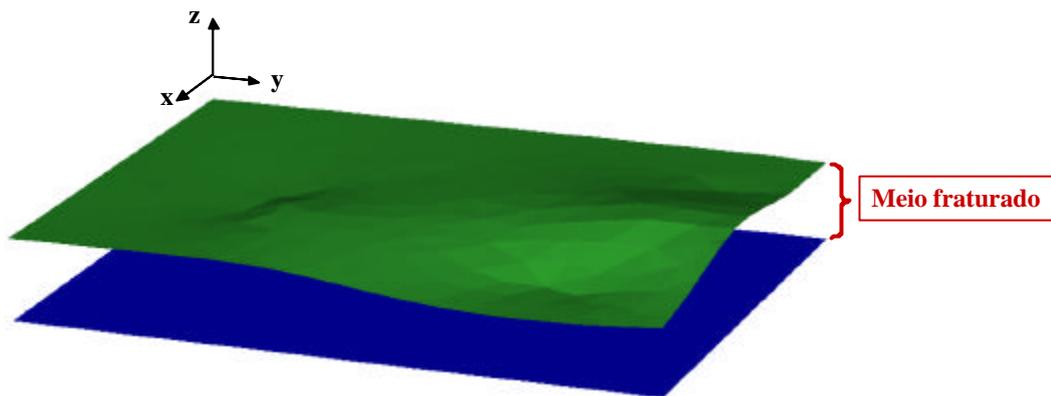


Figura 4.11: Exemplo 2 – superfícies de topo e base da região modelada.

Na região considerada são geradas quatro famílias de fraturas cujas características e parâmetros de fluxo estão apresentados abaixo:

Família 1

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 2;
- Número de fraturas: 8;
- Tamanho das fraturas: 200.0 – 250.0 m (distribuição uniforme);
- Orientação: direção de mergulho 90° e mergulho 45° (constante);
- Abertura: 0.1 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 7.0×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Família 2

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 2;
- Número de fraturas: 7;
- Tamanho das fraturas: 200.0 – 250.0 m (distribuição uniforme);

- Orientação: direção de mergulho 120° e mergulho 60° (constante);
- Abertura: 0.05 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 1.7×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Família 3

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 2;
- Número de fraturas: 6;
- Tamanho das fraturas: 200.0 – 250.0 m (distribuição uniforme);
- Orientação: direção de mergulho 200° e mergulho 30° (constante);
- Abertura: 0.15 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 1.6×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Família 4

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 2;
- Número de fraturas: 7;
- Tamanho das fraturas: 200.0 – 250.0 m (distribuição uniforme);
- Orientação: direção de mergulho 350° e mergulho 80° (constante);
- Abertura: 0.08 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 4.5×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Algumas informações adicionais são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo: carga de pressão de -2.0 m em todo modelo;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 140.0 m na face representada por x_{min} , e
 - carga total prescrita de 110.0 m na face representada por x_{max} ;
- Tempo total de simulação: 200.0 segundos;
- Método iterativo (não linear): BFGS;
- Análise realizada em regime transiente.

A malha de elementos finitos gerada pelo modelador MG apresenta 7347 nós e 15251 elementos. Essa malha é ilustrada na Figura 4.12.

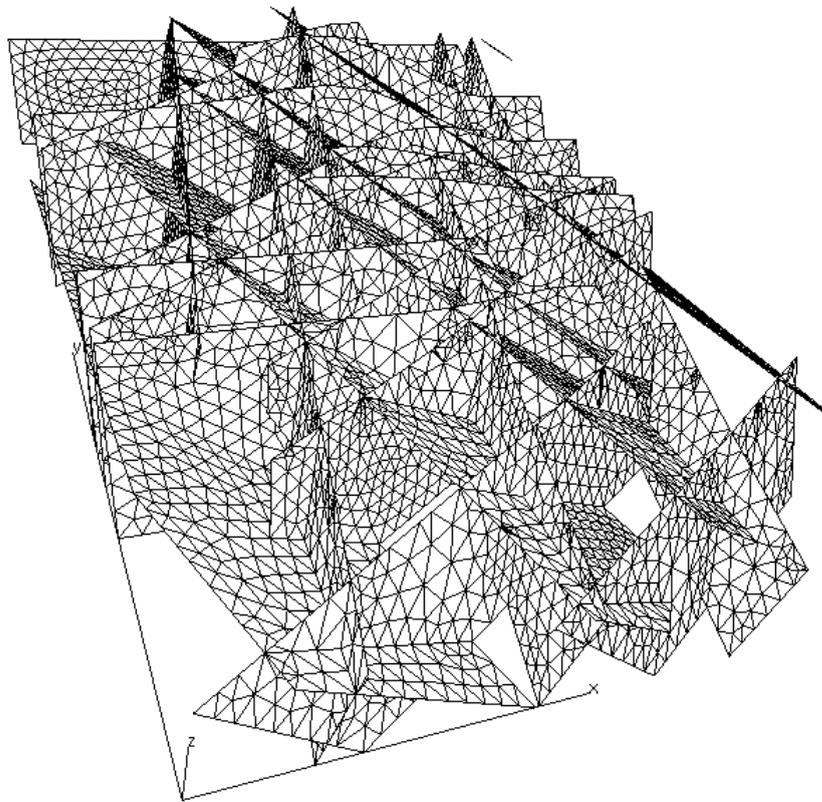


Figura 4.12: Exemplo 2 – malha de elementos finitos.

A Figura 4.13 e Figura 4.14 apresentam os resultados de carga de pressão e carga total no tempo de 200.0 segundos. O fluxo ocorre da esquerda para direita.

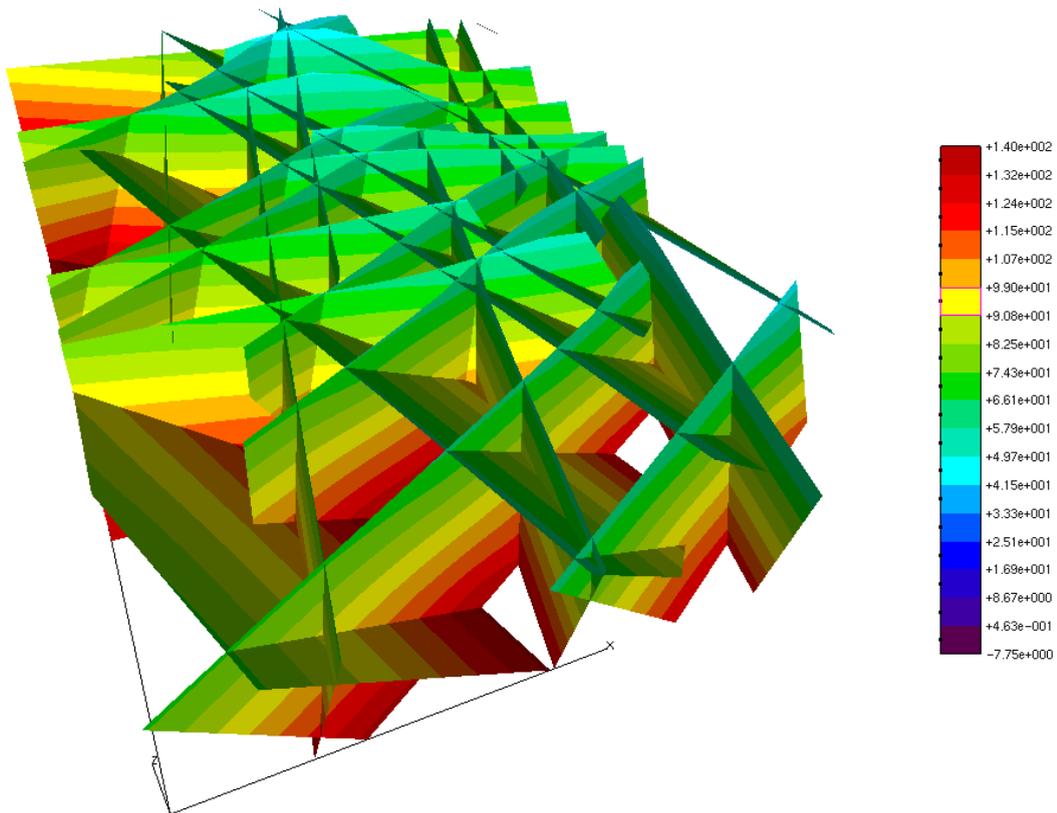


Figura 4.13: Exemplo 2 – resultados de carga de pressão no tempo de 200.0 seg.

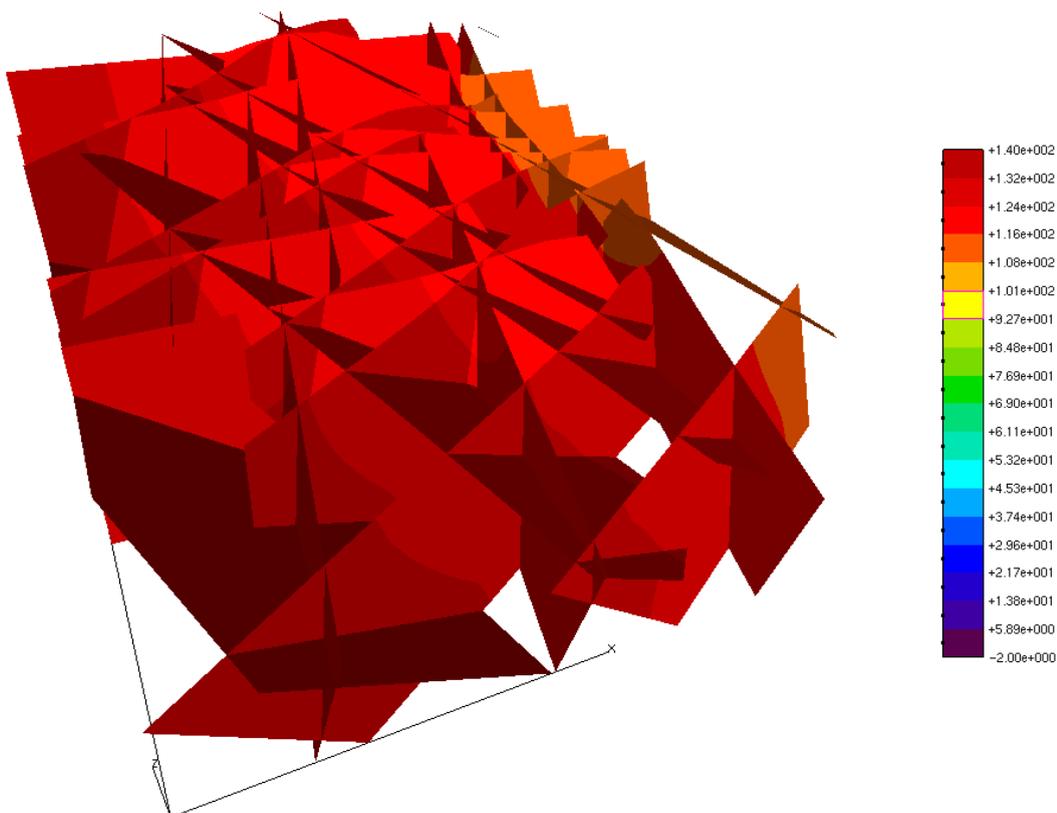


Figura 4.14: Exemplo 2 – resultados de carga total no tempo de 200.0 seg.

Um detalhe importante que deve ser observado está relacionado ao método iterativo não linear utilizado. Neste exemplo, não é possível alcançar a convergência utilizando o método de Picard. Desta forma, é utilizado o método BFGS.

4.5.

Exemplo 3 – Análise de fluxo em meio poroso e meio fraturado

O exemplo 3 apresenta os resultados da análise numérica de fluxo em um modelo composto de duas regiões, sendo uma representativa do meio poroso (região 1) e outra representativa do meio fraturado (região 2). A região 1 é definida pelas superfícies superior e intermediária, e a região 2 é definida pelas superfícies intermediária e inferior, como apresentado na Figura 4.15. Essas superfícies foram geradas no Gocad e importadas pelo FracGen3D. O modelo apresenta dimensões aproximadas de 100.0x50.0x50.0m.

