

6 Exemplos para avaliação das Formulações para Simulação de Fluxo em Meios Porosos

6.1. Considerações gerais

Esse capítulo apresenta alguns exemplos com o objetivo de verificar as formulações bifásicas implementadas em meios homogêneos e heterogêneos.

Para facilitar a leitura desse capítulo, as formulações avaliadas são denominadas: Método EF-GD e Método EFH-GD. O Método EF-GD utiliza EF para o cálculo das pressões, pós-processamento das velocidades utilizando as funções de aproximação de Raviart-Thomas e o MEFD para o cálculo das saturações. O Método EFH-GD, também estudado por Hoteit e Firoozabadi (2008), usa o método dos elementos finitos mistos hibridizado EFH para o cálculo das pressões e MEFD para resolver as saturações.

São apresentados exemplos clássicos para ambos os métodos propostos, cuja solução obtida é comparada com a solução encontrada na literatura, de modo a demonstrar a potencialidade e a aplicabilidade da formulação desenvolvida. Vale ressaltar que há dificuldade de encontrar resultados para fluxo bifásico em meios heterogêneos na literatura. Os problemas estudados foram: fluxo bifásico unidimensional de Buckley-Leverett, um problema bidimensional em um meio poroso estratificado, um exemplo de fluxo bidimensional de cinco poços em meio homogêneo e um em meios geológicos incluindo uma fratura.

6.2. Exemplo 1 - Fluxo Bifásico Unidimensional (BL)

Inicialmente, a validade dos dois modelos numéricos é verificada com um modelo com soluções analíticas conhecidas no espaço 1D. No Exemplo 1, resolvemos o problema Buckley-Leverett (1941) em um meio homogêneo com diferentes propriedades de fluido e pressão capilar nula.

Considera-se um domínio 1D homogêneo horizontal com comprimento de

300 m, inicialmente saturado com óleo (fase não molhante). O problema consiste em injetar um fluido (fase molhante) pela lateral esquerda do domínio com o objetivo de deslocar o fluido existente no reservatório (fase não-molhante). Água é injetada com uma taxa de fluxo constante em uma extremidade para deslocar o óleo para a outra extremidade. A pressão é mantida constante na extremidade da produção e a pressão capilar, bem como os efeitos gravitacionais, são negligenciados. Utiliza-se uma malha com 1×80 células quadrilaterais.

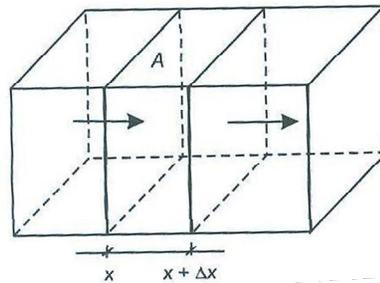


Figura 10 - Representação esquemática do avanço do fluido a cada célula (Rosa et al (2006)).

Foram aplicadas condições de contorno periódicas na direção y para simular o deslocamento unidimensional na direção x , onde o deslocamento total é de $L = 300$ m. Neste exemplo, os efeitos da pressão capilar, dos termos no interior do domínio e os efeitos gravitacionais foram desconsiderados. A saturação residual da fase não-molhante é igual a 0,20. A porosidade do reservatório é igual a 0,20. O reservatório é considerado um meio poroso homogêneo e isotrópico. Os dados relevantes para este problema são apresentados na Tabela 1.

Neste exemplo, para um caso assume-se a mesma viscosidade, para as fases de óleo e água, Caso 1. Para os outros casos, Caso 2 e 3, altera-se a relação de viscosidade na proporção $2/1$ e $2/3$, respectivamente. Utilizam-se funções lineares e não lineares de permeabilidade relativa. As permeabilidades relativas são dadas pelas equações (2.8) e (2.9) e a saturação normalizada S_e definida pela equação (2.6). Considera-se, ainda que, há reposição volumétrica, neste caso de água, para repor o volume do fluido que está sendo extraído.

Tabela 1 - Dados relevantes do Exemplo 1.

Dimensões do domínio	300 m × 1 m × 1 m
Propriedades da rocha	$\phi = 0,2$, $k = 1\text{md}$
Propriedades do fluido	Caso 1: $\mu_w(\text{cP})/\mu_n(\text{cP}) = 1/1$ Caso 2: $\mu_w(\text{cP})/\mu_n(\text{cP}) = 2/1$ Caso 3: $\mu_w(\text{cP})/\mu_n(\text{cP}) = 2/3$ $\rho_w = \rho_n = 1000 \text{ kg/m}^3$
Permeabilidades relativas	Linear, quadrática (Equações (2.8) e (2.9)).
Pressão capilar	Negligenciada
Saturação residual	$S_{rw} = 0$, $S_{rn} = 0,2$
Taxa de injeção	$5 \times 10^{-4} \text{PV/dia}$
Tempo de simulação	1100 segundos
Tamanho da malha	80 células

6.2.1.

Discussão dos resultados

Utilizou-se neste exemplo os dois métodos propostos para resolver numericamente esse problema com diferentes permeabilidades relativas e diferentes razões de viscosidade de óleo e água, de modo a comparar os resultados com as soluções analíticas existentes na literatura.

Na Figura 11 são apresentados os resultados do Caso 1, $\mu_w/\mu_n = 1/1$, e função de permeabilidade linear ($m=1$), respectivamente, obtidos pelos Métodos EF-GD e EFH-GD, bem como a solução analítica. Observa-se nesse caso que ambos os métodos apresentam dispersões de mesma grandeza quando comparados qualitativamente com a solução analítica.

Na Figura 12 são apresentados os resultados do Caso 2, $\mu_w/\mu_n = 2/1$, e função de permeabilidade linear ($m=1$), respectivamente, obtidos pelos Métodos 1 e 2.

Na Figura 13 são apresentados os resultados do Caso 3, $\mu_w/\mu_n = 2/3$, com função de permeabilidade relativa linear ($m=1$). Na Figura 14 são apresentados os resultados do Caso 3, $\mu_w/\mu_n = 2/3$, com função de permeabilidade relativa quadrática ($m=2$).

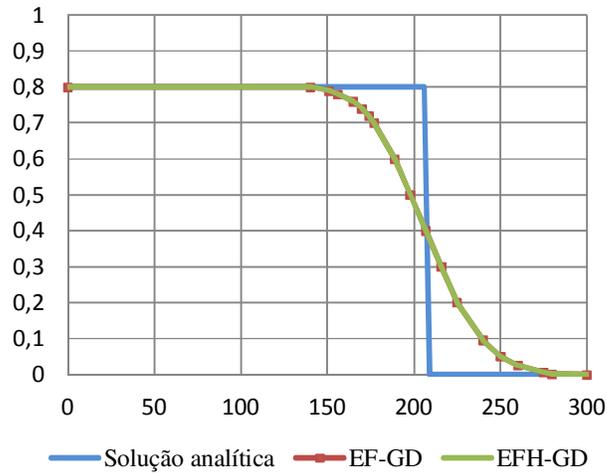


Figura 11 - Frente de saturação - Caso 1.

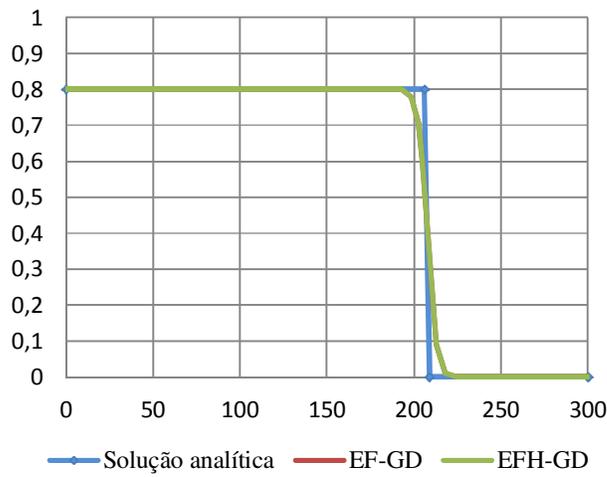


Figura 12 - Frente de saturação - Caso 2.

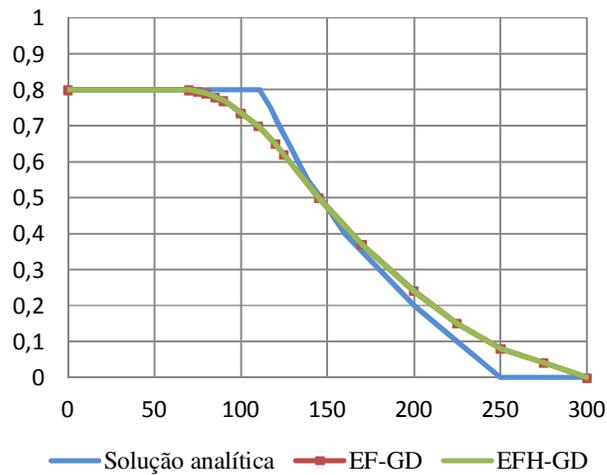


Figura 13 - Frente de saturação - $m=1$ - Caso 3.

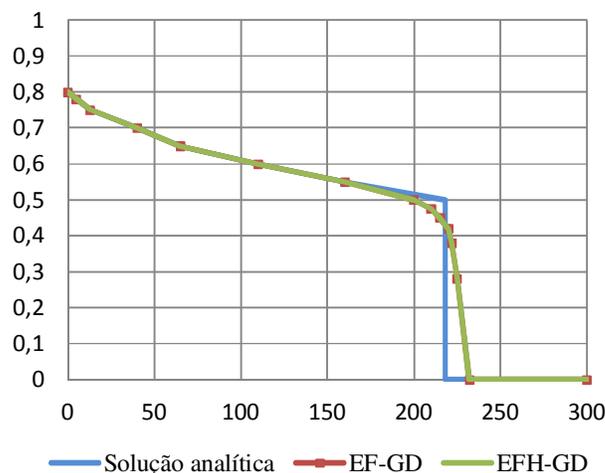


Figura 14 - Frente de saturação- $m=2$ - Caso 3.

Verifica-se uma boa concordância entre as soluções implementadas, entretanto, ambas as soluções apresentaram a mesma ordem de dispersão quando comparadas qualitativamente com a solução analítica, apresentada em Hoteit e Firoozabadi (2008).

Nas análises avaliou-se se o equilíbrio do balanço de massa é obedecido pelas formulações propostas em todos os casos estudados. Observou-se que ambas as proposições alcançaram o equilíbrio do balanço de massa, com erros relativos baixíssimos, conforme são apresentados nas Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4. Observa-se, no entanto, que o Método EF-GD alcança erros relativos inferiores aos obtidos pelo Método EFH-GD.

Os tempos de simulação pelo Método EF-GD em todas as simulações foram inferiores ao EFH-GD, de modo que o Método EF-GD demanda menor esforço computacional. Isso se deve ao fato de que o número de faces é sempre maior que o número de nós. Como a malha do Método EFH-GD é construída utilizando uma matriz de ordem dada pelo número de faces, enquanto que a malha do Método EF-GD utiliza matriz de ordem do número de nós, o Método EF-GD acaba por possuir uma matriz menor, o que o torna menos dispendioso.

Tabela 2 - Tempo de processamento para diferentes métodos - Caso 1.

Método	Tempo de processamento	Erro relativo final (%)
Método EF-GD	33,293278 s	-2,7043e-006
Método EFH-GD	56,760475 s	-0,0027

Tabela 3 - Tempo de processamento para diferentes métodos - Caso 2.

Método	Tempo de processamento	Erro relativo final (%)
Método EF-GD	28,952996 s	-3,6972e-009
Método EFH-GD	48,882337 s	-1,3175e-008

Tabela 4 - Tempo de processamento para diferentes métodos - Caso 3³.

Método	Tempo de processamento	Erro relativo final (%)
Permeabilidade relativa linear (m=1)		
Método EF-GD	38,465625 s	-0,1199
Método EFH-GD	48,438564 s	-0,1199
Permeabilidade relativa quadrática (m=2)		
Método EF-GD	27,051290 s	-3,5780e-010
Método EFH-GD	35,483411 s	1,0654e-009

Assim, conclui-se que para esse simples caso o Método EF-GD utiliza menor tempo de processamento, obtém menores erros, no entanto apresenta uma dispersão maior que o Método EFH-GD quando comparada a solução analítica. Ambos os métodos estudados conservam a massa em todos os casos 1D avaliados.

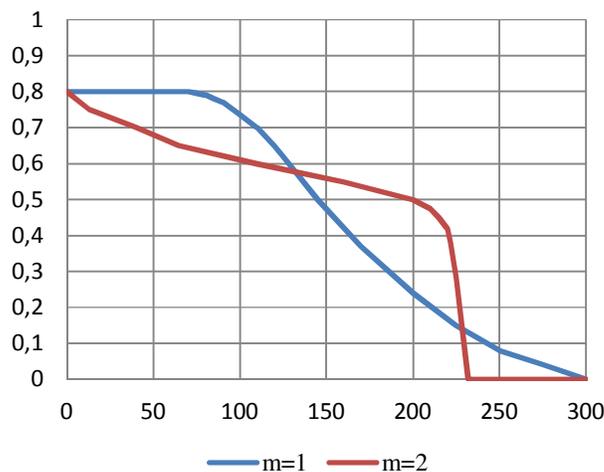


Figura 15 - Influência da relação da permeabilidade relativa na frente de saturação - Método EF-GD - Caso 3.