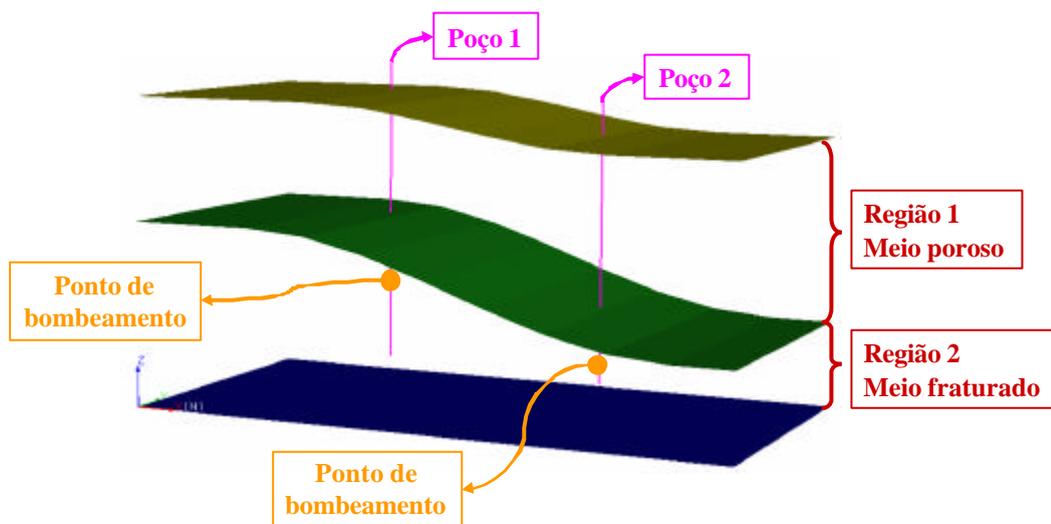


Figura 4.15: Exemplo 3 – superfícies que delimitam as regiões representativas dos meios poroso e fraturado, posição do poço de bombeamento.

O exemplo é dividido em duas etapas. Na primeira é realizada uma análise de fluxo em regime permanente. Na segunda etapa é feita a análise de fluxo em regime transiente, considerando dois poços de bombeamento localizados na região 2 (meio fraturado), como apresentado na Figura 4.15.

Na região 2 são geradas três famílias de fraturas, cujas características e parâmetros de fluxo estão apresentados abaixo:

Família 1

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 2;
- Número de fraturas: 6;
- Tamanho das fraturas: 20.0 - 25.0 m (distribuição uniforme);
- Orientação: direção de mergulho 90° e mergulho 45° (constante);
- Abertura: 0.04 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 1.1×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Família 2

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 2;
- Número de fraturas: 4;
- Tamanho das fraturas: 20.0 - 25.0 m (distribuição uniforme);
- Orientação: direção de mergulho 220° e mergulho 30° (constante);
- Abertura: 0.03 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 0.6×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Família 3

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 2;
- Número de fraturas: 6;
- Tamanho das fraturas: 20.0 - 25.0 m (distribuição uniforme);
- Orientação: direção de mergulho 350° e mergulho 60° (constante);
- Abertura: 0.05 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 1.7×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

A Figura 4.16 apresenta as famílias de fraturas geradas na região 2.

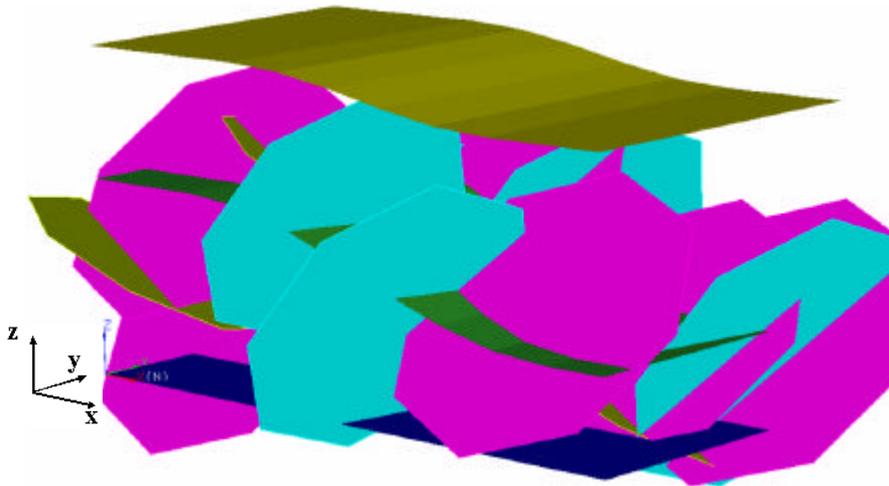


Figura 4.16: Exemplo 3 – famílias de fraturas da região 2.

Na região 1 (meio poroso) é considerada uma condutividade hidráulica de 8.64 m/dia (representativa de uma areia) e um armazenamento específico de 0.0003 m^{-1} .

A malha de elementos finitos gerada pelo modelador MG possui 5694 nós e 24643 elementos, sendo 2227 elementos triangulares e 22416 elementos tetraédricos. A Figura 4.17 apresenta a malha de elementos finitos do modelo.

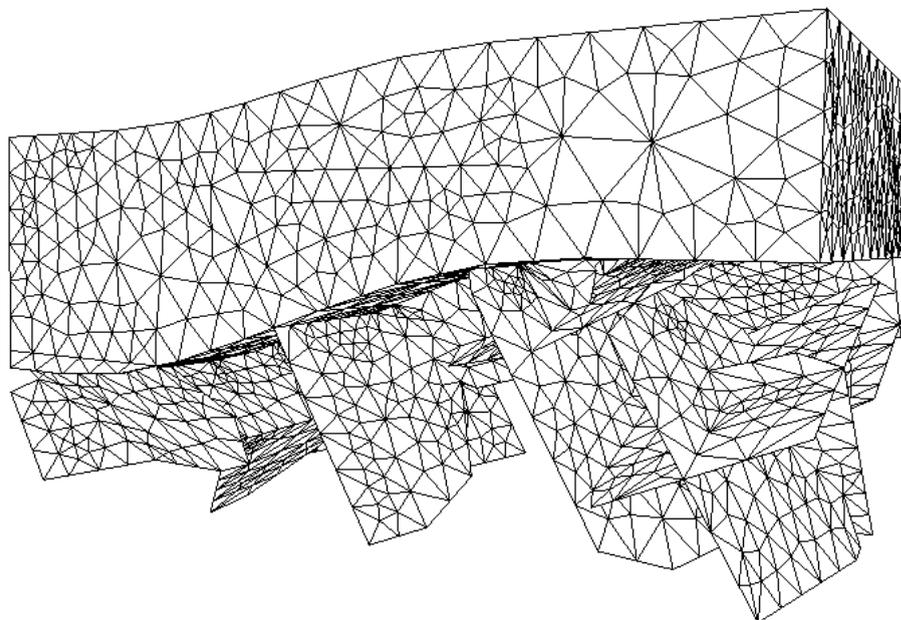


Figura 4.17: Exemplo 3 – malha de elementos finitos.

Primeira etapa

Na primeira etapa como dito anteriormente, é realizada a análise de fluxo em regime permanente. Algumas informações adicionais desta etapa são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo na região 1: carga de pressão de -10.0 m;
- Condição inicial de fluxo na região 2: carga de pressão de -3.0 m;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 80.0 m na face representada por x_{min} , e
 - carga total prescrita de 60.0 m na face representada por x_{max} ;
- Método iterativo (não linear): Picard;
- Análise realizada em regime permanente.

A Figura 4.18 apresenta o resultado de carga total. Na figura, o fluxo ocorre da direita para esquerda.

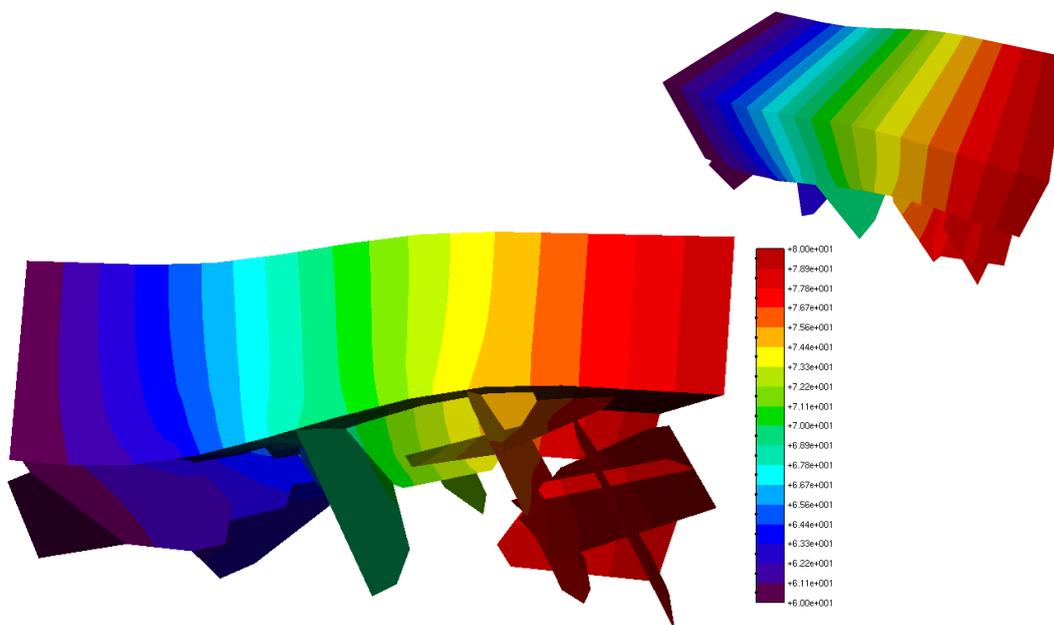


Figura 4.18: Exemplo 3 – Primeira etapa: resultados de carga total.

Segunda etapa

Na segunda etapa é realizada a análise de fluxo, em regime transiente, considerando dois poços de bombeamento localizados no meio fraturado. Algumas informações adicionais desta etapa são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo nas regiões 1 e 2: valores de carga de pressão obtidos na análise realizada na primeira etapa;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 80.0 m na face representada por x_{min} ,
 - carga total prescrita de 60.0 m na face representada por x_{max} ,
 - vazão prescrita de $-5.0 \text{ m}^3/\text{min}$, no Poço 1; e
 - vazão prescrita de $-1.0 \text{ m}^3/\text{min}$, no Poço 2;
- Tempo total de simulação: 60.0 min;
- Método iterativo (não linear): Picard;
- Análise realizada em regime transiente.

A Figura 4.19 e a Figura 4.20 apresentam os resultados de carga de pressão e carga total no tempo de 60.0 min. O fluxo preferencial ocorre da direita para esquerda.

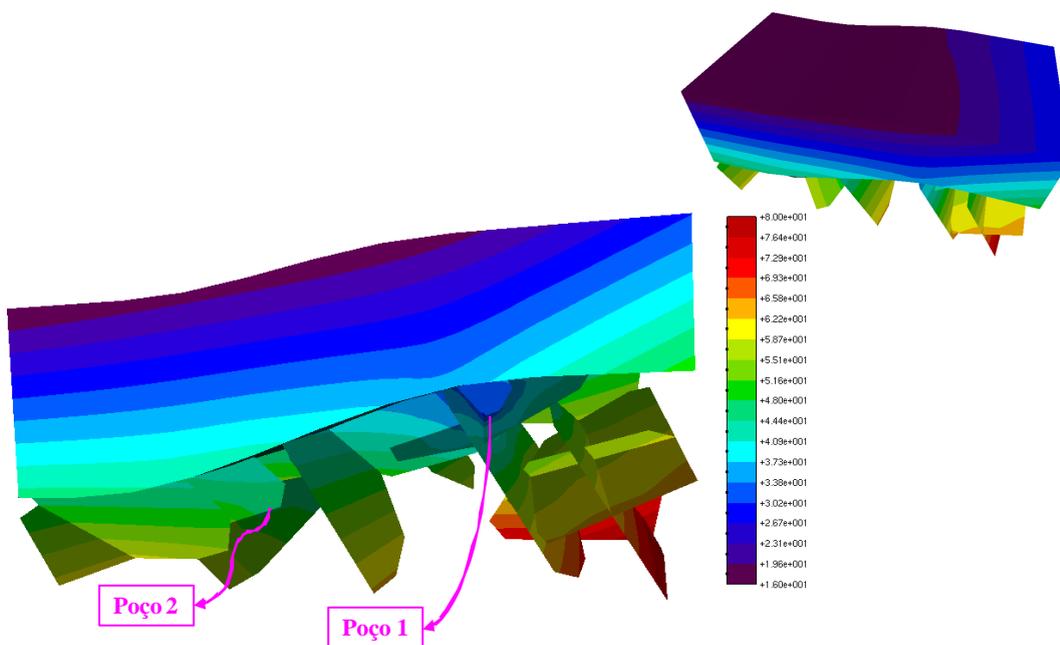


Figura 4.19: Exemplo 3 – Segunda etapa: resultados de carga de pressão no tempo de 60.0 min.

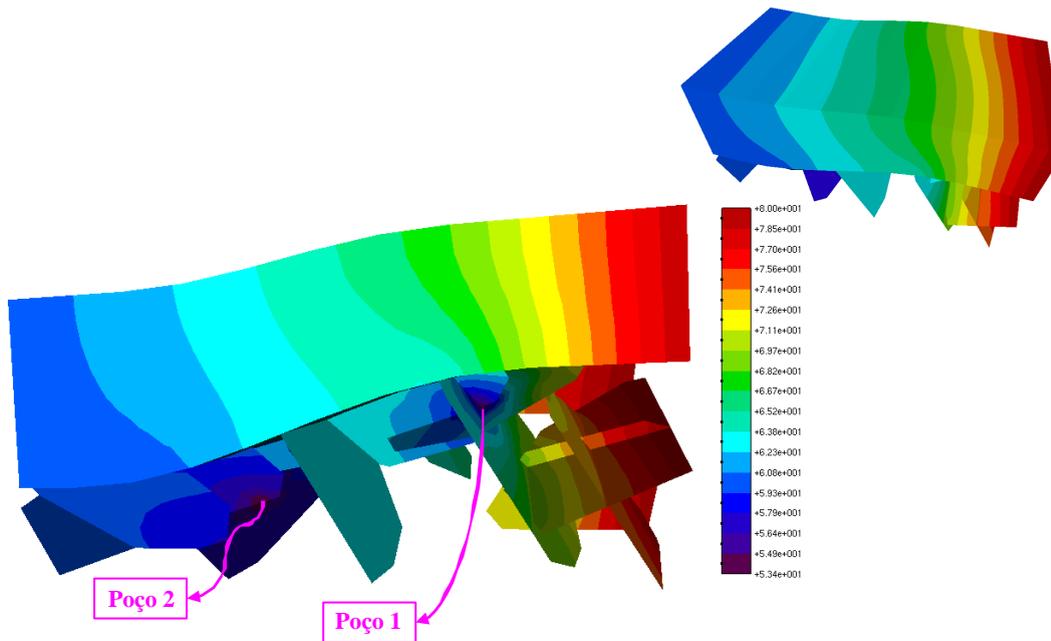


Figura 4.20: Exemplo 3 – Segunda etapa: resultados de carga total no tempo de 60.0 min.

É possível observar na Figura 4.19 a grande influência dos poços de bombeamento no regime de fluxo do modelo. Verifica-se uma grande alteração nas isofaixas de carga total da Figura 4.20, quando comparadas as da Figura 4.18.

4.6.

Exemplo 4 – Análise de fluxo em meio poroso e meio poroso fraturado

O exemplo 4 apresenta os resultados da análise numérica de fluxo de um modelo composto de duas regiões não saturadas. A região 1, representativa do meio poroso, é definida pelas superfícies superior e intermediária. A região 2, representativa do meio rochoso fraturado (poroso fraturado), é definida pelas superfícies intermediária e inferior, como apresentado na Figura 4.21. Essas superfícies foram geradas no Gocad e importadas pelo FracGen3D. O modelo apresenta dimensões de 100.0x50.0x50.0m, aproximadamente.

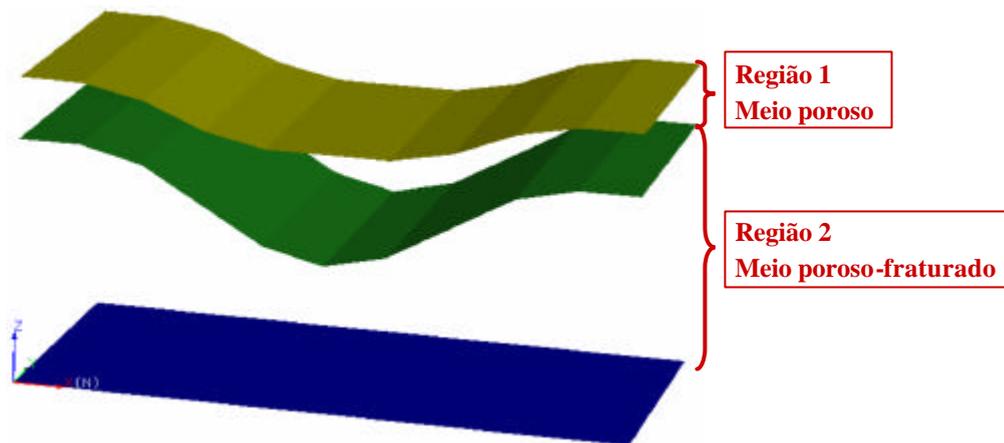


Figura 4.21: Exemplo 4 – superfícies que delimitam as regiões representativas do meio poroso e meio poroso fraturado.

Na região 2 são geradas duas fraturas determinísticas, cujas características e parâmetros de fluxo estão apresentados abaixo:

Fratura 1

- Tamanho: 50.0 m;
- Orientação: direção de mergulho 0° e mergulho 80°;
- Abertura: 10.0 mm;
- Condutividade hidráulica: 7.0×10^6 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Fratura 2

- Tamanho: 80.0 m;
- Orientação: direção de mergulho 180° e mergulho 20°;
- Abertura: 5.0 mm;
- Condutividade hidráulica: 1.7×10^6 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

A Figura 4.22 apresenta as fraturas geradas na região 2.

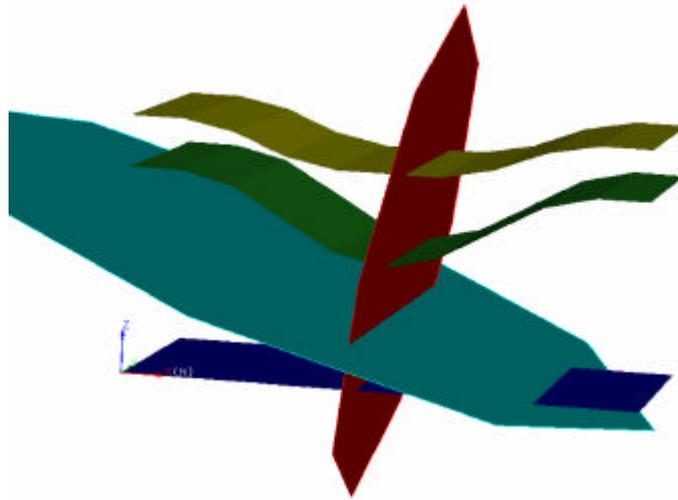


Figura 4.22: Exemplo 4 – fraturas geradas na região 2.

No meio poroso da região 2 (meio poroso fraturado) é considerada uma condutividade hidráulica de 10^{-4} m/dia (representativa de um arenito), e um armazenamento específico de 0.0003 m^{-1} . No meio poroso da região 1 considera-se uma condutividade hidráulica de 1.2 m/dia (representativa de uma areia siltosa), e um armazenamento específico de 0.0003 m^{-1} .

A malha de elementos finitos gerada pelo modelador MG possui 4850 nós e 24794 elementos, sendo 774 elementos triangulares e 24020 elementos tetraédricos. A Figura 4.23 apresenta a malha de elementos finitos do modelo.

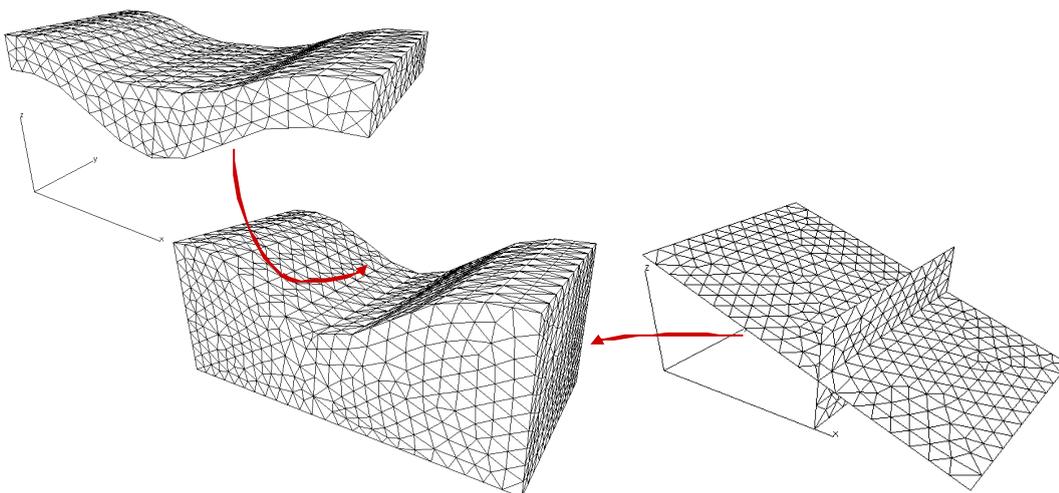


Figura 4.23: Exemplo 4 – malha de elementos finitos.

Algumas informações adicionais são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo nas regiões 1 e 2: carga de pressão de -10.0m;
- Condições de contorno de fluxo: carga de pressão prescrita de 0.0 m na superfície do meio poroso.
- Tempo total de simulação: 200.0 dias;
- Método iterativo (não linear): Picard;
- Análise realizada em regime transiente.

A Figura 4.24 e Figura 4.25 apresentam os resultados de carga de pressão e carga total no tempo de 40.0 dias. O fluxo ocorre de cima para baixo.

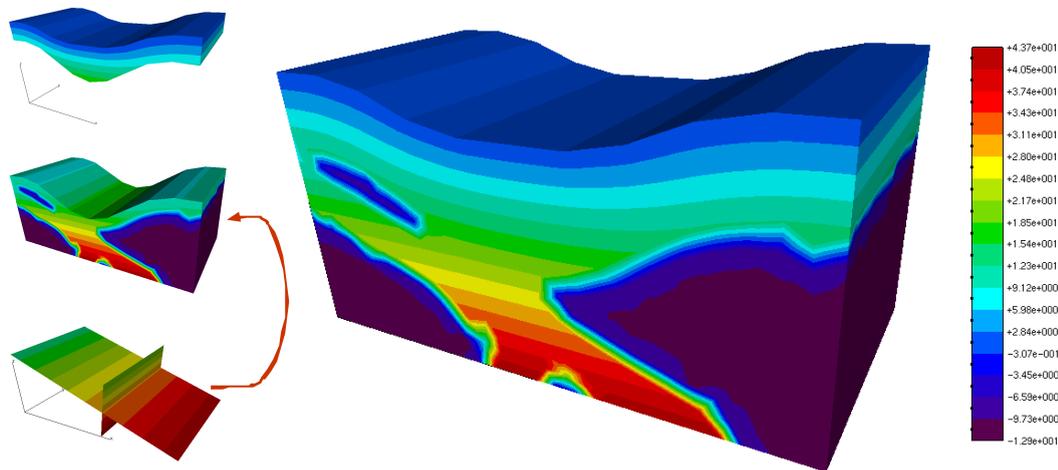


Figura 4.24: Exemplo 4 – resultados de carga de pressão no tempo de 40.0 dias.