³ O Caso 3 é simulado para 900 segundos, enquanto os demais casos desse exemplo são simulados para 1100 segundos.

A Figura 15 mostra a influência da relação de permeabilidade relativa (linear ou quadrática) no cálculo da frente de saturação, Caso 3, por EF-GD. Observa-se uma frente de saturação melhor definida para o caso de relação de permeabilidade quadrática.

A Figura 16 mostra a comparação da influencia da razão de viscosidades no cálculo da frente de saturação quando uma relação linear de permeabilidade relativa é considerada. Observa-se que a frente de saturação é melhor definida quando a viscosidade do fluido deslocante é maior que a do fluido deslocado.

Neste simples caso 1D em um meio homogêneo, o Método EFH-GD mostra uma menor dispersão numérica do que a solução pelo Método EF-GD, quando comparada ao resultado analítico apresentado em Hoteit e Firoozabadi (2008). Todas as soluções são obtidas em uma malha uniforme de 80 células. Os Casos 1 e 2 consideram um tempo de análise de 1100 segundos, enquanto o Caso 3 considera 900 segundos.

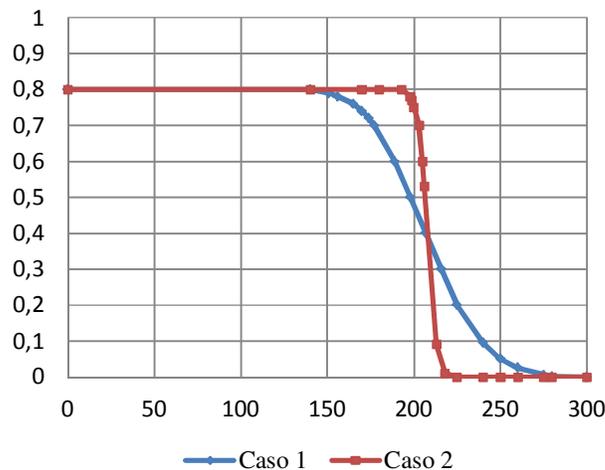


Figura 16 - Influência da razão de viscosidades na frente de saturação- Método EF-GD- Caso 1 e 2.

6.3.

Exemplo 2 - Fluxo Bifásico Bidimensional em reservatório estratificado

Este exemplo, extraído de Hoteit e Firoozabadi (2008), analisa a condição de fluxo bifásico em um domínio 2D horizontal estratificado, para os dois métodos estudados nesse trabalho.

A Figura 17 apresenta o esquema empregado na análise, em que o domínio é composto por camadas de permeabilidades alternadas (1md, 100md). A água (fase molhante) é injetada uniformemente através do lado a esquerda do domínio em camadas, o qual é inicialmente saturado com óleo (fase não molhante). A produção está do lado direito oposto.

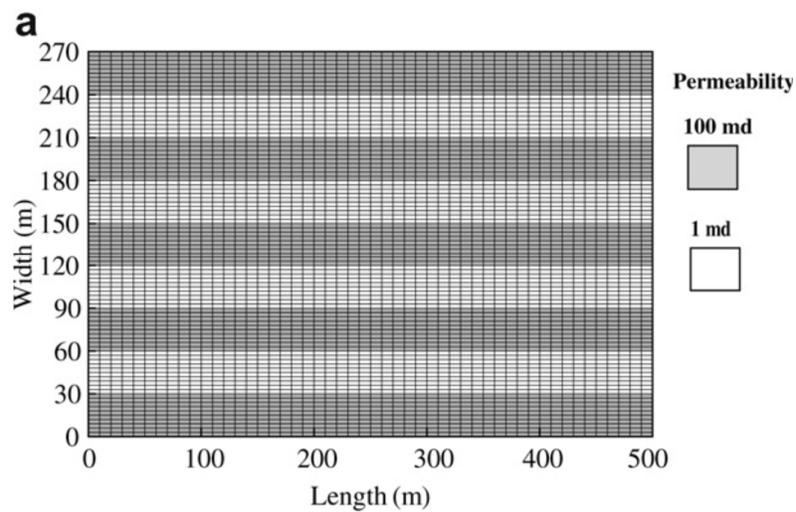


Figura 17 - Domínio 2D heterogêneo com permeabilidades distintas. (Hoteit e Firoozabadi (2008)).

As permeabilidades relativas são função quadrática de saturação de água. Outros dados relevantes ao problema são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados relevantes do Exemplo 2.

Dimensões do domínio	500 m × 270 m × 1 m
Propriedades da rocha	$\phi = 0,2$, $k = 1\text{md}$, 100md
Propriedades do fluido	$\mu_w = 1\text{cP}$, $\mu_n = 0,45\text{ cP}$ $\rho_w = 1000\text{ kg/m}^3$, $\rho_n = 660\text{ kg/m}^3$
Permeabilidades relativas	Quadrática (Equações (2.8) e (2.9)).
Pressão capilar	Negligenciada
Saturação residual	$S_{rw} = 0$, $S_{rn} = 0$
Taxa de injeção	0,11PV/ano
Tamanho da malha	4500 retângulos

A taxa de injeção em volume poroso (PV) é de 0,11 PV/ano. Os efeitos gravitacionais e de capilaridade foram negligenciados.

A malha empregada, em ambas as análises, é formada por 4500 elementos do tipo Q4.

6.3.1. Discussão dos resultados

A Figura 18 e Figura 19 mostram a configuração final da frente de saturação com o tempo para os métodos EF-GD e EFH-GD, respectivamente. Quando comparadas com a Figura 20, que apresenta os resultados obtidos em Hoteit e Firoozabadi (2008) para esse mesmo problema, observa-se que as frentes de saturação nas camadas são bem caracterizadas e se aproximam qualitativamente do resultado encontrado em Hoteit e Firoozabadi (2008).

A Figura 21 e a Figura 22 mostram a evolução das frentes de saturação em cada camada, respectivamente, obtidas pelo Método EF-GD e EFH-GD. Observa-se, conforme esperado, que as camadas mais permeáveis possuem frentes mais avançadas. As camadas das bordas apresentam uma frente um pouco retardada, em comparação com a camada central de igual permeabilidade, devido as condições de contorno do domínio.

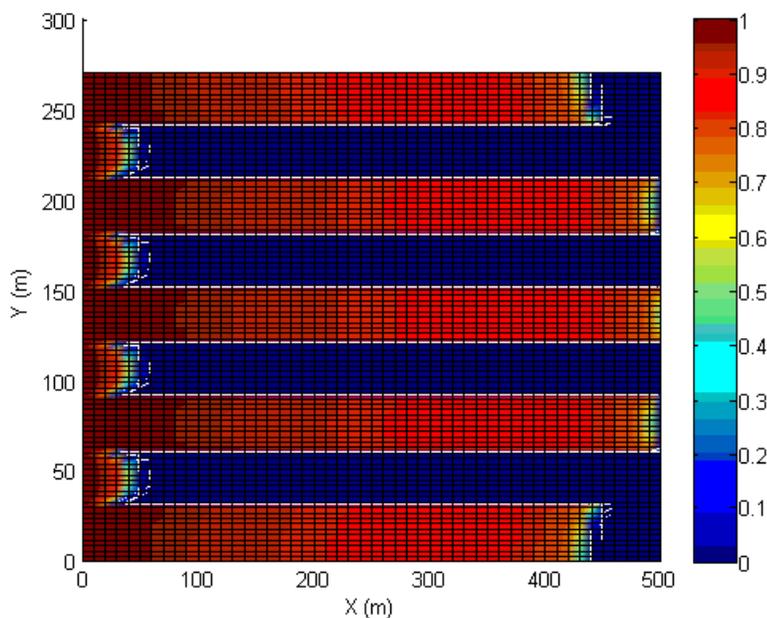


Figura 18 - Perfil de saturação obtido pelo Método EF-GD.

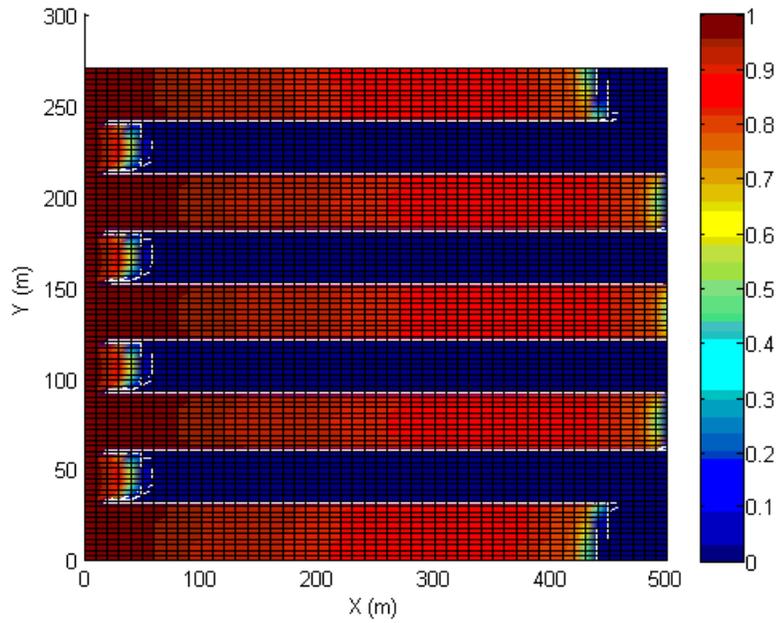


Figura 19 - Perfil de saturação obtido pelo Método EFH-GD.

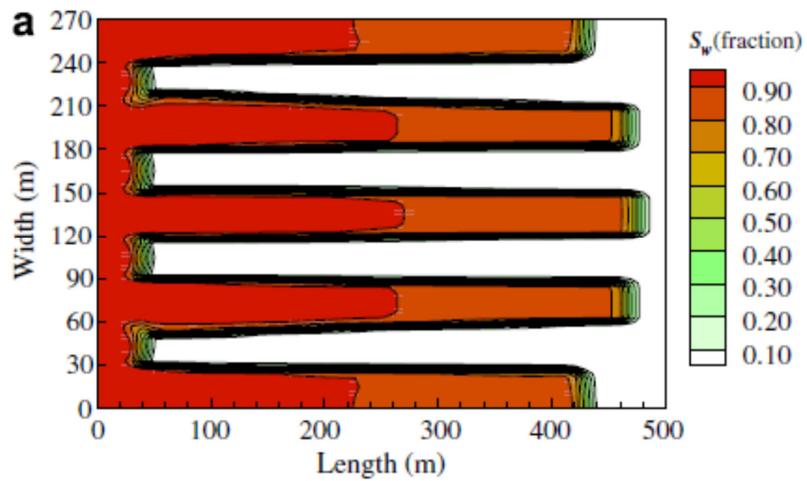


Figura 20 - Perfil de saturação apresentado em Hoteit e Firoozabadi (2008).

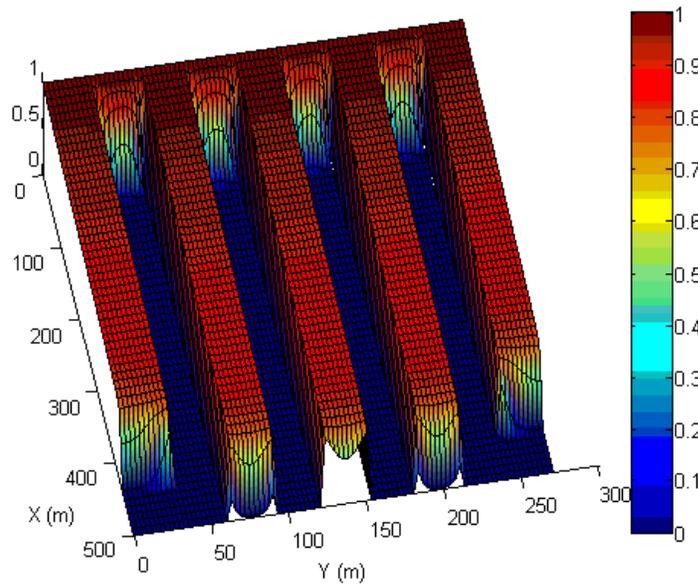


Figura 21 - Superfícies de saturação obtidas pelo Método EF-GD.

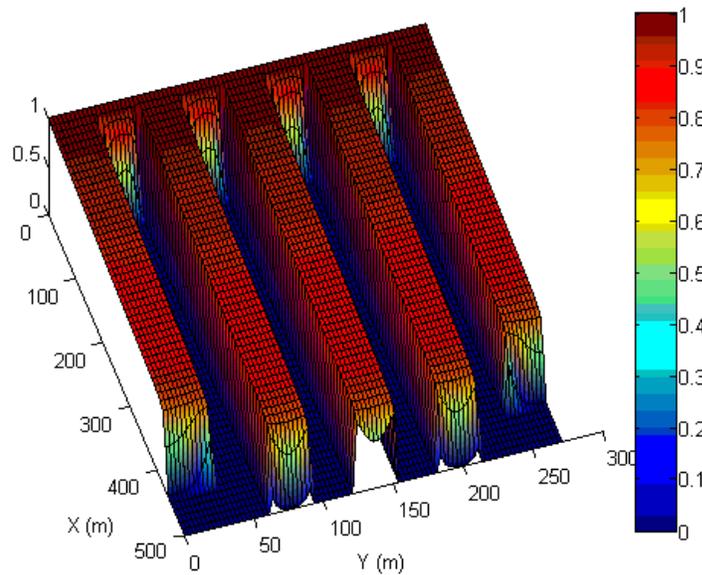


Figura 22 - Superfícies de saturação obtidas pelo Método EFH-GD.