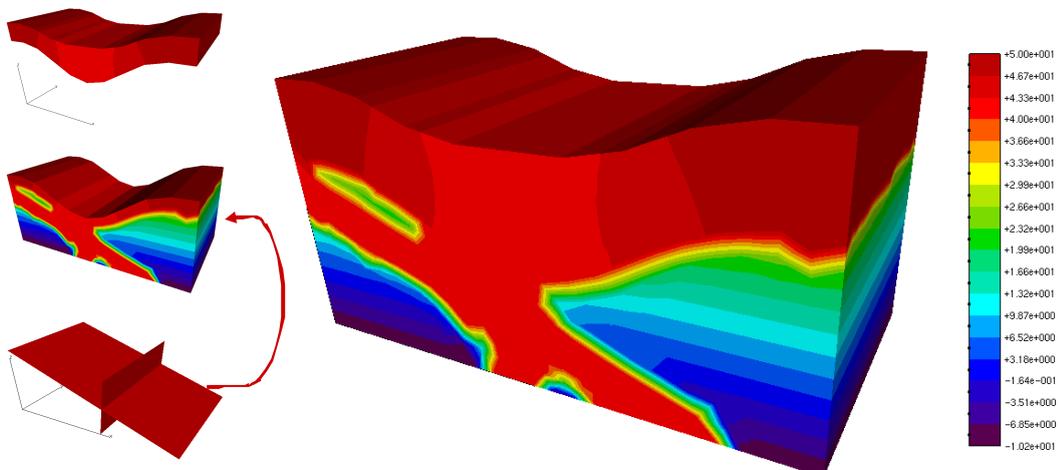


Figura 4.25: Exemplo 4 – resultados de carga total no tempo de 40.0 dias.

As três imagens apresentadas do lado esquerdo da Figura 4.24 e Figura 4.25 representam a região 1 (imagem superior), região 2 (imagem intermediária) e as duas fraturas inseridas da região 2 (imagem inferior).

Nas figuras acima, verifica-se claramente a influência das fraturas na saturação da região 2. Nessa região, são observados altos valores de carga de pressão nas zonas próximas às fraturas, como pode ser visto na Figura 4.24. Nessa figura, os valores em roxo representam zonas ainda não saturadas. Pode-se observar também que para o tempo de 40 dias, a região 1 já se encontra totalmente saturada.

A Figura 4.26 apresenta os resultados de carga total no regime permanente. O fluxo ocorre de cima para baixo.

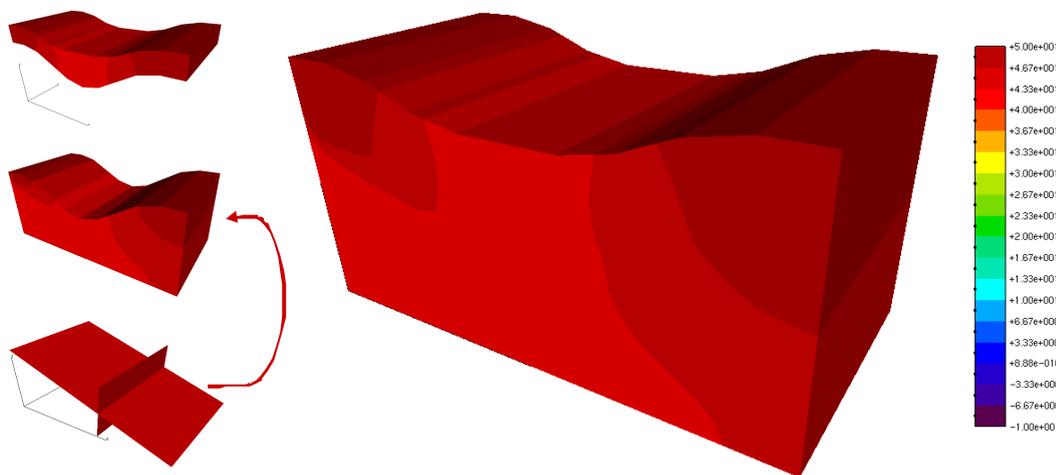


Figura 4.26: Exemplo 4 – resultados de carga total no regime permanente.

A Figura 4.27 apresenta resultados do campo de velocidade em uma seção específica do modelo. Esses resultados são obtidos no regime permanente. As linhas em vermelho indicam a localização da superfície de contato entre as duas regiões e a localização das fraturas.

Na Figura 4.27 pode-se perceber que em alguns zonas do modelo não são apresentadas as setas que representam o vetor de velocidade. Isso se dá devido ao baixo valor de velocidade.

Deve-se ressaltar ainda que neste exemplo o método BFGS não consegue alcançar a convergência, sendo utilizado o método de Picard.

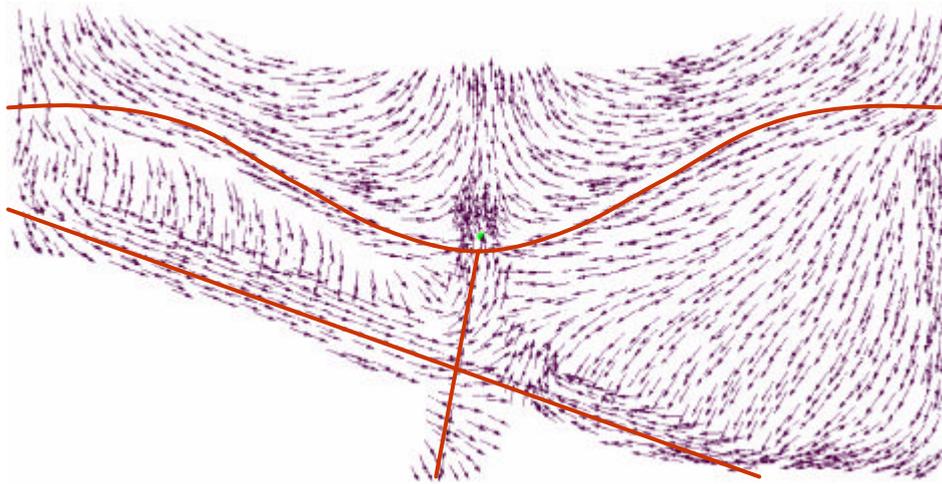


Figura 4.27: Exemplo 4 – resultados do campo de velocidade no regime permanente.

4.7.

Exemplo 5 – Análise de fluxo e transporte de partículas em meio fraturado

O exemplo 5 apresenta os resultados da análise numérica de fluxo e transporte de partículas em uma região fraturada e saturada. Esse exemplo é realizado com objetivo principal de visualizar o comportamento de partículas quando estas são lançadas em um meio fraturado.

O exemplo é dividido em duas etapas. Na primeira etapa é realizada uma análise de fluxo, em regime permanente, considerando dois poço de bombeamento (Poço1 e Poço2), como apresentado na Figura 4.28. Na segunda etapa realiza-se a análise de fluxo e transporte de partículas em regime transiente.

A região modelada apresenta as dimensões de 40.0x40.0x30.0m, e nela são geradas três fraturas determinísticas, cujas características e parâmetros de fluxo estão apresentadas abaixo:

Fratura 1

- Tamanho: 35.0 m;
- Orientação: direção de mergulho 0° e mergulho 45°;
- Abertura: 0.16 mm;
- Condutividade hidráulica: 1.8×10^3 m/dia;
- Armazenamento específico: 10^{-4} m^{-1} .

Fratura 2

- Tamanho: 35.0;
- Orientação: direção de mergulho 180° e mergulho 45°;
- Abertura: 0.16 mm;
- Condutividade hidráulica: 1.8×10^3 m/dia;
- Armazenamento específico: 10^{-4} m^{-1} .

Fratura 3

- Tamanho: 35.0;
- Orientação: direção de mergulho 0° e mergulho 90°;
- Abertura: 0.16 mm;
- Condutividade hidráulica: 1.8×10^3 m/dia;
- Armazenamento específico: 10^{-4} m^{-1} .

A malha de elementos finitos gerada pelo modelador MG apresenta 497 nós e 924 elementos. Essa malha é apresentada na Figura 4.28.

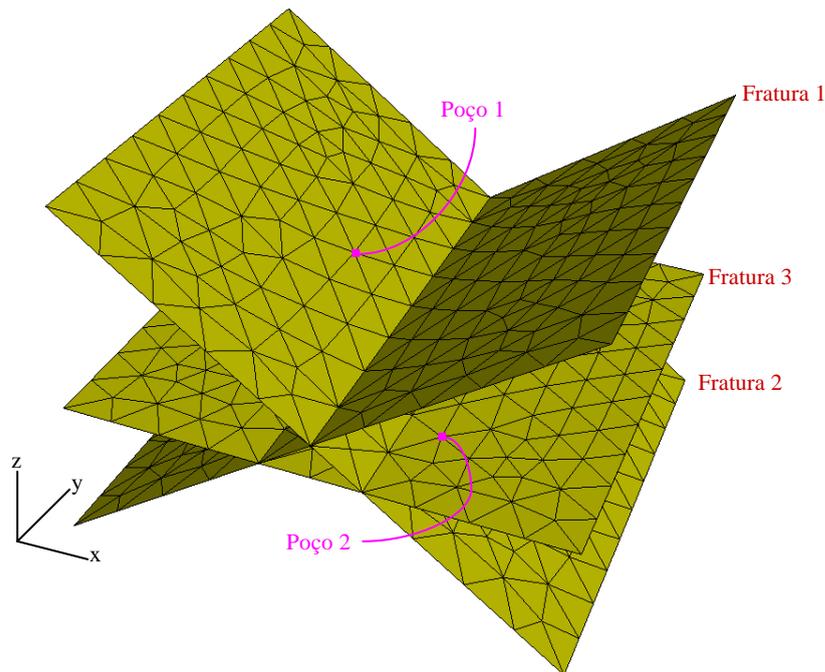


Figura 4.28: Exemplo 5 – malha de elementos finitos e posição dos poços de bombeamento.

Primeira etapa

Na primeira etapa como dito anteriormente, é realizada a análise de fluxo considerando dois poços de bombeamento.

Algumas informações adicionais, desta etapa, são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo: carga de pressão de 0.0 m em todo modelo;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 1000.0 m na face representada por x_{min} ,
 - carga total prescrita de 40.0 m na face representada por x_{max} ;
 - vazão prescrita de $-20.0 \text{ m}^3/\text{seg}$ no Poço1; e
 - vazão prescrita de $-10.0 \text{ m}^3/\text{seg}$ no Poço2;
- Método iterativo (não linear): Picard;
- Análise realizada em regime permanente.

A Figura 4.29 apresenta os resultados de carga total. O fluxo preferencial ocorre da esquerda para direita.

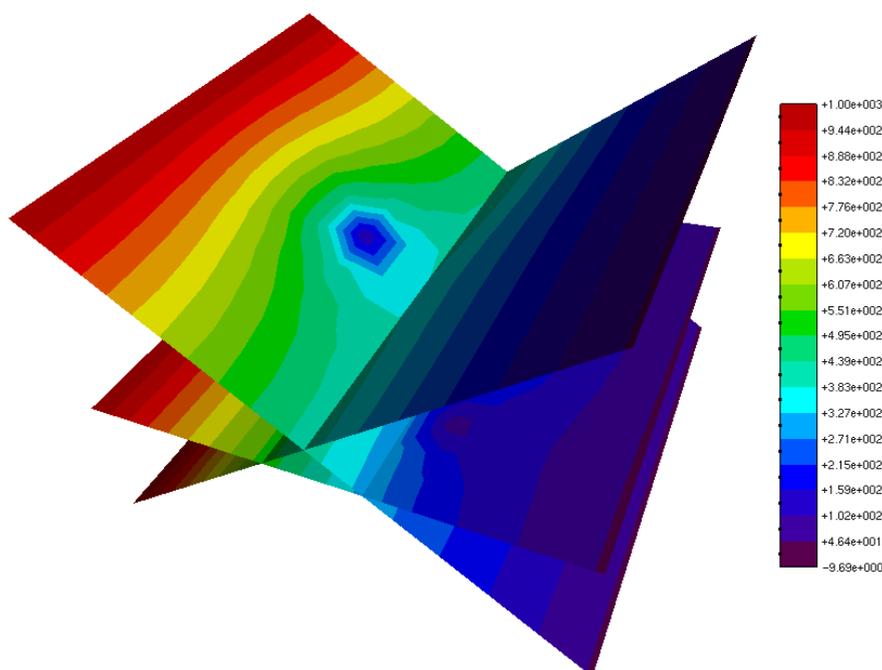


Figura 4.29: Exemplo 5 – Primeira etapa: resultados de carga total.