Pela análise da Figura 23 e da Figura 24, observa-se que o erro relativo ao balanço de massa é de 2,315% e de 1,997%, para o Método EF-GD e EFH-GD, respectivamente. De modo que se podem considerar os métodos como conservativos.

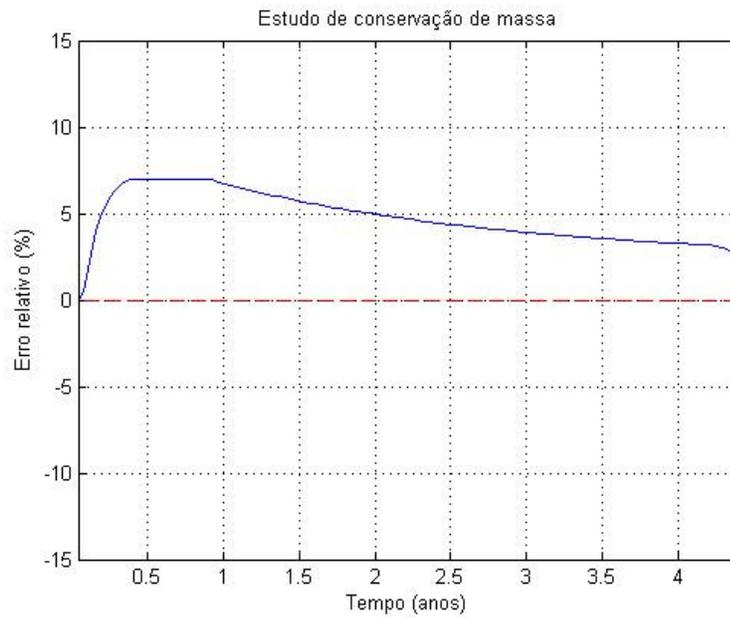


Figura 23 - Balanço de massa obtido pelo Método EF-GD.

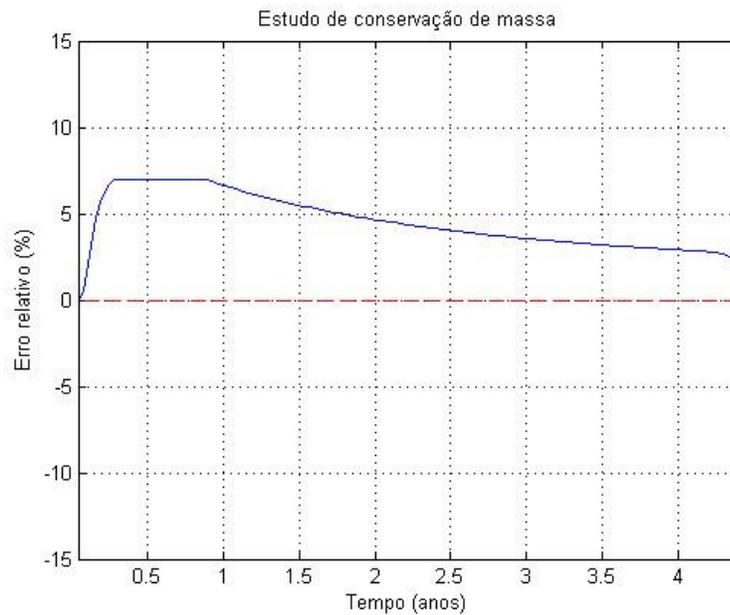


Figura 24 - Balanço de massa obtido pelo Método EFH-GD.

Apesar dos resultados finais serem próximos no decorrer do tempo, observa-se que há uma pequena diferença entre os erros relativos obtidos pelos dois métodos no trecho inicial da análise, em média 0,25 anos. Isso pode se dever as instabilidades iniciais do método.

Tabela 6 - Tempo de processamento para diferentes métodos - Exemplo 2.

Método	Tempo de processamento	Erro relativo final (%)
Método EF-GD	4516,0983305 s	2,3146
Método EFH-GD	4513,4272236 s	1,9969

O tempo de simulação do Método EF-GD foi de 4516,1 segundos, enquanto do Método EFH-GD foi de 4513,4 segundos. De modo que os métodos apresentam praticamente o mesmo esforço computacional.

6.4.

Exemplo 3 - Fluxo Bifásico Bidimensional - problema dos cinco poços em meio homogêneo

Nesse item apresenta-se o problema de cinco poços em um meio homogêneo em 2D, clássico da literatura, de modo a analisar a aplicação dos métodos estudados, bem como a influência da configuração da malha.

O exemplo apresentado nesse item foi estudado por Helmig (1997) é usado como referência e comparação dos resultados obtidos.

Em analogia ao problema de Buckley-Leverett, para o presente exemplo computa-se o deslocamento de óleo (fase não molhante) pela água (fase molhante), sem considerar os efeitos gravitacionais e de pressão capilar.

No início, considera-se que o reservatório está preenchido apenas pela fase não molhante, óleo, ou seja, em $t = 0$ a saturação de óleo é assumida igual a 1, $S_o = 1$, e a saturação de água é nula, $S_w = 0$, em todo o reservatório a condição inicial de pressão é de $2 \cdot 10^5 Pa$.

Três casos distintos foram analisados, denominados de Caso 1, Caso 2 e Caso 3, respectivamente:

- Caso 1: Malha diagonal estruturada com um poço injetor e um poço produtor em vértices opostos;
- Caso 2: Malha diagonal não-estruturada com um poço injetor e um poço produtor em vértices opostos;
- Caso 3: Malha paralela com dois poços injetores e dois poços produtores.

Isso objetiva avaliar a dependência do método EF-GD em relação a orientação e a estruturação da malha .

Em ambos os casos, o reservatório é considerado um meio poroso homogêneo e isotrópico, com porosidade igual a 0,20. Considera-se ainda, o equilíbrio do balanço de massa, onde há reposição volumétrica, neste caso de água, para repor o volume do fluido que está sendo extraído.

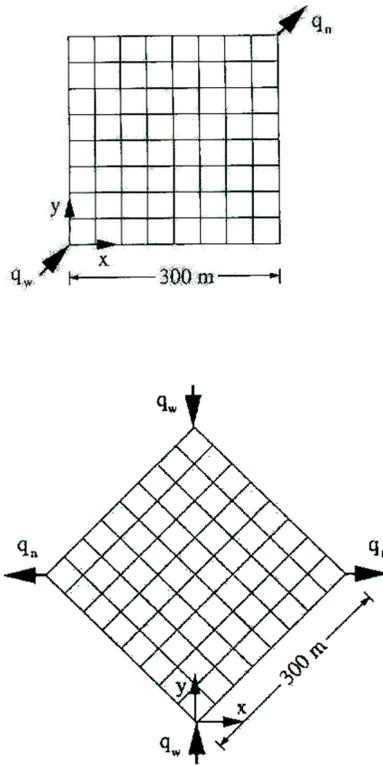


Figura 25 - Representação esquemática das malhas do Casos 1 (superior) e 3 (inferior) – Exemplo 3.

No poço injetor fixou-se $S_w = 0$ e as permeabilidades relativas das fases molhante e não-molhante são dadas respectivamente pelas equações (2.8) e (2.9). Todos os resultados referem-se ao tempo de 200 dias de simulação.

Na Tabela 7 são apresentadas as propriedades da matriz porosa e as relações constitutivas consideradas.

Tabela 7 - Propriedades e relações constitutivas da matriz porosa - Exemplo 3.

Permeabilidade absoluta	10^{-7} m^2
Porosidade	$\phi = 0,2$
Permeabilidade relativa	Equações (2.8) e (2.9)

A Tabela 8 apresenta os parâmetros dos fluidos utilizados, enquanto que Tabela 9 mostra os dados de simulação considerados.

Tabela 8 - Parâmetros dos fluidos - Exemplo 3.

Densidade da água	$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$
Densidade do óleo	$\rho_n = 1000 \text{ kg/m}^3$
Viscosidade dinâmica da água	$\mu_w = 0,001 \text{ kg/(ms)}$
Viscosidade dinâmica do óleo	$\mu_n = 0,001 \text{ kg/(ms)}$

Tabela 9 - Parâmetros de simulação - Exemplo 3.

Discretização do espaço	
Tamanho do passo ($\Delta x = \Delta y$)	$\Delta x = 18,75 \text{ m}$
Comprimento ($16\Delta x$)	$L = 300 \text{ m}$
Discretização do tempo	
Tamanho do passo	$\Delta t = 1 \text{ d}$
Período de tempo ($200\Delta t$)	$T = 200 \text{ d}$

6.4.1. Caso 1

O Caso 1 consiste de um poço produtor e um poço injetor de água. Devido a simetria do problema, o modelo base apresenta apenas um quarto de uma malha de cinco poços, comumente chamada de *Five-spot*. O domínio do problema é um quadrado que contém dois poços verticais posicionados em extremidades opostas. De modo que, o poço injetor situa-se no vértice inferior esquerdo e o poço produtor no vértice superior direito. O fluido injetado no poço injetor (fase molhante) desloca o fluido do reservatório (fase não molhante) em direção ao poço produtor. Nos vértices do quadrado onde não existem poços prescrevem-se pressões nulas e no restante do contorno a condição de fluxo nulo é especificada.

Foram utilizados elementos quadriláteros para discretizar regularmente o domínio do problema.

As condições de contorno desse caso são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados relevantes do Exemplo 2 - Caso 1.

Para o ponto (x, y)	(0 m, 0 m)
Pressão de óleo	$p_n = 2 \cdot 10^5 Pa,$
Taxa de fluxo de água	$q_w = 0,12 kg/s$
Para o ponto (x, y)	(300 m, 300 m)
Saturação de água	$S_w = 0,0$
Taxa de fluxo de óleo	$q_n = -0,12 kg/s$

6.4.2. Caso 2

O Caso 2 consiste do mesmo problema do caso 1, só que construído com uma malha desestruturada, com elementos triangulares. Vale ressaltar que nessa construção a quantidade de elementos triangulares é superior a quantidade de elementos quadrangulares apresentados no Caso 1.

6.4.3. Caso 3

O Caso 3 trata de dois poços injetores de água e dois poços produtores, descartando-se o poço central.

O domínio do problema é um quadrado que contém dois conjuntos de poços verticais de mesmo tipo posicionados em extremidades opostas. De modo que, os poços injetores situam-se no vértice inferior esquerdo e no vértice superior direito, e os poços produtores no vértice inferior direito e no vértice superior esquerdo.

O fluido injetado nos poços injetores (fase molhante) desloca o fluido do reservatório (fase não molhante) em direção aos poços produtores. No restante do contorno do domínio, a condição de fluxo nulo é especificada.

Foram utilizados elementos quadriláteros para discretizar regularmente o domínio do problema.

O Caso 3 foi avaliado somente com relação ao Método EF-GD, de modo a avaliar a influência da orientação da malha no pós-processamento das velocidades.

As condições de contorno desse caso são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados relevantes do Exemplo 2 - Caso 3.

Para o ponto (x, y)	(0 m, 0 m), (300 m, 300 m)
Pressão de óleo	$p_n = 2 \cdot 10^5 Pa,$
Taxa de fluxo de água	$q_w = 0,12 kg/s$
Para o ponto (x, y)	(300 m, 0 m), (0 m, 300 m)
Saturação de água	$S_w = 0,0$
Taxa de fluxo de óleo	$q_n = -0,12 kg/s$

6.4.4. Discussão dos resultados

(a) Caso 1:

Inicialmente, avaliando os resultados obtidos para o Caso 1, para o modelo sem fraturas e homogêneo é esperada uma varredura circular bem comportada, de modo que qualitativamente isso foi alcançado por ambos os métodos, conforme mostra a Figura 26 que utiliza o Método EF-GD, e a Figura 27 que utiliza o Método EFH-GD.

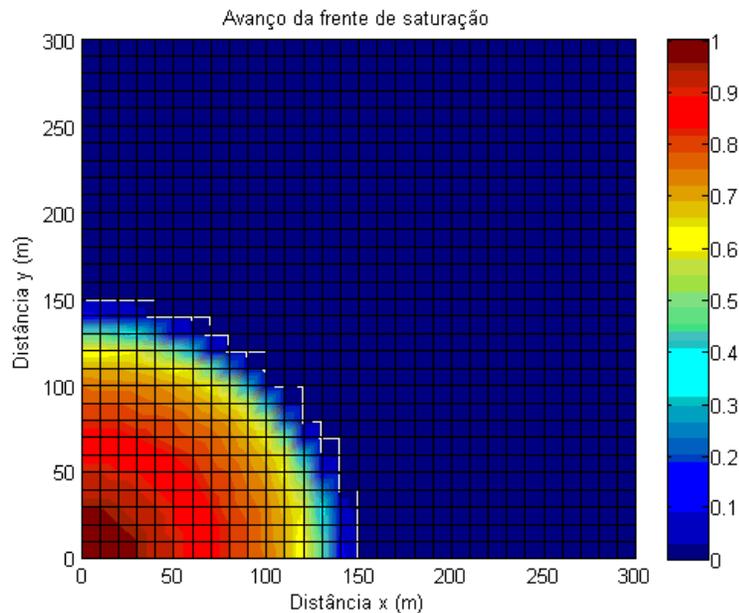


Figura 26 - Varredura calculada pelo Método EF-GD - Caso 1.