A Figura 4.30 apresenta os resultados de campo de velocidade. Na figura, pode-se perceber a influência dos poços de bombeamento no regime de fluxo.

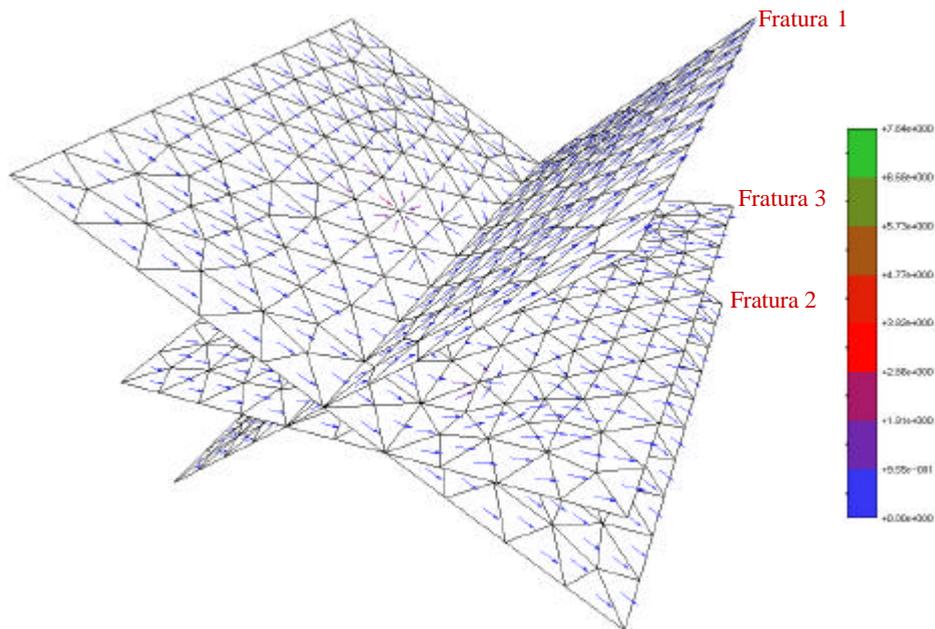


Figura 4.30: Exemplo 5 – Primeira etapa: resultados do campo de velocidade.

Segunda etapa

Na segunda etapa é realizada a análise de fluxo e transporte de partículas em regime transiente. Dez partículas são lançadas sobre a fratura 2, como apresentado na Figura 4.31.

Algumas informações adicionais, desta etapa, são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo: valores de carga de pressão obtidos na análise realizada na primeira etapa;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 1000.0 m na face representada por x_{min} ,
 - carga total prescrita de 40.0 m na face representada por x_{max} ;
 - vazão prescrita de $-20.0 \text{ m}^3/\text{seg}$ no Poço1;
 - vazão prescrita de $-10.0 \text{ m}^3/\text{seg}$ no Poço2;
- Tempo total de simulação: 200.0 seg;
- Método iterativo (não linear): Picard;
- Análise realizada em regime transiente.

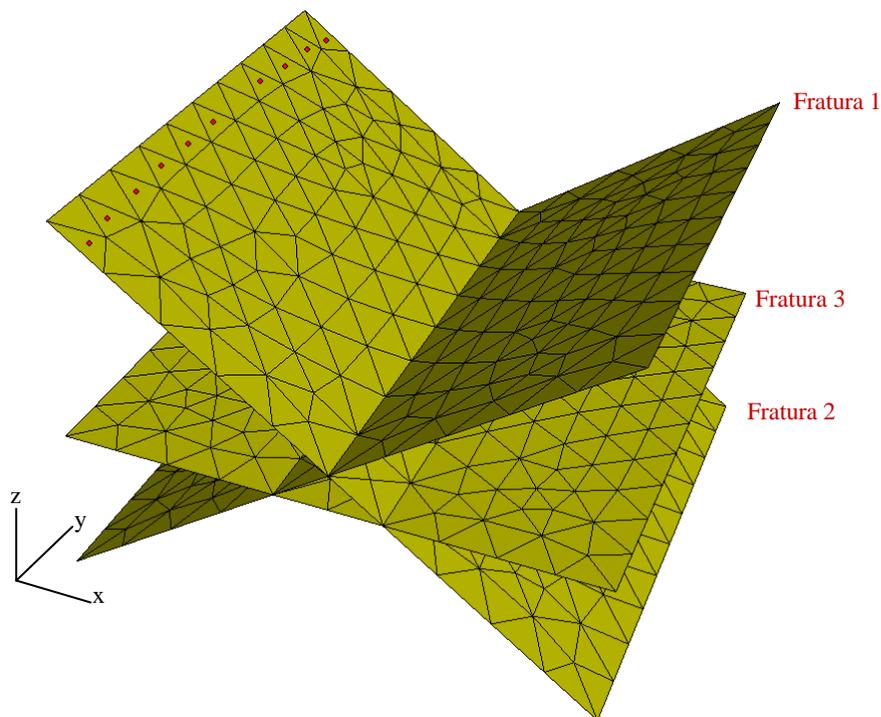
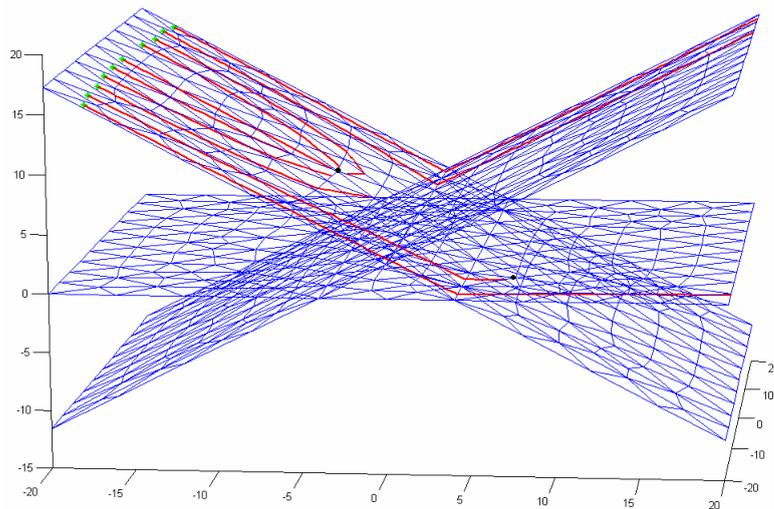


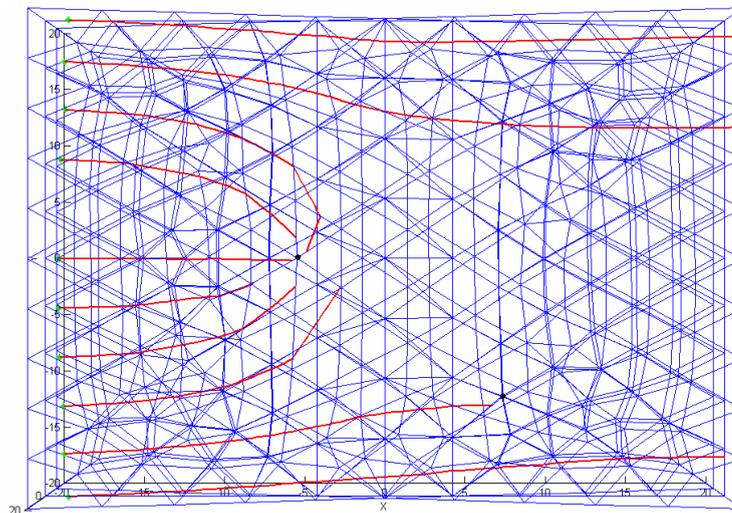
Figura 4.31: Exemplo 5 – Segunda etapa: posição das partículas lançadas sobre a fratura 2.

A Figura 4.32 apresenta os resultados das trajetórias das partículas no tempo de 200.0 seg. Aqui pode-se observar a influência dos poços de bombeamento na trajetória das partículas. Seis partículas têm suas trajetórias interrompidas no Poço1, duas (as duas mais acima da Figura 4.32b) seguem seu percursos até atingirem o limite do modelo. Estas duas, após a interseção com a fratura 1, seguem suas trajetórias sobre esta fratura (fratura 1), como pode ser visto na Figura 4.32a.

Duas outras fraturas (as duas mais abaixo da Figura 4.32b), após a interseção com a fratura 1, mantêm suas trajetórias sobre a fratura 2. Mas quando interceptaram a fratura 3, seguem a trajetória sobre esta fratura (fratura 3). Isto ocorre devido a presença do Poço2. Uma dessas partículas tem sua trajetória interrompida no Poço2 e outra segue até atingir o limite do modelo, como pode ser visto na Figura 4.32a.



(a)



(b)

Figura 4.32: Exemplo 5 – Segunda etapa: resultados das trajetórias de partículas no tempo de 200.0 seg.

4.8.

Exemplo 6 – Análise de fluxo e transporte de soluto em meio fraturado

O exemplo 6 apresenta os resultados da análise numérica de fluxo e transporte de soluto em uma região fraturada e saturada. A geometria do modelo e as características das fraturas são as mesmas do exemplo anterior.

Esse exemplo também foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa é feita uma análise de fluxo em regime permanente. Na segunda etapa é realizada a análise de fluxo e transporte de solutos, em regime transiente, considerando uma fonte de contaminação contínua, cuja localização pode ser vista na Figura 4.33.

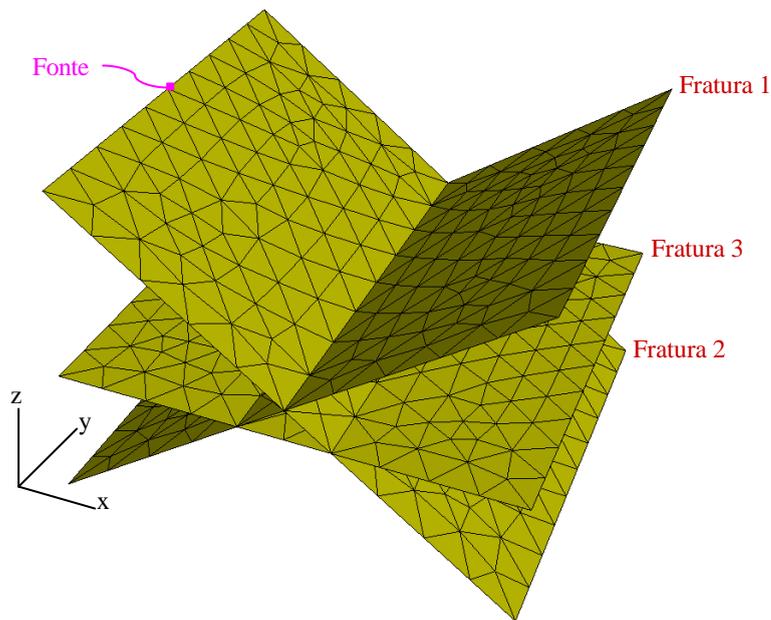


Figura 4.33: Exemplo 6 – malha de elementos finitos e posição da fonte de contaminação.

Primeira etapa

Na primeira etapa é realizada a análise de fluxo em regime permanente. Algumas informações adicionais são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo: carga de pressão de 0.0 m em todo modelo;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 80.0 m na face representada por x_{min} , e
 - carga total prescrita de 40.0 m na face representada por x_{max} ;
- Método iterativo (não linear): Picard;
- Análise realizada em regime permanente.

A Figura 4.34 apresenta os resultados de carga total. O fluxo ocorre da esquerda para direita.