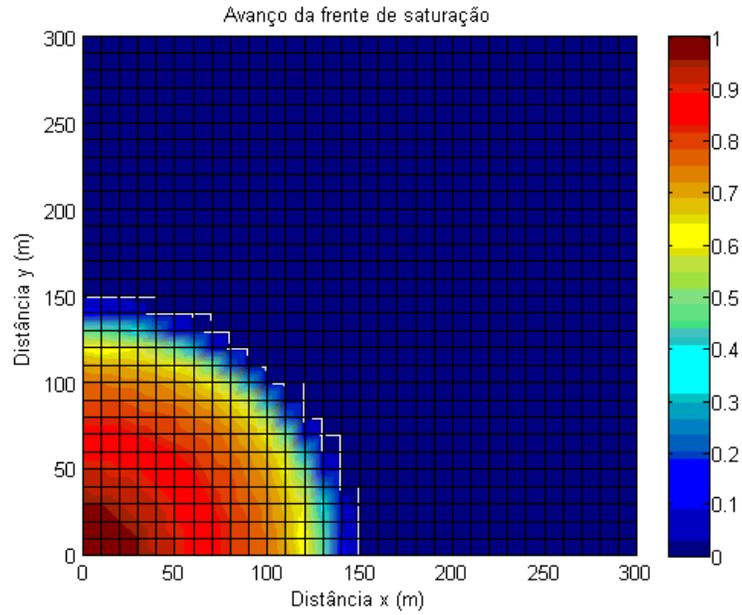


Figura 27 - Varredura calculada pelo Método EFH-GD - Caso 1.

Em comparação com os resultados da literatura, apresentamos os resultados encontrados em Helmig (1997) na Figura 28. Percebe-se que os resultados obtidos em ambos os métodos estão em boa concordância com os resultados da literatura mencionada.

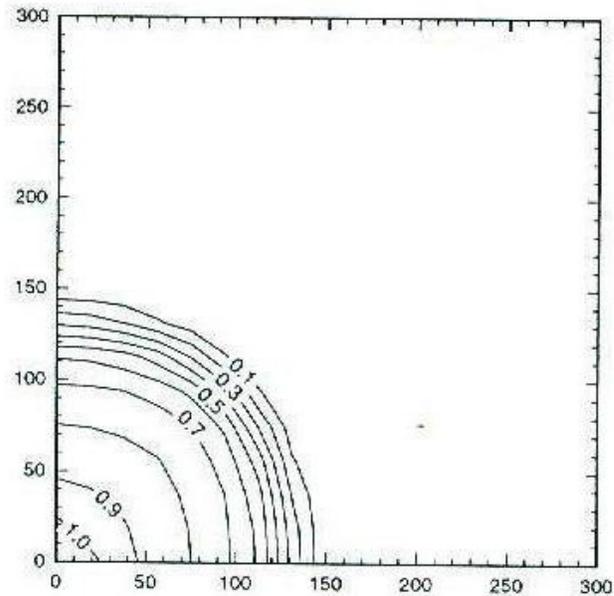


Figura 28 - Varredura calculada em Helmig PG-FE (1997).

Observa-se ainda uma frente de saturação suave, obtidas em ambos os métodos, como pode ser visto na Figura 29 e Figura 30.

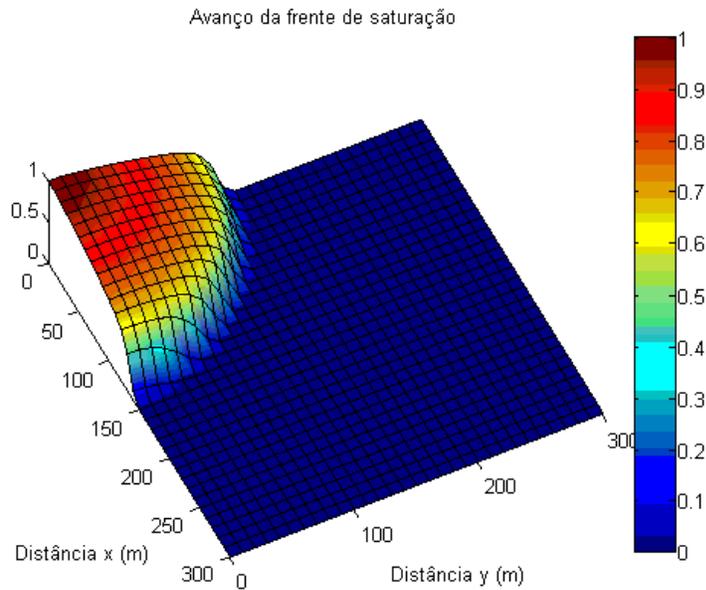


Figura 29 - Avanço da frente de saturação - Método EF-GD - Caso 1.

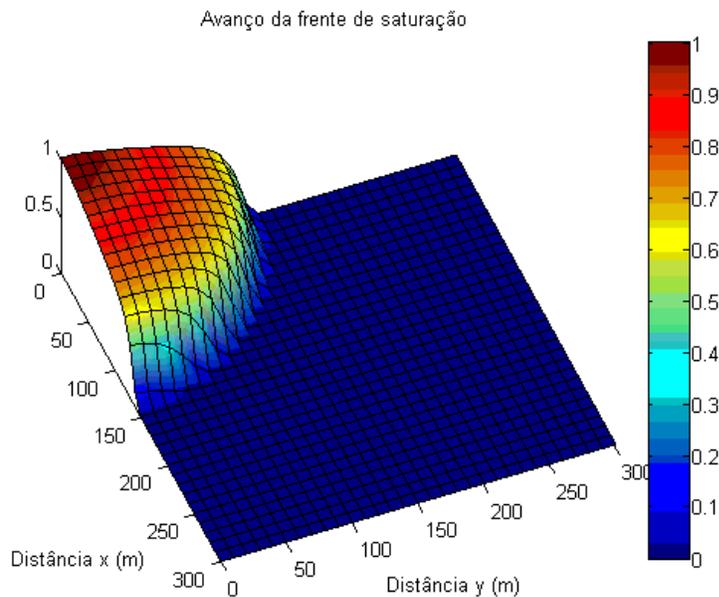


Figura 30 - Avanço da frente de saturação - Método EFH-GD - Caso 1.

Em relação ao equilíbrio de massa, pode-se observar que o Método EF-GD tende a apresentar oscilações de mesma grandeza que o Método EFH-GD, mas

demora mais a se estabilizar. A estabilização do erro relativo do Método EFH-GD ocorre nos tempos iniciais da simulação, no entanto os erros relativos finais encontrados, na ordem de 7%, são bem maiores que os encontrados no Método EF-GD, em torno de 3%. Apesar dessas taxas de erro relativo de massa podemos dizer que os métodos são conservativos.

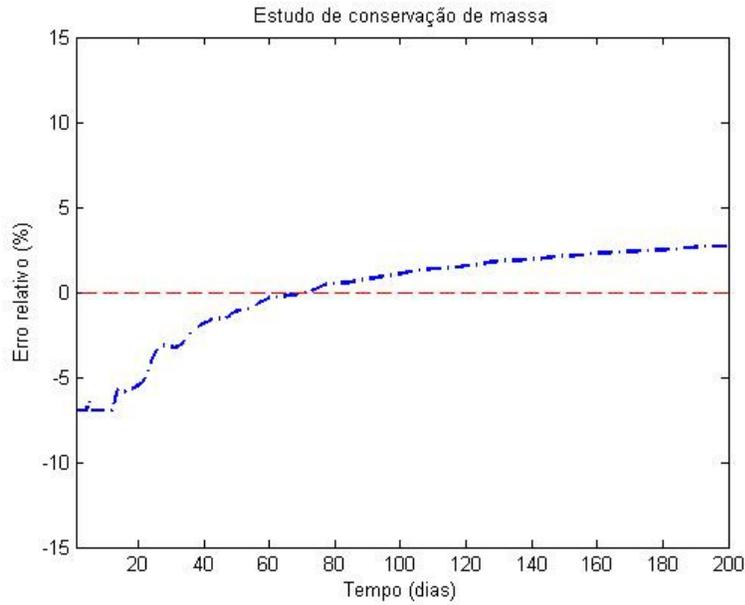


Figura 31 - Balanço de massa - Método EF-GD- Caso 1.

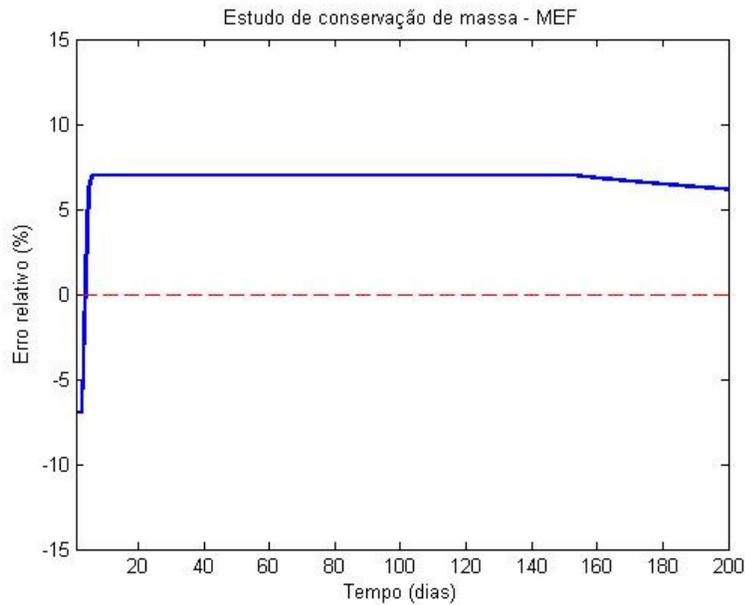


Figura 32 - Balanço de massa - Método EFH-GD- Caso 1.

Tabela 12 - Relação tempo computacional - Exemplo 3.

Caso 1	Tempo de processamento	Erro relativo final (%)
Método EF-GD	118,495155 s	4,3547
Método EFH-GD	118,198040 s	6,1577

(b) Caso 2:

Como se observou no caso anterior que o método EF-GD apresentou bons resultados e que o método EFH-GD é reconhecido como adequado a malhas não-estruturadas, o Caso 2 foi estudado apenas pelo método EF-GD.

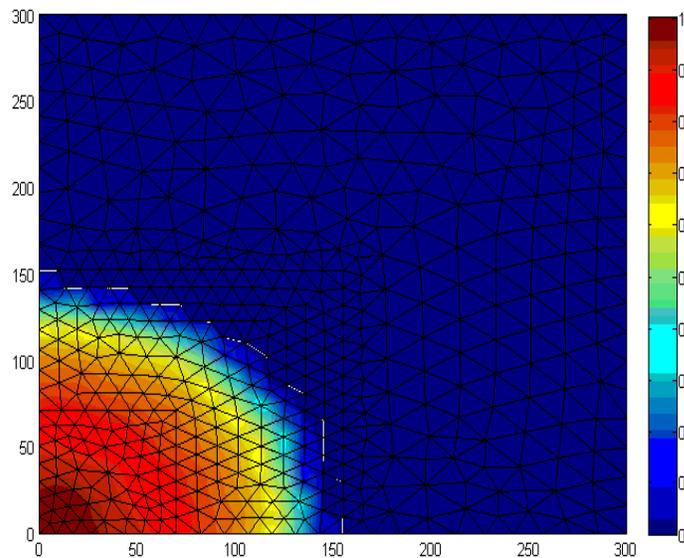


Figura 33 - Varredura calculada pelo Método EF-GD - Caso 2.

O modelo homogêneo com malha desestruturada apresentou, conforme esperado, uma varredura circular comportada, coerente com os resultados da literatura, Figura 28. Observa-se ainda uma frente de saturação suave, como pode ser visto na Figura 34.

Em relação ao equilíbrio de massa, pode-se observar que o Método EF-GD apresentou oscilações nos tempos iniciais da simulação e se estabilizou na sequencia. Os erros relativos finais encontrados estão na ordem de 5%.

Apesar da taxa de erro relativo de massa ser superior ao erro relativo encontrado no mesmo método no Caso 1, pode-se dizer que o Método EF-GD é

conservativo e pouca influencia foi encontrada em relação a não-estruturação da malha.

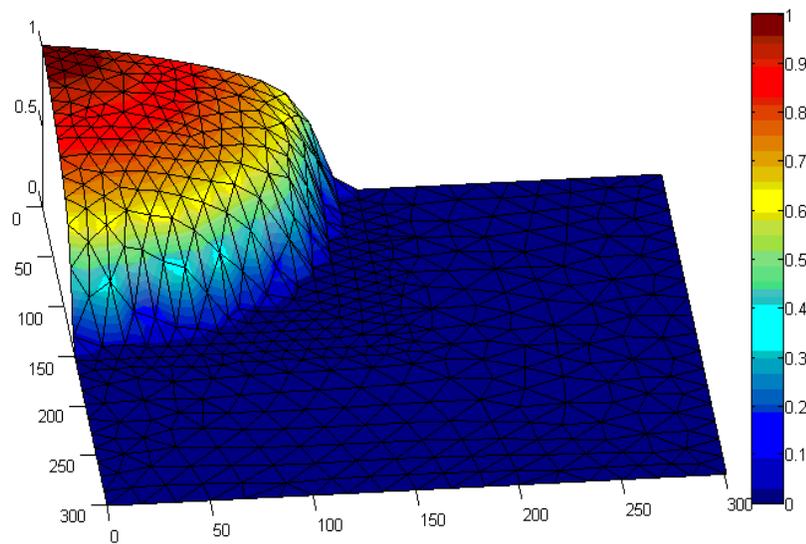


Figura 34 - Avanço da frente de saturação - Método EF-GD - Caso 2.

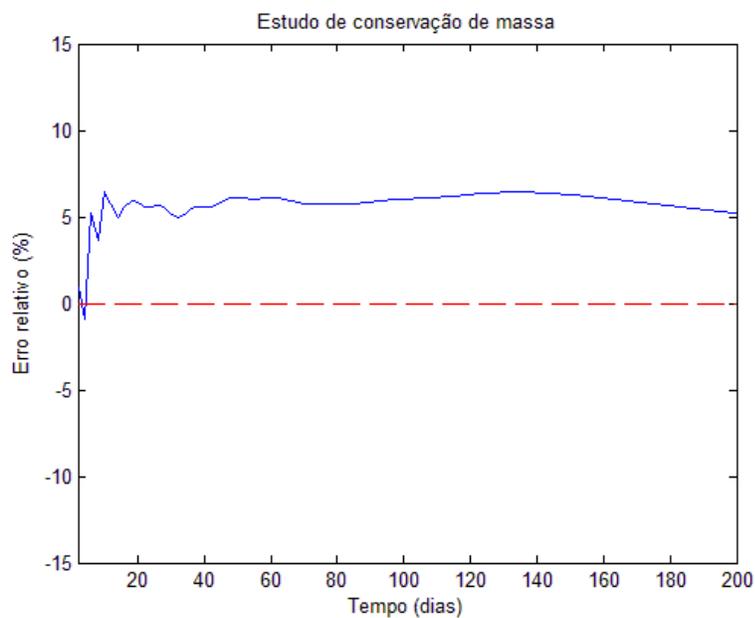


Figura 35 - Balanço de massa - Método EF-GD- Caso 2.

Tabela 13 - Relação tempo computacional - Exemplo 3.

Caso 2	Tempo de processamento	Erro relativo final (%)
Método EF-GD	182,240908	5,1958

(c) Caso 3:

O método EFH-GD é reconhecido na literatura como não influenciado pela orientação da malha. Assim, o Caso 3 foi avaliado somente com relação ao Método EF-GD. Esse caso objetiva a avaliar a influencia da orientação da malha nos resultados.

Foi alcançada varredura circular bem comportada, de modo que qualitativamente o Método EF-GD atende ao esperado, conforme mostra a Figura 36.

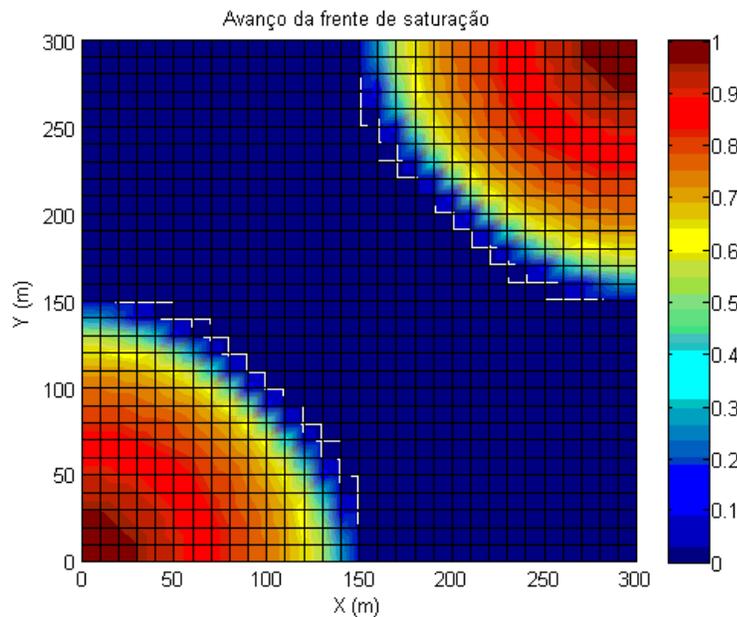


Figura 36 - Varredura calculada pelo Método EF-GD - Caso 2.

Em comparação com resultados da literatura, apresenta-se o resultado encontrado em Helmig (1997) na Figura 37. Percebe-se que o resultado obtido está em concordância com o resultado da literatura mencionada. Observa-se ainda uma frente de saturação suave, como pode ser visto na Figura 38.

O campo de pressões inicial obtido é coerente com o proposto.

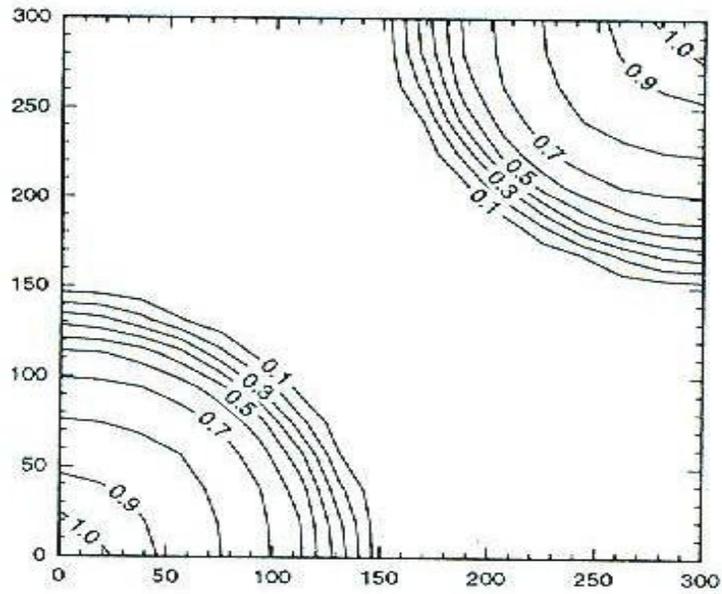


Figura 37 - Varredura calculada em Helmig (1997).

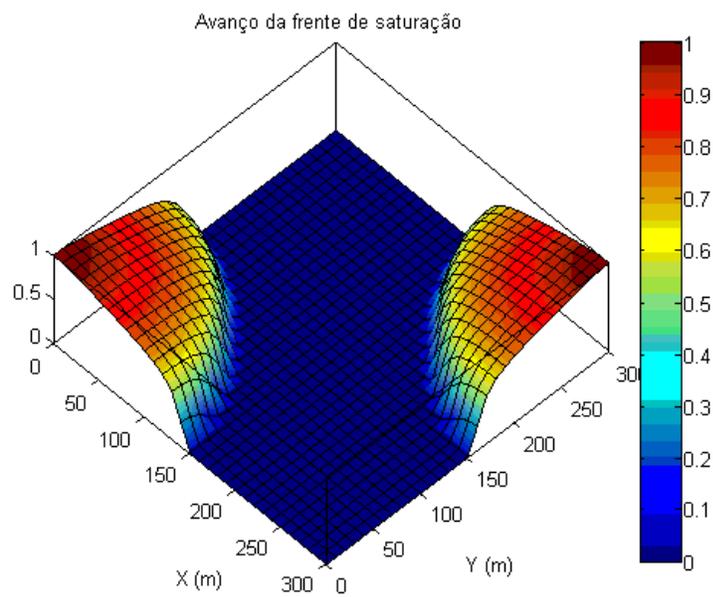


Figura 38 - Avanço da frente de saturação - Método EF-GD - Caso 3.

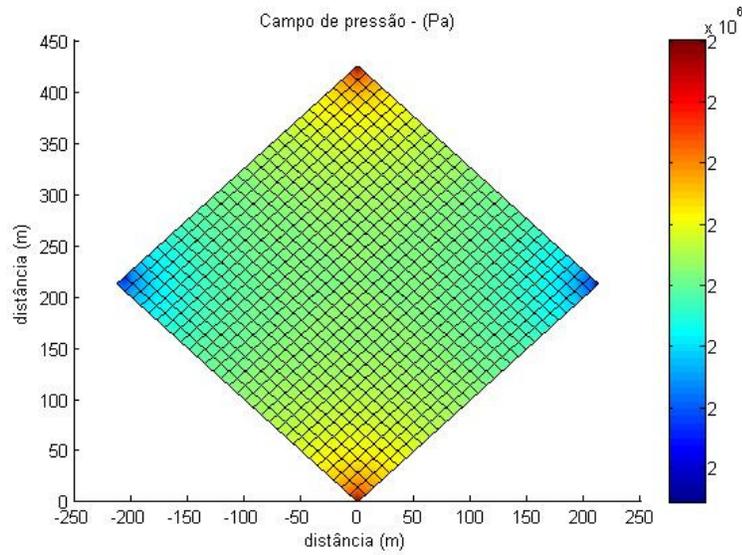


Figura 39 - Campo de pressões inicial - Método EF-GD - Caso 3.

Em relação ao equilíbrio de massa, pode-se observar que o Método EF-GD tende a apresentar oscilações iniciais, no entanto tende a se estabilizar no decorrer do tempo. Os erros relativos finais encontrados estão na ordem de 4%. Apesar dessa taxa de erro pode-se dizer que o método é conservativo nesse exemplo.

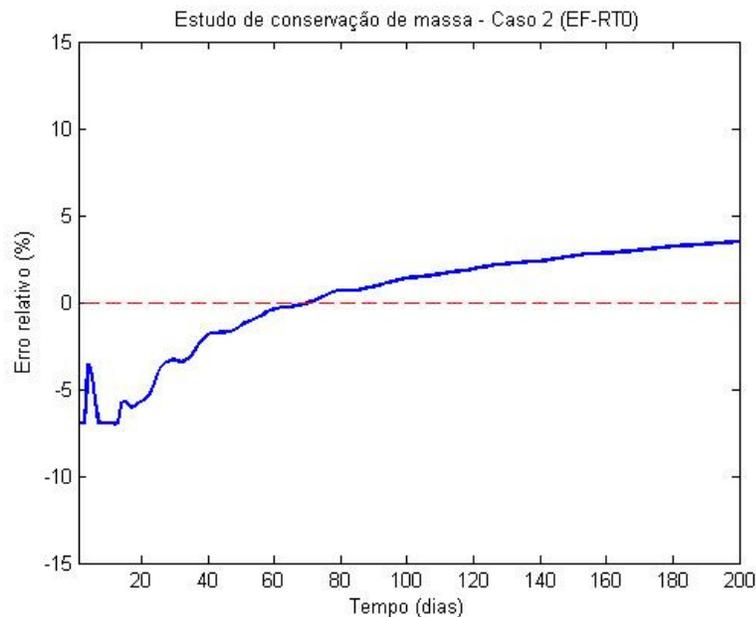


Figura 40 - Balanço de massa - Método EF-GD - Caso 1.

A partir das análises acima, conclui-se que o Método EF-GD independe da orientação da malha e é conservativo.

Tabela 14 - Relação tempo computacional - Exemplo 3.

Caso 2	Tempo de processamento	Erro relativo final (%)
Método EF-GD	205,707465	4,3547

6.5.

Exemplo 4 - Fluxo Bifásico Bidimensional - Meios porosos heterogêneos

Esse exemplo visa estudar a fiabilidade do Método EF-GD em meios porosos heterogêneos. Poucos estudos com ausência de capilaridade e de efeitos gravitacionais, e com o uso de EFH e MEFD estão disponíveis na literatura. De modo que, neste trabalho apresenta-se um exemplo da literatura para deslocamento de gás por outro gás em meios porosos heterogêneos. Para esse estudo considerou-se dois casos distintos, Caso 1 e Caso 2, descritos a seguir.

Vale ressaltar que esse item não visa analisar os efeitos de compressibilidade e mudança de fase que eventualmente podem ocorrer em deslocamentos reais desse tipo. Esse item visa analisar apenas a influencia de um meio heterogêneo na modelagem pelo método EF-GD. Portanto, considerou-se nessa simplificação que os fluidos desse sistema são incompressíveis, possuem razão de viscosidades igual a 1.

6.5.1.

Caso 1

No Caso 1, utilizou-se o modelo proposto em Hoteit e Firoozabadi (2005), e nele considera-se um domínio homogêneo horizontal 2D de área $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$, inicialmente saturado com propano. Metano é injetado em um vértice para deslocar o propano até o vértice oposto, poço produtor. Dados relevantes ao problema são apresentados na Tabela 15. No final da produção, a pressão é mantida constante.

Comparou-se o método EF-GD com o método EFH-GD. Esse último tem resultados apresentados em Hoteit e Firoozabadi (2005), reproduzidos nesse texto.

A malha utilizada nesse caso foi construída estruturada com elementos Q4.

Tabela 15 - Propriedades e relações constitutivas da matriz porosa.

Dimensões do domínio	40 m × 40 m × 1 m
Propriedades da rocha	$\phi = 0,2$, $k = 10\text{md}$ $\rho_w = \rho_{nw}$
Permeabilidades relativas	Linear (Equações (2.8) e (2.9)).
Pressão capilar	Negligenciada
Saturação residual	$S_{rw} = 0$, $S_{rn} = 0,0$
Injeção	0,7PV/dia
Tempo de simulação	160 dias
Pressão	2000000 Pa

6.5.2. Caso 2

No Caso 2 considera-se o mesmo sistema apresentado no Caso 1, no entanto, o meio poroso é considerado muito heterogêneo. A permeabilidade em cada célula é escolhida de forma aleatória.