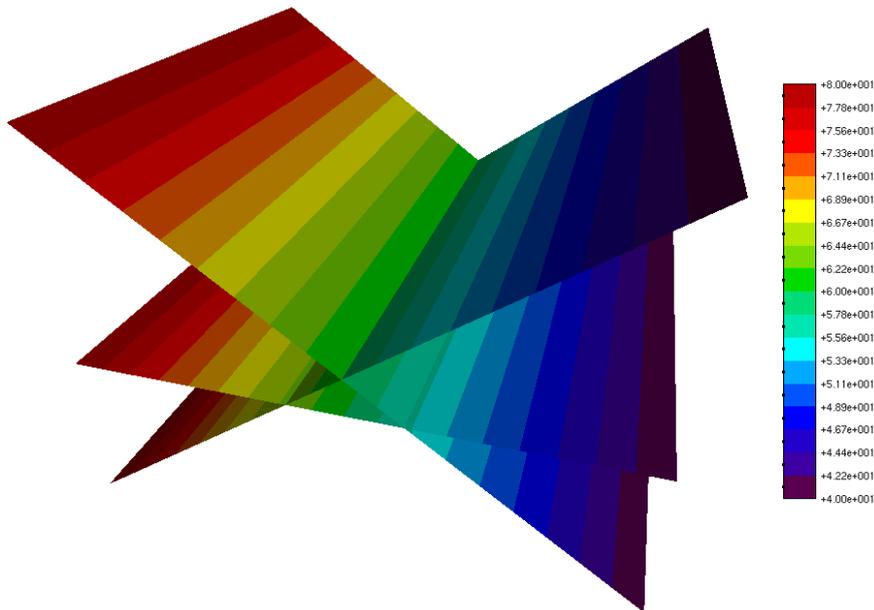


Figura 4.34: Exemplo 6 – Primeira etapa: resultados de carga total.

Segunda etapa

Na segunda etapa é realizada a análise de fluxo e transporte de soluto. Uma fonte de contaminação é considerada na fratura 2. Algumas informações adicionais são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo: valores de carga de pressão obtidos na análise realizada na primeira etapa;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 80.0 m na face representada por x_{min} , e
 - carga total prescrita de 40.0 m na face representada por x_{max} ,
- Condição inicial de transporte: concentração de 0.0 mg/l;
- Condição de contorno de transporte: concentração prescrita de 1000.0 mg/l na fonte;
- Parâmetros de transporte:
 - dispersividade longitudinal e transversal no plano das fraturas: 8.0m;
 - sem difusão;
 - sem retardamento;
- Tempo total de simulação: 1500 seg;
- Método iterativo (não linear): Picard;
- Análise realizada em regime transiente.

A Figura 4.35 apresenta os resultados de concentração no tempo de 1500 seg. A contaminação ocorre da esquerda para direita, seguindo o caminho preferencial de fluxo.

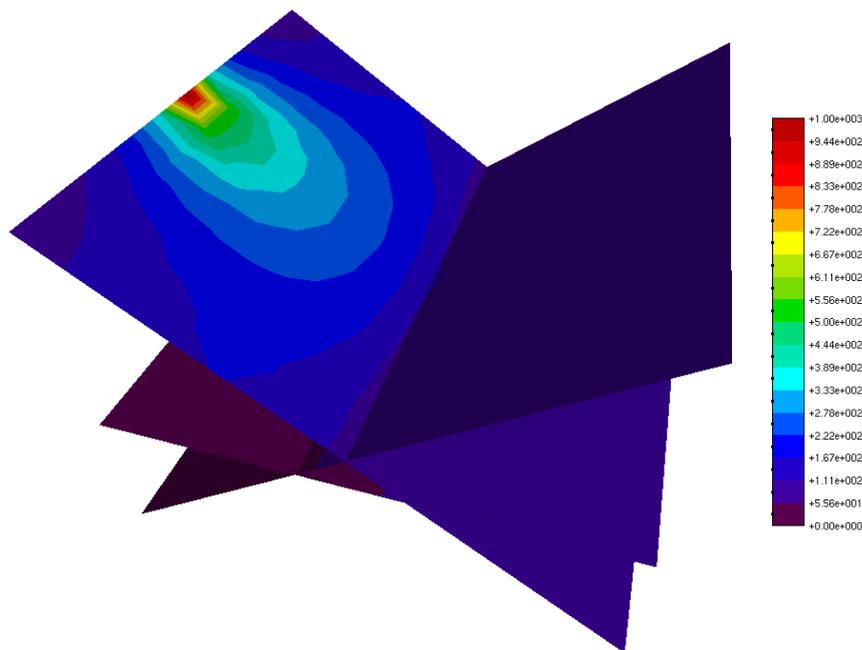


Figura 4.35: Exemplo 6 – Segunda etapa: resultados de concentração no tempo de 1500 seg.

Na figura acima pode-se perceber o transporte do contaminante pelas fraturas que interceptam a fratura onde foi instalada a fonte de contaminação (fratura 2).

4.9. Exemplo 7 – Análise de fluxo e transporte de soluto em meio fraturado

O exemplo 7 também apresenta os resultados da análise numérica de fluxo e transporte de soluto em uma região fraturada e saturada. Esse exemplo é dividido em duas etapas. Na primeira etapa é realizada a análise de fluxo em regime permanente. Na segunda etapa realiza-se a análise de fluxo e transporte de soluto, em regime transiente, considerando uma fonte de contaminação localizada sobre uma das fraturas horizontais, como pode ser visto na Figura 4.36.

A região modelada apresenta as dimensões de 72.0x63.0x43.0m, e nela são geradas quatro famílias de fraturas cujas características e parâmetros de fluxo estão apresentadas abaixo:

Família 1

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 1;
- Número de fraturas: 3;
- Tamanho das fraturas: 47.0 m (constante);
- Orientação: direção de mergulho 0° e mergulho 0° (constante);
- Abertura: 0.06 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 2.5×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Família 2

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 1;
- Número de fraturas: 4;
- Tamanho das fraturas: 42.0 m (constante);
- Orientação: direção de mergulho 135° e mergulho 45° (constante);
- Abertura: 0.06 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 2.5×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Família 3

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 1;
- Número de fraturas: 2;
- Tamanho das fraturas: 38.0 m (constante);
- Orientação: direção de mergulho 270° e mergulho 70° (constante);
- Abertura: 0.06 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 2.5×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Família 4

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 1;
- Número de fraturas: 4;

- Tamanho das fraturas: 36.0 m (constante);
- Orientação: direção de mergulho 90° e mergulho 80° (constante);
- Abertura: 0.06 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 2.5×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

A malha de elementos finitos gerada pelo modelador MG possui 3121 nós e 6880 elementos. A Figura 4.36 apresenta a malha de elementos finitos do modelo.

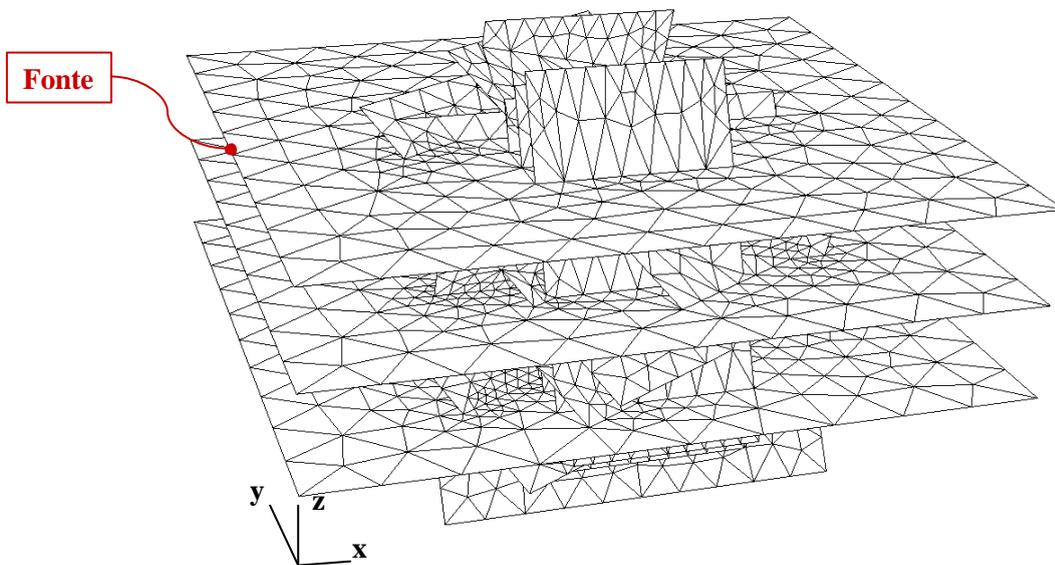


Figura 4.36: Exemplo 7 – malha de elementos finitos e posição da fonte de contaminação.

Primeira etapa

Na primeira etapa como dito anteriormente, é realizada a análise de fluxo em regime permanente.

Algumas informações adicionais, desta etapa, são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo: carga de pressão de 0.0 m em todo modelo;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 200.0 m na face representada por x_{min} , e
 - carga total prescrita de 100.0 m na face representada por x_{max} ;
- Método iterativo (não linear): Picard;
- Análise realizada em regime permanente.

A Figura 4.37 e a Figura 4.38 apresentam os resultados de carga total e campo de velocidade, respectivamente. Aqui, o fluxo ocorre da esquerda para direita.

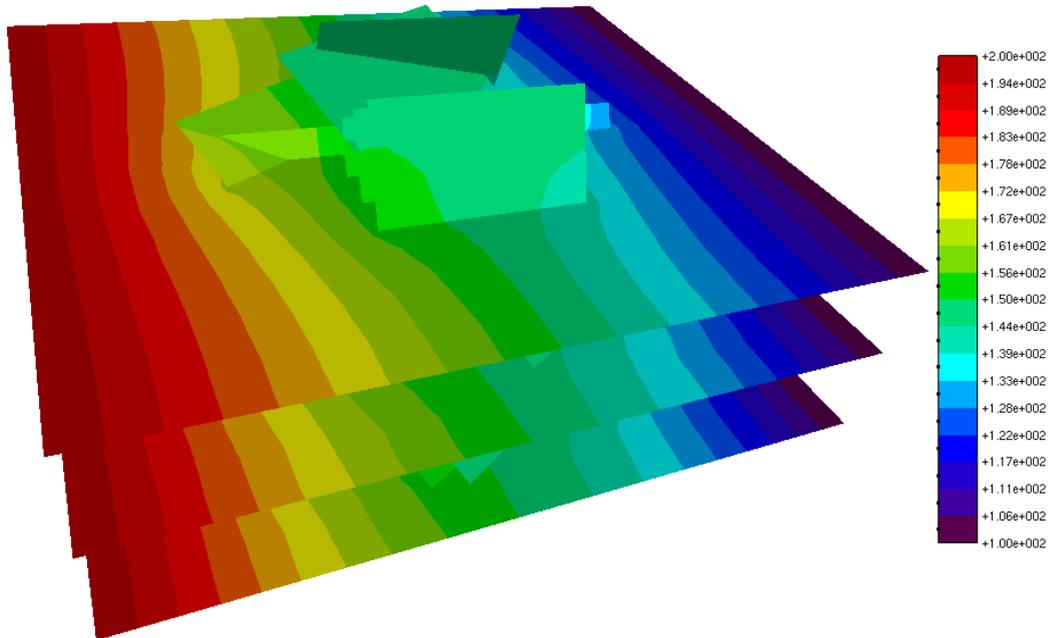


Figura 4.37: Exemplo 7 – Primeira etapa: resultados de carga total.