Esse caso pode ser novamente subdividido em dois casos, Caso 2A e 2B. Basicamente os dois casos diferem pelo tipo de malha utilizada em sua construção. O Caso 2A é construído com uma malha estruturada com elementos quadrilaterais Q4, enquanto que o Caso 2B utiliza uma malha não estruturada cujos elementos são triangulares. A Figura 41 e a Figura 42 apresentam a distribuição de permeabilidades na malha estruturada e na malha não estruturada, respectivamente, Caso 2A e 2B.

O objetivo do estudo desse caso é demonstrar a fiabilidade do método de EF-GD na aproximação do campo de saturações em meios heterogêneos, bem como a influencia da estruturação da malha nos resultados. Para isso compara-se os resultados obtidos com os resultados apresentados em Hoteit e Firoozabadi (2005) utilizando o método EFH-GD, reproduzidos nesse texto, reconhecidos como adequados ao problema estudado.

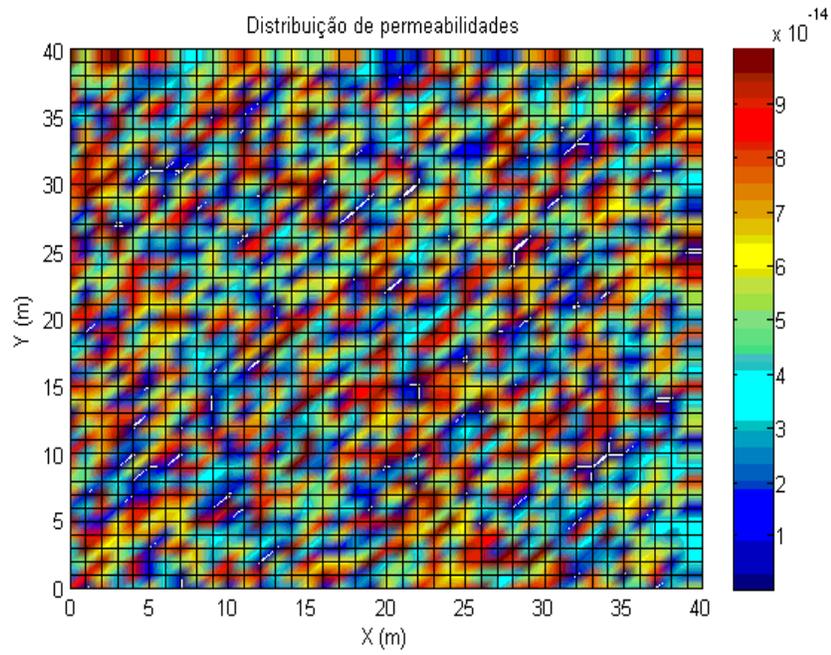


Figura 41 - Distribuição de permeabilidades - Caso 2A.

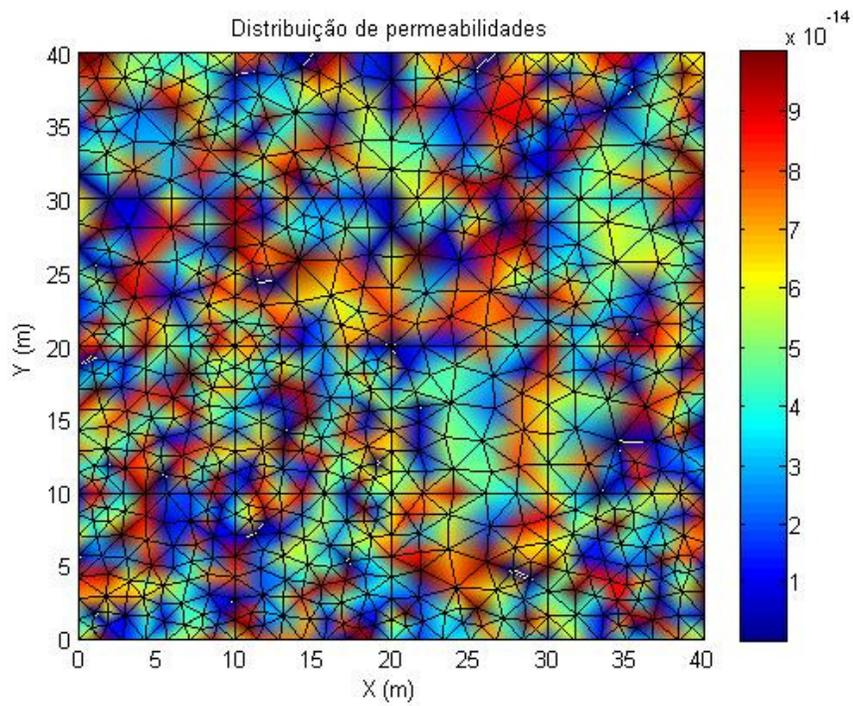


Figura 42 - Distribuição de permeabilidades - Caso 2B.

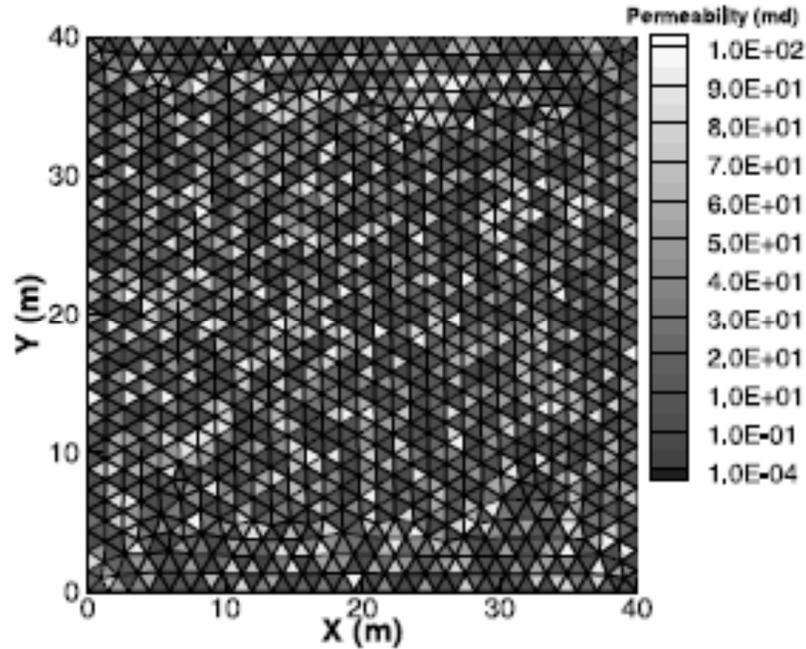


Figura 43 - Distribuição de permeabilidades em malha não-estruturada (Hoteit e Firoozabadi (2005)).

6.5.3. Discussão dos resultados

(a) Caso 1:

O modelo homogêneo com malha estruturada Q4 apresentou uma varredura circular comportada, no entanto difere um pouco da solução encontrada por Hoteit e Firoozabadi (2005) que utiliza o método EFH-GD, apresentado na Figura 45. A frente de saturação é suave, como pode ser visto na Figura 46.

Em relação ao equilíbrio de massa, pode-se observar que o Método EF-GD apresentou maiores erros relativos nos tempos iniciais da simulação e se estabilizou na sequência. Os erros relativos finais encontrados estão na ordem de 0,3%, demonstrando que o método estudado conserva massa.

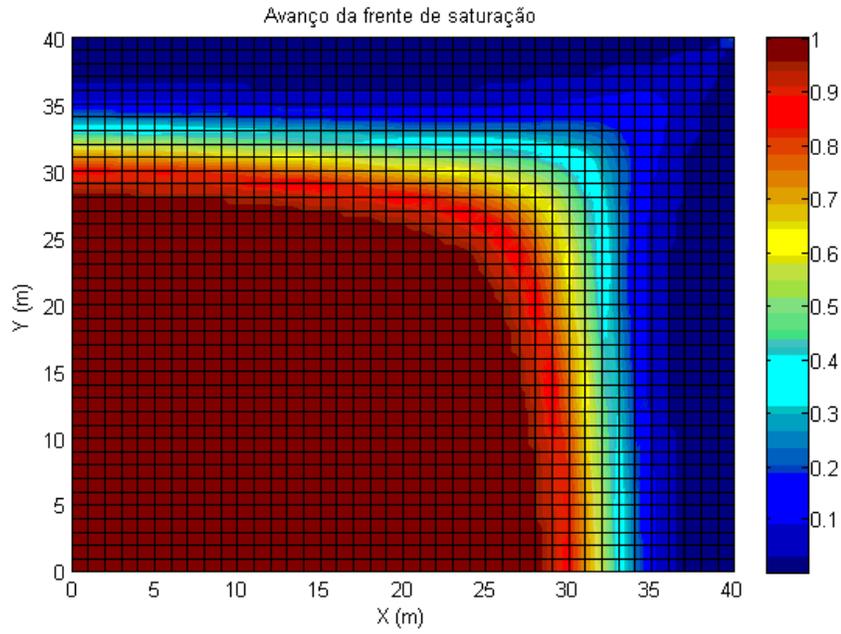


Figura 44 - Varredura calculada pelo Método EF-GD - Caso 1.

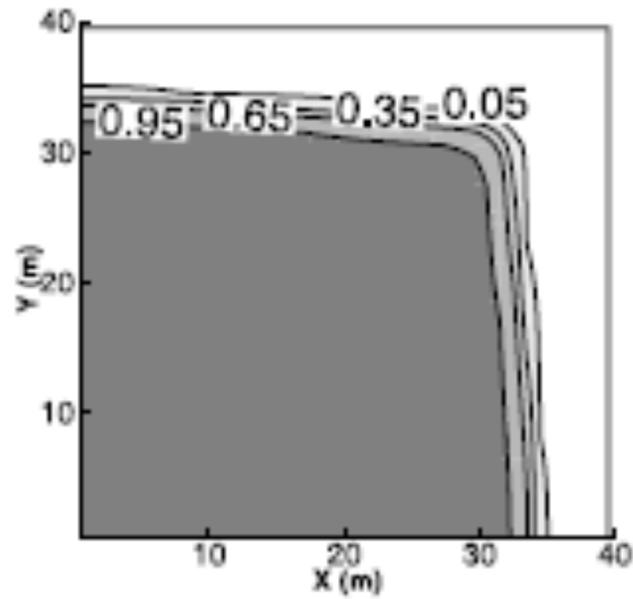


Figura 45 - Varredura calculada em Hoteit e Firoozabadi (2005) pelo método EFH-GD.

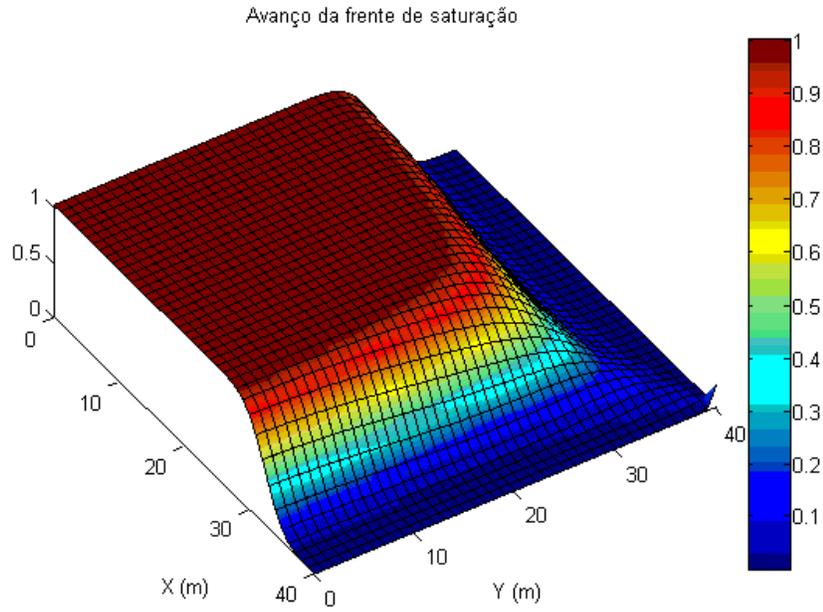


Figura 46 - Avanço da frente de saturação - Método EF-GD - Caso 1.

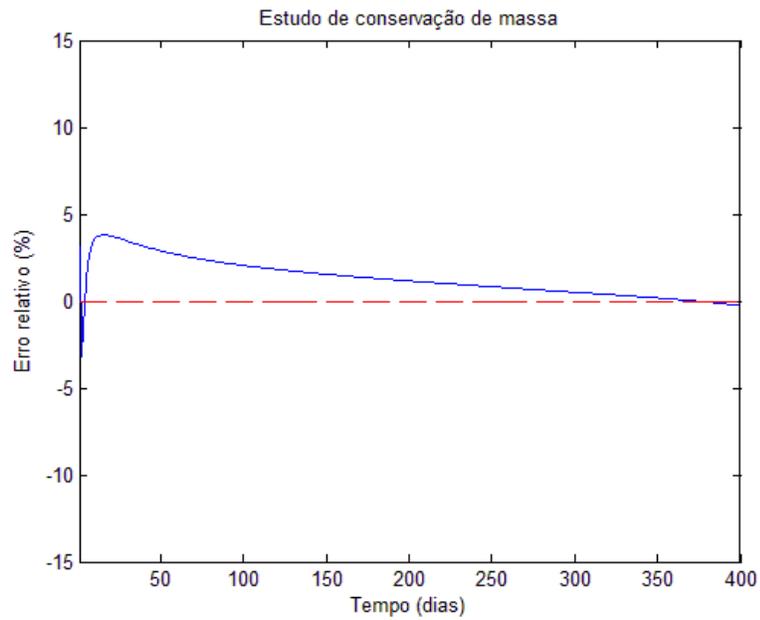


Figura 47 - Balanço de massa - Método EF-GD- Caso 1.