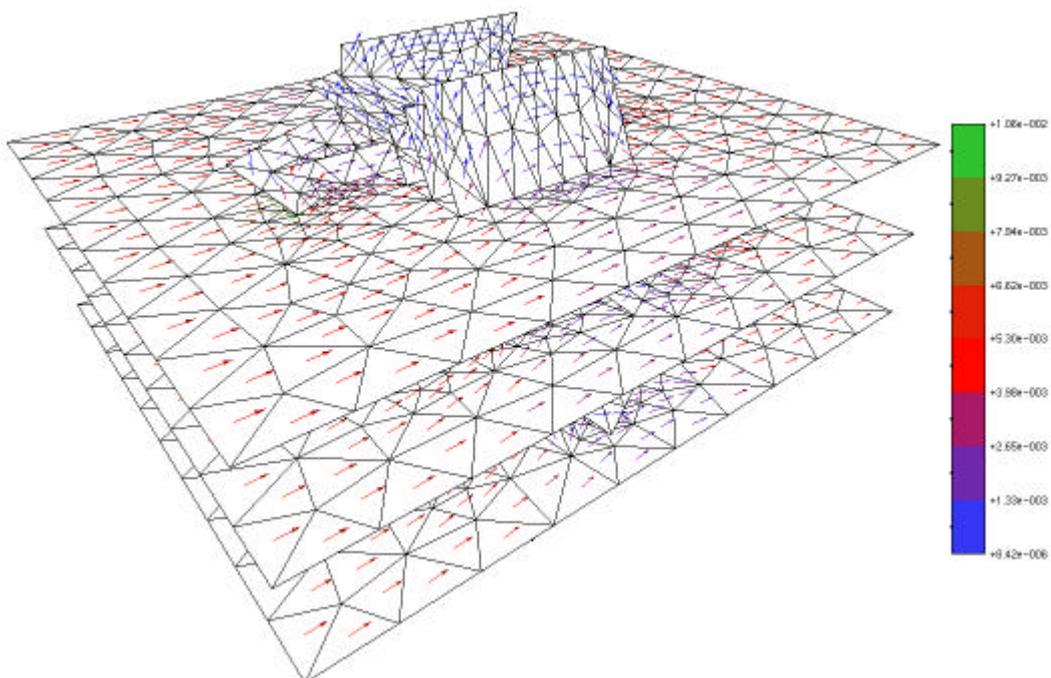


Figura 4.38: Exemplo 7 – Primeira etapa: resultados de campo de velocidade.

Segunda etapa

Na segunda etapa é realizada a análise de fluxo e transporte de soluto. Uma fonte de contaminação, localizada sobre uma das fraturas horizontais, é considerada. Algumas informações adicionais, desta etapa, são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo: valores de carga de pressão obtidos na análise realizada na primeira etapa;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 200.0 m na face representada por x_{min} ; e
 - carga total prescrita de 100.0 m na face representada por x_{max} ,
- Condição inicial de transporte: concentração de 0.0 mg/l;
- Condição de contorno de transporte: concentração prescrita de 1000.0 mg/l na fonte;
- Parâmetros de transporte:
 - dispersividade longitudinal e transversal no plano das fraturas: 10.0m; e
 - sem retardamento;
- Tempo total de simulação: 5000 seg;
- Método iterativo (não linear): Picard;
- Análise realizada em regime transiente.

A Figura 4.39 apresenta os resultados de concentração no tempo de 5000 seg. A contaminação ocorre da esquerda para direita, seguindo o caminho preferencial de fluxo.

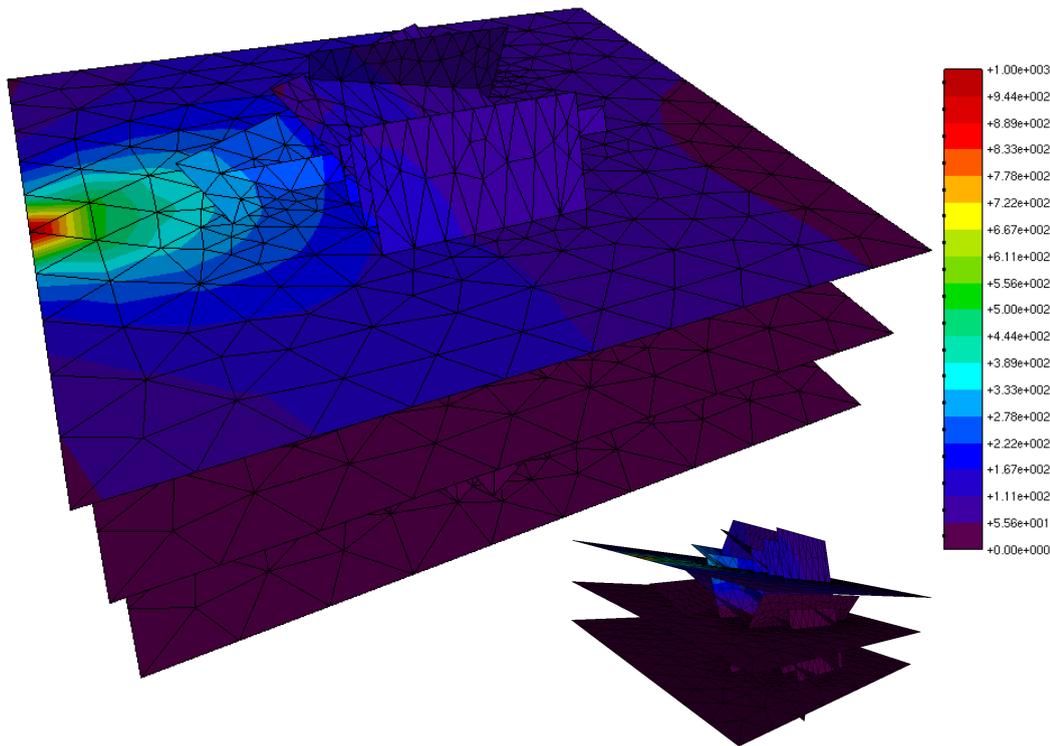


Figura 4.39: Exemplo 7 – Segunda etapa: resultados de concentração no tempo de 5000 seg.

Na figura acima pode-se perceber o espalhamento do contaminante na fratura onde foi posicionada a fonte de contaminação e nas fraturas que interceptam esta fratura.

4.10.

Exemplo 8 – Análise de fluxo em meio poroso e meio fraturado

O exemplo 8 apresenta os resultados da análise numérica de fluxo de um modelo composto de duas regiões, sendo uma representativa do meio poroso (região 1) e outra representativa do meio fraturado (região 2), como pode ser visto na Figura 4.40. Este exemplo ilustra um solo ao pé de uma encosta rochosa fraturada, situação observada com bastante frequência na cidade do Rio de Janeiro-RJ.

As superfícies que definem as duas regiões foram geradas no Gocad e importadas pelo FracGen3D. O modelo apresenta dimensões aproximadas de 100.0x50.0x30.0m.

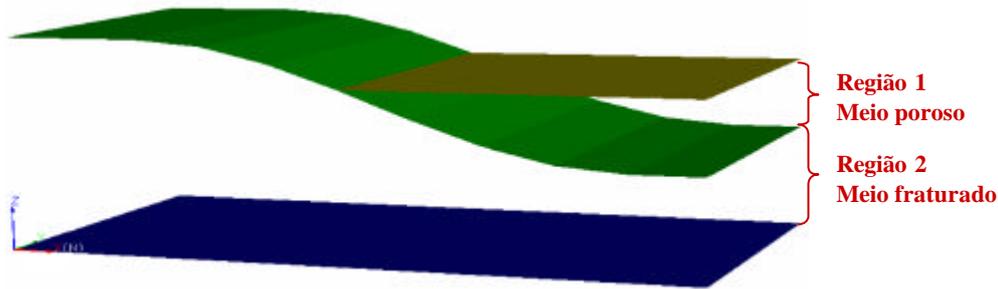


Figura 4.40: Exemplo 8 – superfícies que delimitam as regiões representativas dos meios poroso e fraturado.

Na região 2 são geradas duas famílias de fraturas cujas características e parâmetros de fluxo estão apresentados abaixo:

Família 1

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 2;
- Número de fraturas: 5;
- Tamanho das fraturas: 60.0 - 80.0 m (distribuição uniforme);
- Orientação: direção de mergulho 0° e mergulho 80° (constante);
- Abertura: 0.04 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 1.12×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Família 2

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 2;
- Número de fraturas: 7;
- Tamanho das fraturas: 60.0 - 80.0 m (distribuição uniforme);
- Orientação: direção de mergulho 90° e mergulho 60° (constante);
- Abertura: 0.05 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 1.75×10^2 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

A Figura 4.41 apresenta as fraturas geradas na região 2.

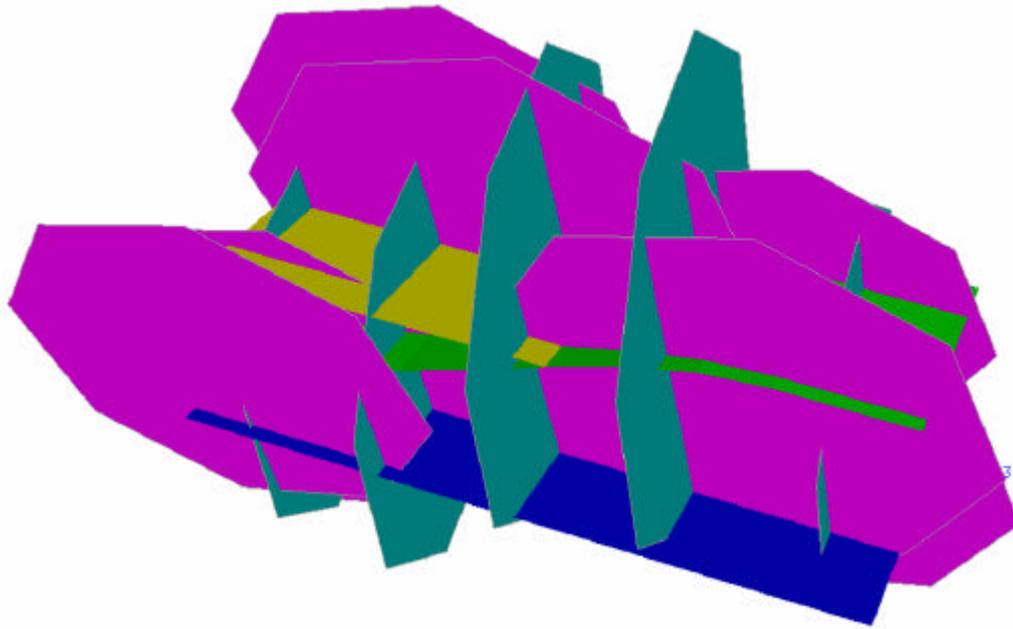


Figura 4.41: Exemplo 8 – fraturas geradas na região 2.

Na região 1 (meio poroso) é considerada uma condutividade hidráulica de 8.64 m/dia (representativa de uma areia) e um armazenamento específico de 0.0003 m^{-1} .

A malha de elementos finitos gerada pelo modelador MG possui 2954 nós e 10203 elementos, sendo 2535 elementos triangulares e 7668 elementos tetraédricos. A Figura 4.42 apresenta a malha de elementos finitos do modelo.

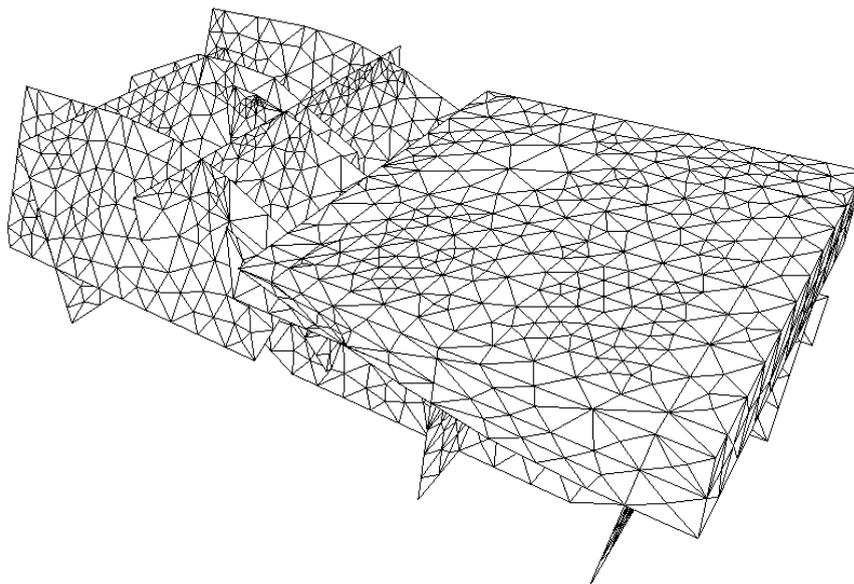


Figura 4.42: Exemplo 8 – malha de elementos finitos.