Tabela 16 - Relação tempo computacional - Caso 1.

Caso 2	Tempo de processamento	Erro relativo final (%)
Método EF-GD	294,911192	-0,2735

(b) Caso 2:

Como o Caso 1 apresentou-se conservativo em relação à massa, estudou-se o atual caso para meios heterogêneos com malhas estruturadas e não estruturadas.

Pode-se observar na Figura 48 e na Figura 49, respectivamente, Caso 2A e Caso 2B, que em ambos os tipos de malha a frente de saturação não avança uniformemente em decorrência da heterogeneidade do meio poroso, conforme era esperado. Também se observa que as frentes obtidas são distintas devido às diferentes permeabilidades aleatórias aplicadas à malha. É observado uma maior uniformidade de saturação atrás da frente de saturação na malha estruturada, em decorrência da melhor ordenação dos elementos.

Além disso, quando comparada com o resultado da literatura para o mesmo problema, obtido em malha não estruturada, extraído do trabalho de Hoteit e Firoozabadi (2005), observa-se que o Caso 2B proporciona resultados próximos à referida literatura. De modo que o método EF-GD mostrou-se adequado na representação do avanço da saturação, preferencialmente, quando utilizada malhas não estruturadas.

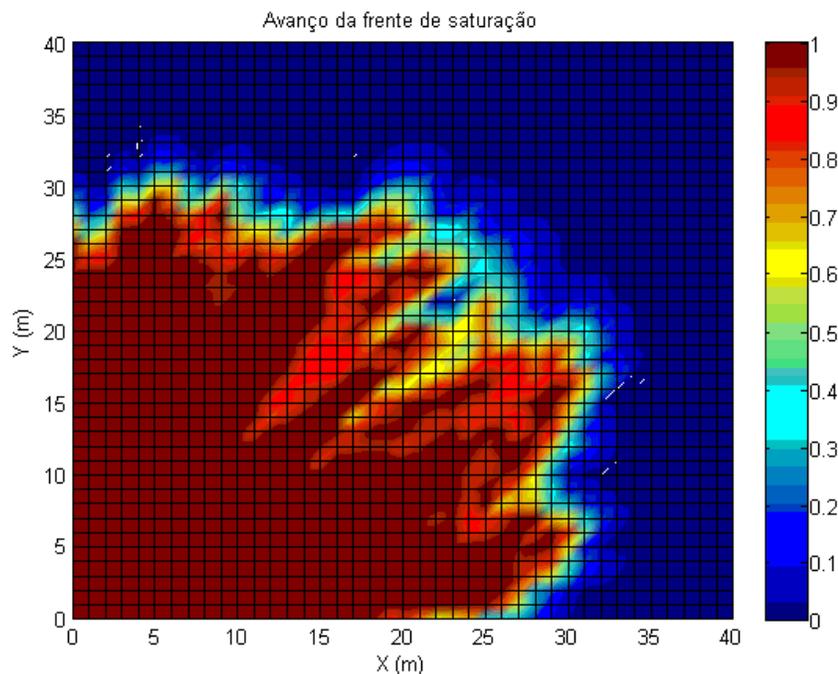


Figura 48 - Varredura calculada pelo Método EF-GD - Caso 2A.

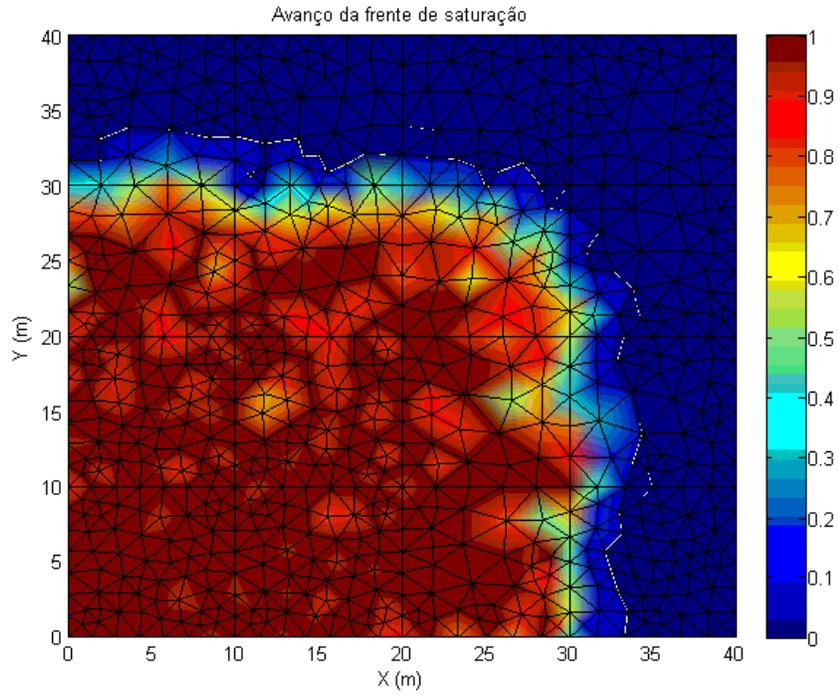


Figura 49 - Varredura calculada pelo Método EF-GD - Caso 2B.

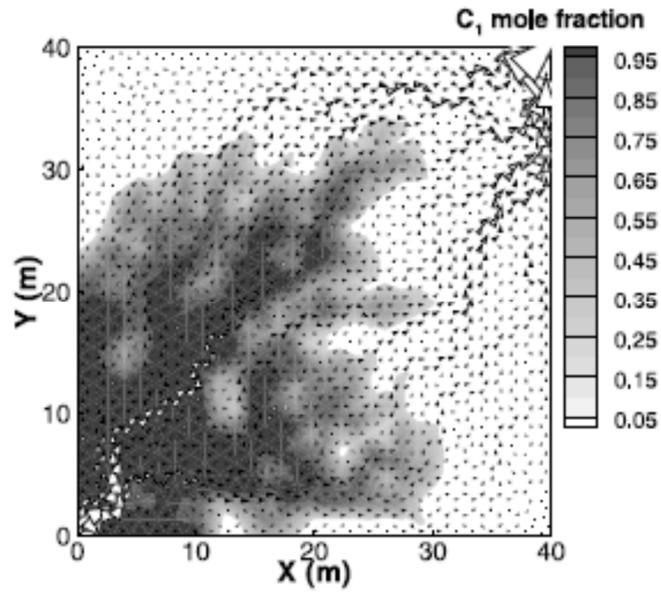


Figura 50 - Fração molar de metano e campo de velocidades (mostrado pelos triângulos) - Método EFH-GD (Hoteit e Firoozabadi (2005)).

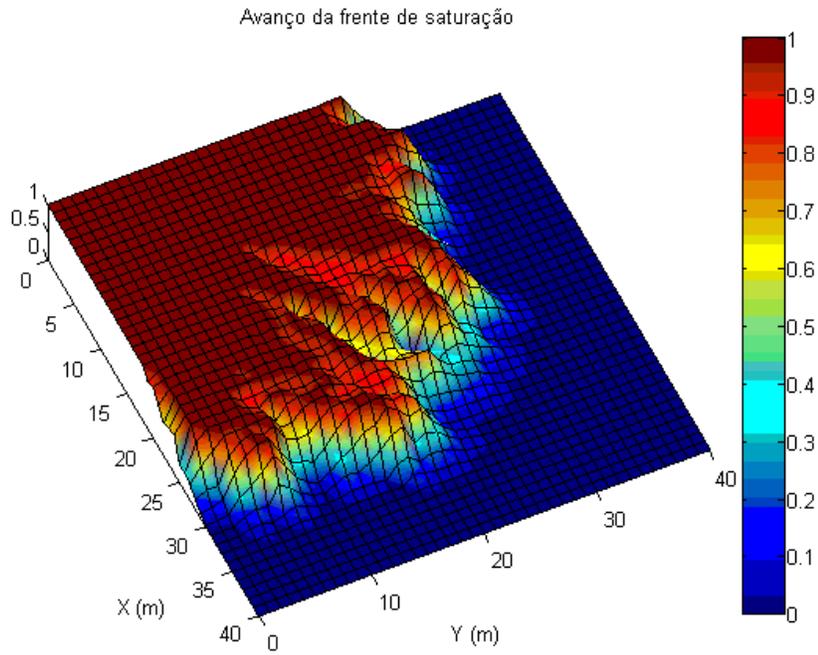


Figura 51 - Avanço da frente de saturação pelo Método EF-GD - Caso 2A.

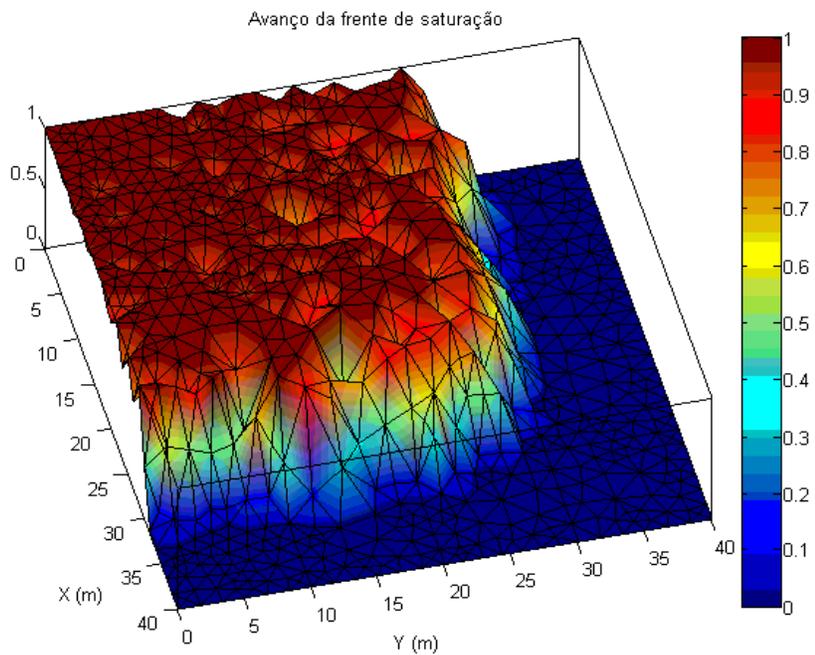


Figura 52 - Avanço da frente de saturação pelo Método EF-GD - Caso 2B.

Com respeito ao estudo de conservação de massa observaram-se maiores erros relativos no início da simulação no Caso 2B do que no caso 2A. No entanto,

ambos os casos alcançaram baixos erros relativos finais, de modo que se pode considerá-lo conservativo.

O Caso 2B apresentou um tempo de processamento da simulação muito lento em relação ao Caso 2A, tornando-o mais dispendioso. Isso pode se dever a quantidade de elementos ser superior no Caso 2B, constituído por elementos triangulares.

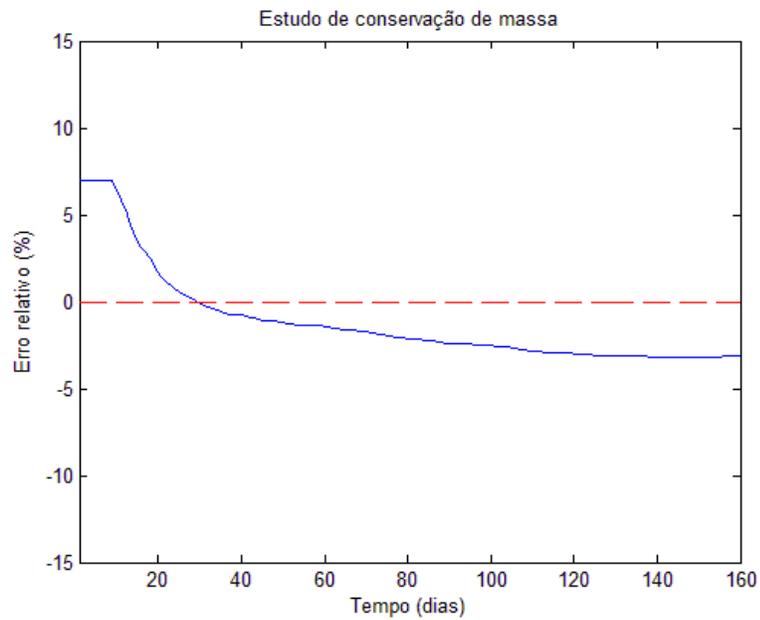


Figura 53 - Balanço de massa - Método EF-GD- Caso 2A.