Algumas informações adicionais são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo na região 1: carga de pressão de -10.0 m;
- Condição inicial de fluxo na região 2: carga de pressão de -2.0 m;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 120.0 m na face representada por $xmin$,
 - carga total prescrita de 100.0 m na face representada por $xmax$;
- Tempo total de simulação: 60 min;
- Método iterativo (não linear): Picard;
- Análise realizada em regime transiente.

A Figura 4.43 apresenta o resultado de carga total. Na figura, o fluxo ocorre da esquerda para direita.

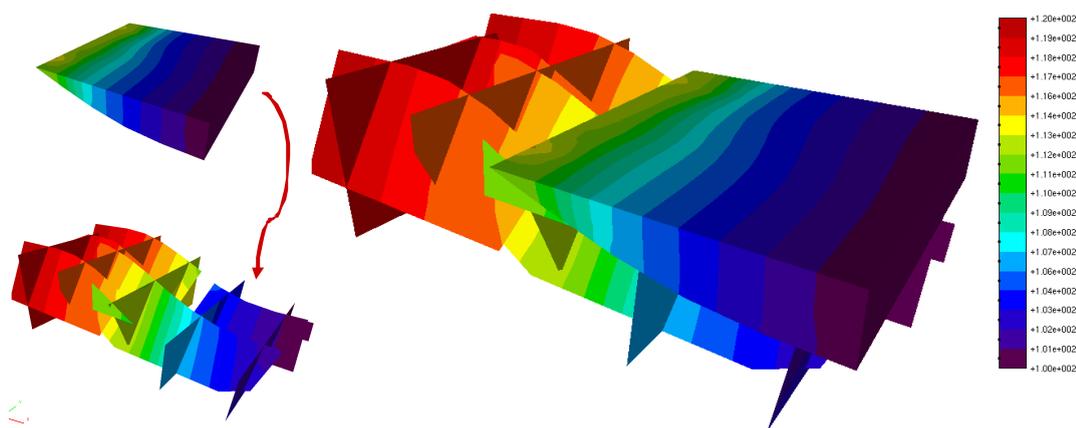


Figura 4.43: Exemplo 8 – resultados de carga total.

4.11. Exemplo 9 – Análise de fluxo em meio fraturado

O exemplo 9 apresenta os resultados da análise numérica de fluxo em uma região fraturada, não saturada. Este exemplo apresenta, como diferencial, uma família de fraturas, cujas fraturas são representas por superfícies não planas. Esta família ilustra uma família de juntas de alvíos, formação também bastante observada na cidade do Rio de Janeiro-RJ.

A Figura 4.44 apresenta as superfícies que definem a região (superfícies de topo e de base) e as que compõem a família de juntas de alvíos (superfícies

intermediárias às de topo e de base, Fratura 1 e Fratura 2). Estas superfícies foram geradas no Gocad e importadas pelo FracGen3D. O modelo apresenta dimensões aproximadas de 200.0x100.0x50.0m.

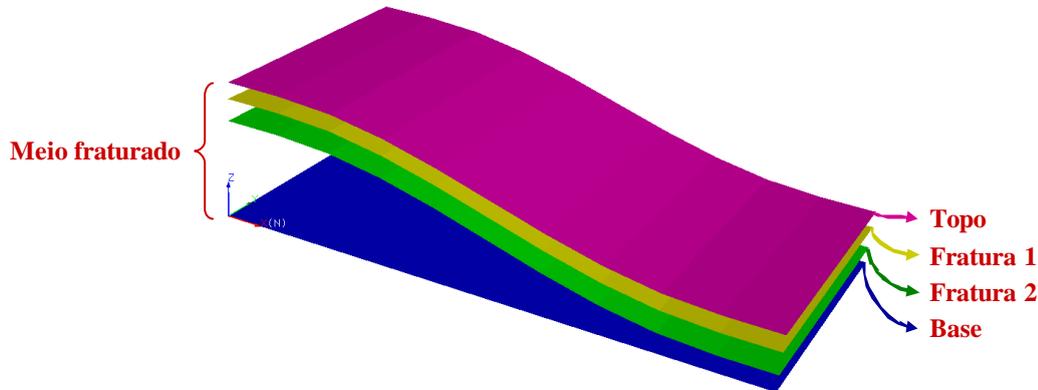


Figura 4.44: Exemplo 9 – superfícies que delimitam a região representativa do meio fraturado e as que compõem a família de juntas.

Na região são geradas três famílias de fraturas (a contar com a família de juntas) cujas características e parâmetros de fluxo estão apresentados abaixo:

Família 1

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 1;
- Número de fraturas: 32;
- Espaçamento: 30.0 m;
- Tamanho das fraturas: 30.0 m (constante);
- Orientação: direção de mergulho 0° e mergulho 90° (constante);
- Abertura: 2 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 2.8×10^5 m/dia;
- Armazenamento específico: $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Família 2

- Metodologia de geração de família de fraturas: Metodologia 1;
- Número de fraturas: 32;
- Espaçamento: 30.0 m;
- Tamanho das fraturas: 30.0 m (constante);
- Orientação: direção de mergulho 90° e mergulho 90° (constante);
- Abertura: 2 mm (constante);

- Condutividade hidráulica: 2.8×10^5 m/dia;
- Armazenamento específico: 4.5×10^{-6} m⁻¹.

Família 3 (juntas de alívio)

- Fraturas determinísticas com geometria igual a da superfície de topo da região;
- Número de fraturas: 2;
- Espaçamento: 6.0 m (entre a superfície de topo e a Fratura 1) e 8.0 m (entre a Fratura 1 e a Fratura 2);
- Abertura: 2 mm (constante);
- Condutividade hidráulica: 2.8×10^5 m/dia;
- Armazenamento específico: 4.5×10^{-6} m⁻¹.

A Figura 4.45 apresenta as fraturas geradas na região.

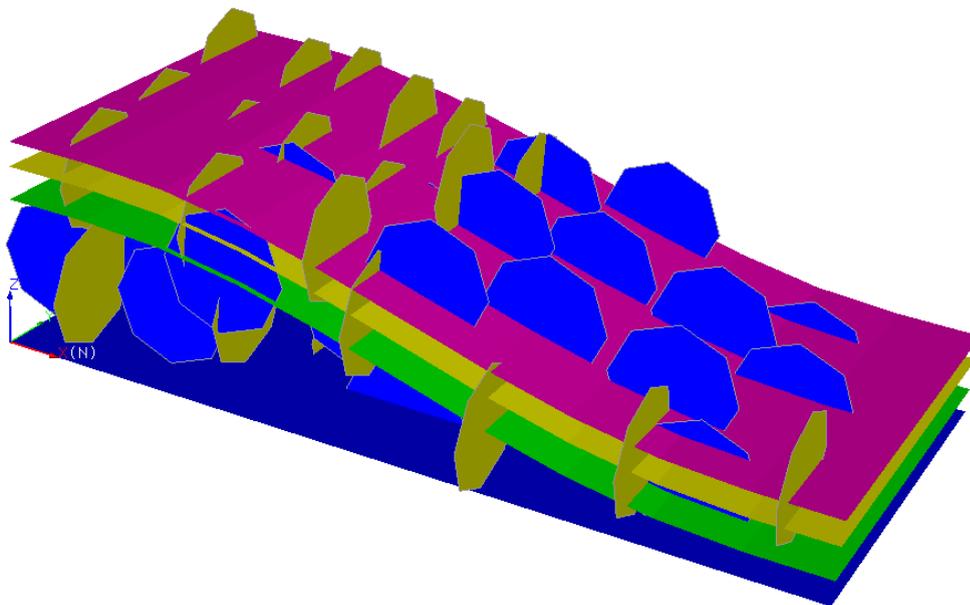


Figura 4.45: Exemplo 9 – fraturas geradas na região.

A malha de elementos finitos gerada pelo modelador MG apresenta 7241 nós e 14071 elementos. Essa malha é ilustrada na Figura 4.46.

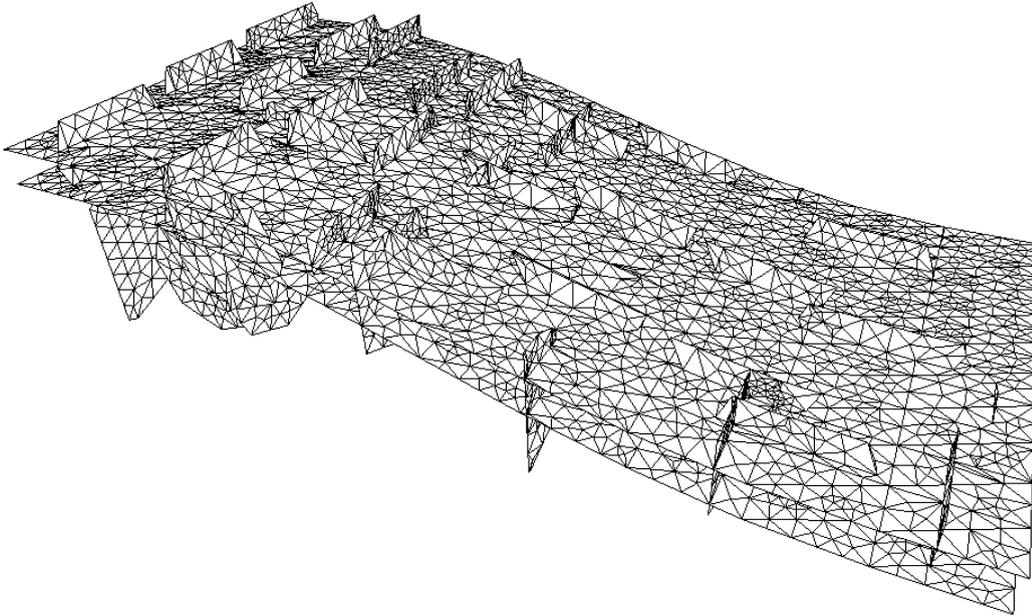


Figura 4.46: Exemplo 9 – malha de elementos finitos.

Algumas informações adicionais são apresentadas abaixo:

- Condição inicial de fluxo: carga de pressão de -2.0 m;
- Condições de contorno de fluxo:
 - carga total prescrita de 200.0 m na face representada por x_{min} ,
 - carga total prescrita de 100.0 m na face representada por x_{max} ;
- Método iterativo (não linear): Picard;
- Análise realizada em regime permanente.

A Figura 4.47 apresenta o resultado de carga total. Na figura, o fluxo ocorre da esquerda para direita.

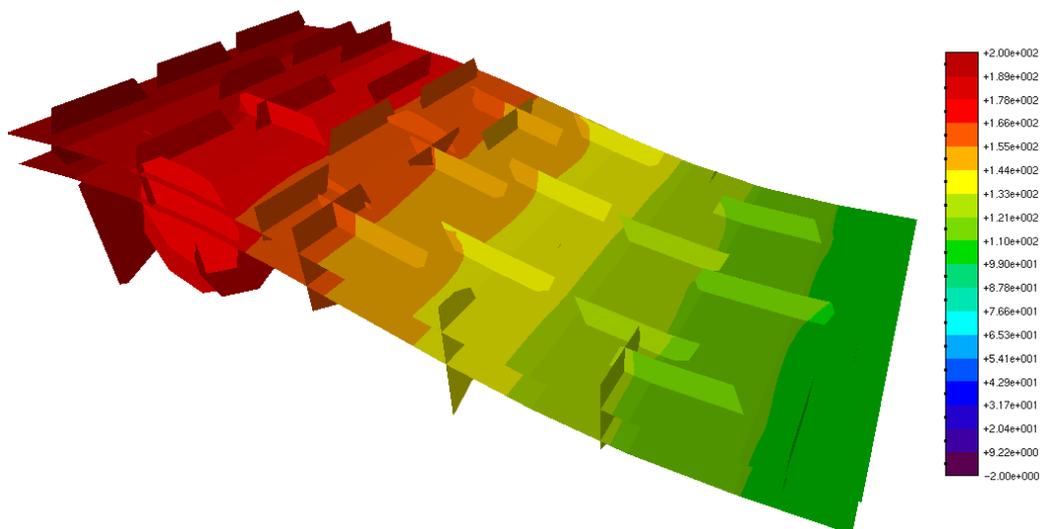


Figura 4.47: Exemplo 9 – resultados de carga total.