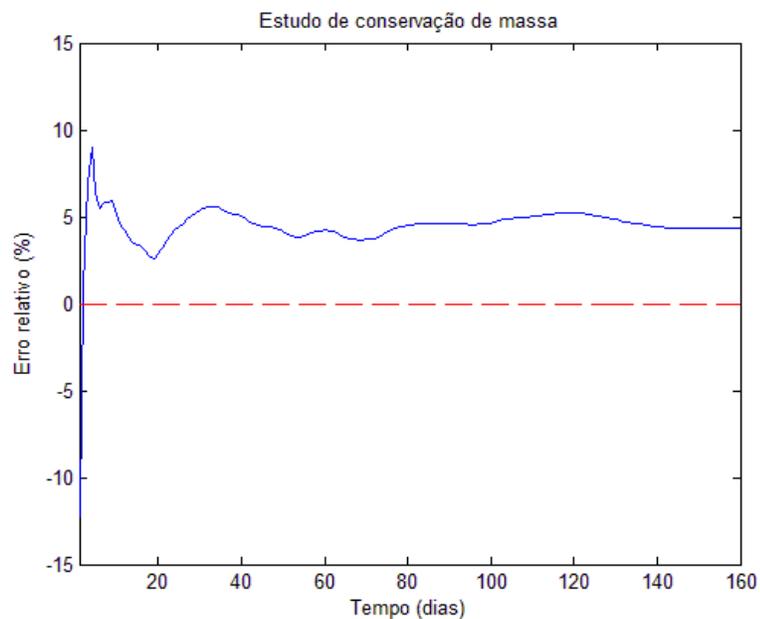


Figura 54 - Balanço de massa - Método EF-GD- Caso 2B.

Tabela 17 - Relação tempo computacional - Caso 2.

Método EF-GD	Tempo de processamento	Erro relativo final (%)
Caso 2A	629,246391	-3.0735
Caso 2B	1470,837662	4,5371

6.6.

Exemplo 5 - Fluxo Bifásico Bidimensional - problema dos cinco poços em meio com fratura

Esse item visa avaliar respostas do método EF-GD considerando meios geológicos complexos, bem como demonstrar a flexibilidade do método EF-GD na modelagem de fraturas e barreiras.

O exemplo estudado nesse item é apresentado em Hoteit e Firoozabadi (2008), utilizando EFH-GD. Assim os resultados da literatura são aqui comparados com o método proposto EF-GD.

Esse exemplo é constituído de dois poços verticais, um produtor e um injetor de água, posicionados em extremidades opostas do modelo, representando um quarto de uma malha cinco-poços, em um meio poroso inicialmente saturado por óleo. Considerou-se pressão capilar nula. Uma fratura e uma barreira são incorporadas ao meio poroso, em que a fratura cruza e atravessa a barreira. A Figura 55 mostra a representação esquemática do problema, que consiste de um domínio 2D horizontal, com dimensões de 100 m \times 100 m, inicialmente saturado com óleo, com uma fratura posicionada na direção diagonal que liga os poços.

O domínio é discretizado em uma malha não estruturada, de modo a permitir acompanhar geometrias complexas. A fratura, bem como a barreira foram representadas de forma discreta. A matriz é representada por elementos triangulares, enquanto que as fraturas são representadas por elementos quadrangulares colapsados. A malha nesse esquema foi gerada pelo programa Mtool - Tecgraf PUC-Rio e importada para processamento em Matlab 2010®.

A interação da rocha com o fluido nela contido é definida por meio das curvas de permeabilidade relativa. Para reservatórios naturalmente fraturados é necessário descrever a interação do fluido com os dois meios presentes, matriz e fratura. Para o sistema de fraturas usualmente é adotada uma relação linear de permeabilidades relativas, e atribuída pressão capilar nula.

Ao poço injetor de água foi aplicada uma vazão de 0,05PV/dia. Assim como nos exemplos anteriores, considera-se o equilíbrio do balanço de massa, onde há reposição volumétrica, neste caso de água, para repor o volume do fluido que está sendo extraído.

As propriedades do fluido e do meio são apresentadas na Tabela 18.

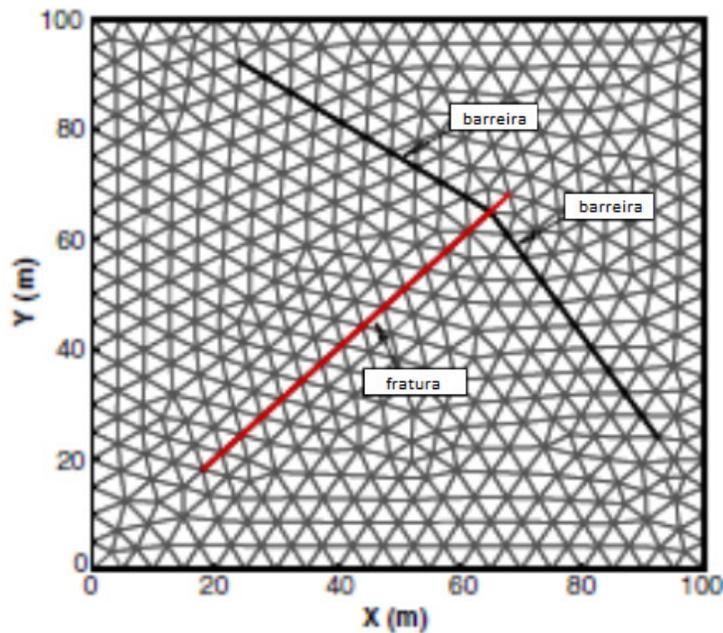


Figura 55 - Representação esquemática (adaptada de Hoteit e Firoozabadi (2008)).

Tabela 18 - Dados relevantes.

Dimensões do domínio	100 m × 100 m × 1 m
Propriedades da matriz	$\phi^m = 0,2$, $k^m = 1$ md
Propriedades da fratura	$\phi^f = 1,0$, $k^f = 10^6$ md, $\epsilon = 1$ mm
Propriedades dos fluidos	$\rho_w = \rho_{nw} = 1000$ kg/m ³ , $\mu_w = \mu_{nw} = 1$ cp
Permeabilidades relativas	Linear (Equações (2.8) e (2.9)).
Pressão capilar	Negligenciada
Saturação residual	$S_{rw} = 0$, $S_{rn} = 0,0$
Injeção	0,05PV/dia

6.6.1. Discussão dos resultados

Um dos grandes problemas encontrados no desenvolvimento de reservatórios fraturados é a mudança na direcionalidade prevista para a água injetada em função da presença de fraturas. Em um modelo sem fraturas em meio homogêneo espera-se uma varredura circular da matriz. No entanto, a presença de uma fratura causa uma mudança na direção de fluxo quando a água injetada alcança o caminho preferencial de alta permeabilidade deixando de varrer a matriz, tal qual visto na Figura 56. Observa-se que a matriz se comporta como uma fonte de fluidos e a presença de uma fratura cria um caminho preferencial de alta permeabilidade para deslocamento do fluido, chamado de "finger", o que é coerente com o esperado. Em comparação com o resultado obtido e validado pelo método EFH-GD, apresentado em Hoteit e Firoozabadi, e reproduzido nesse texto na Figura 57, observa-se que os resultados encontrados com o método EF-GD são coerentes com a literatura mencionada.

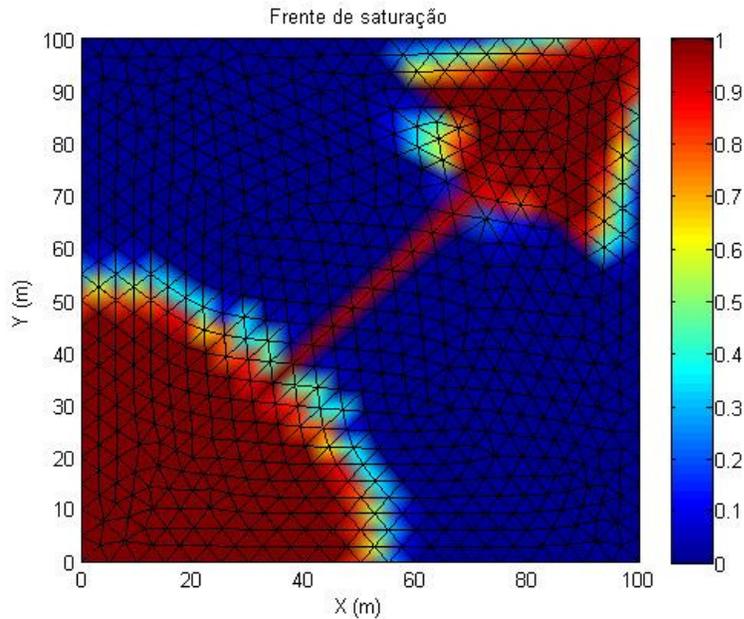


Figura 56 - Perfil de saturação.

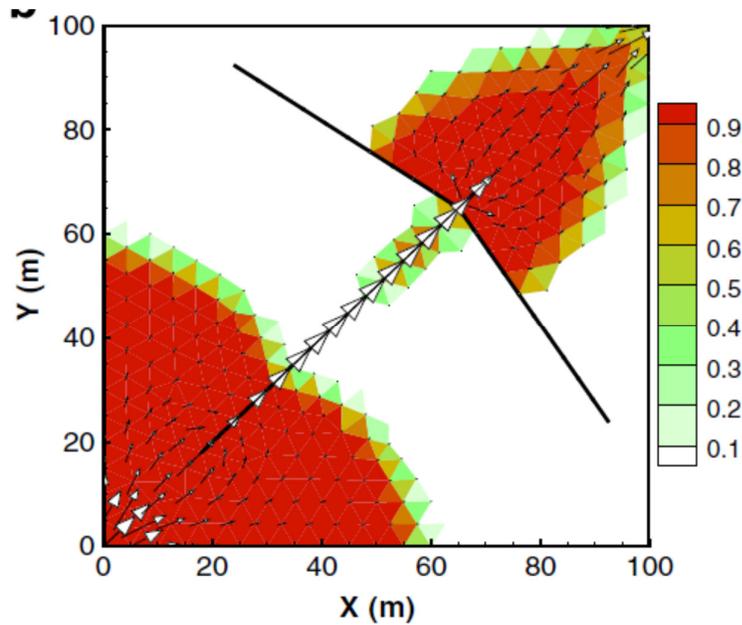


Figura 57 - Perfil de saturação (Hoteit e Firoozabadi (2008)).

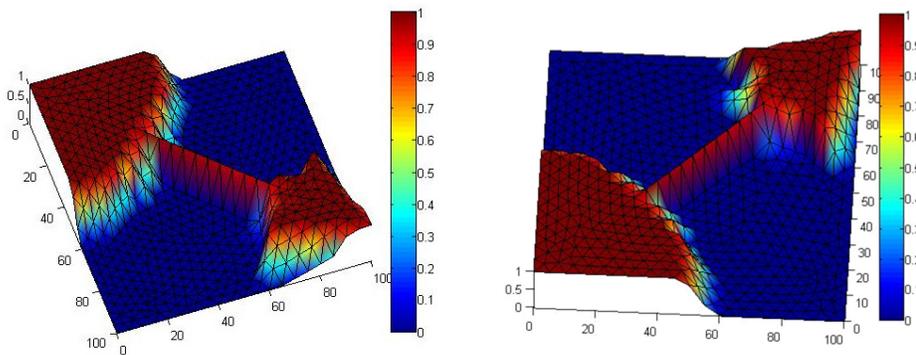


Figura 58 - Diferentes ângulos do avanço da frente de saturação.

A respeito do meio fraturado percebe-se que uma boa comunicação entre matriz e fratura é essencial para a produtividade em longo prazo. Esta comunicação entre os meios é dependente da permeabilidade da matriz e definem a força do mecanismo de recuperação atuante. Se a permeabilidade da matriz for baixa, o fluido injetado tende a passar diretamente pela fratura, não varrendo adequadamente a matriz e, assim, produzindo baixos fatores de recuperação

O erro relativo ao balanço de massa foi de 1,527%, Figura 59, e o processamento durou 2678,5643 segundos.

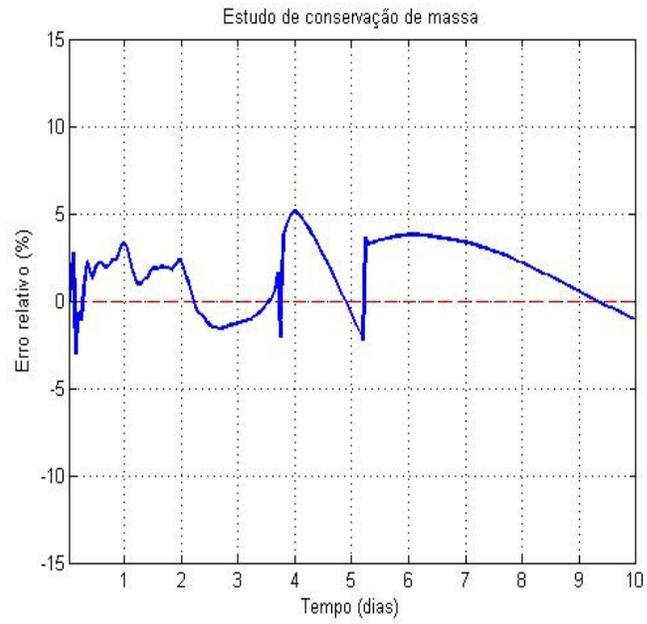


Figura 59 - Balanço de massa - Método EF-GD.

Tabela 19 - Relação tempo computacional .

Método EF-GD	Tempo de processamento	Erro relativo final (%)
Exemplo 5	2678,5643 s	1,527