

5

Resultados e Discussões

As simulações apresentadas neste capítulo refletem o objetivo deste trabalho em avaliar através do uso de simulador numérico, o comportamento da recuperação de óleo em um reservatório de petróleo, utilizando como método de recuperação a injeção de emulsão em várias situações.

A produção de óleo pode ser medida pelo Fator de Recuperação (FR) do reservatório, definido como o quociente entre o volume acumulado de óleo produzido e o volume original de óleo no meio poroso [3].

$$FR = \frac{\text{Volume acumulado de óleo produzido}}{\text{Volume original de óleo no meio poroso}} \quad (5-1)$$

5.1

Comparação entre os Mecanismos

A Figura 5.1 compara para o “Caso Base”, as curvas do fator de recuperação de óleo correspondente à injeção alternada A/E/A e à injeção contínua de água, caso 1. Como pode ser observado no processo de injeção A/E/A há uma mudança no comportamento do fator recuperação após a injeção da emulsão, evidenciando a contribuição desta injeção para o aumento da recuperação de óleo. O mesmo pode ser observado, nas curvas de produção de água (segundo eixo na direita do gráfico) que decresce quando a injeção de emulsão é iniciada, 3% quando utilizado o mecanismo de controle de mobilidade e 7% no mecanismo de deslocamento. O primeiro eixo na direita do gráfico, Fração Molar de Emulsão (linhas com pontilhado maior), corresponde a entrada de emulsão no modelo.

Os resultados obtidos refletem as manipulações realizadas na curva de permeabilidade relativa da água objetivando construir curvas de permeabilidade relativa para a emulsão em dois casos. Em um caso foi incorporado o efeito de controle da mobilidade e no outro o efeito do deslocamento.

A curva de permeabilidade relativa da emulsão visando o controle da mobilidade reduz a permeabilidade relativa da emulsão no meio, quando comparada com a da água. Esse efeito gera uma razão de mobilidades mais favorável, retardando a formação dos canais preferenciais e a irrupção de água (chegada da água nos poços produtores). Conseqüentemente há um aumento na recuperação de óleo quando comparada com a recuperação para a injeção contínua de água.

Ao analisar o resultado encontrado utilizando a injeção de emulsão para o mecanismo de eficiência de deslocamento, observa-se uma recuperação de

óleo maior do que o da emulsão para controle de mobilidade. Este resultado pode ser explicado, pois para este efeito a curva de permeabilidade relativa inclui além da redução da permeabilidade relativa da emulsão no meio uma redução no valor da saturação de óleo residual do reservatório. Desta forma este resultado contempla uma alteração na razão de mobilidades e na eficiência de deslocamento na escala de poros.

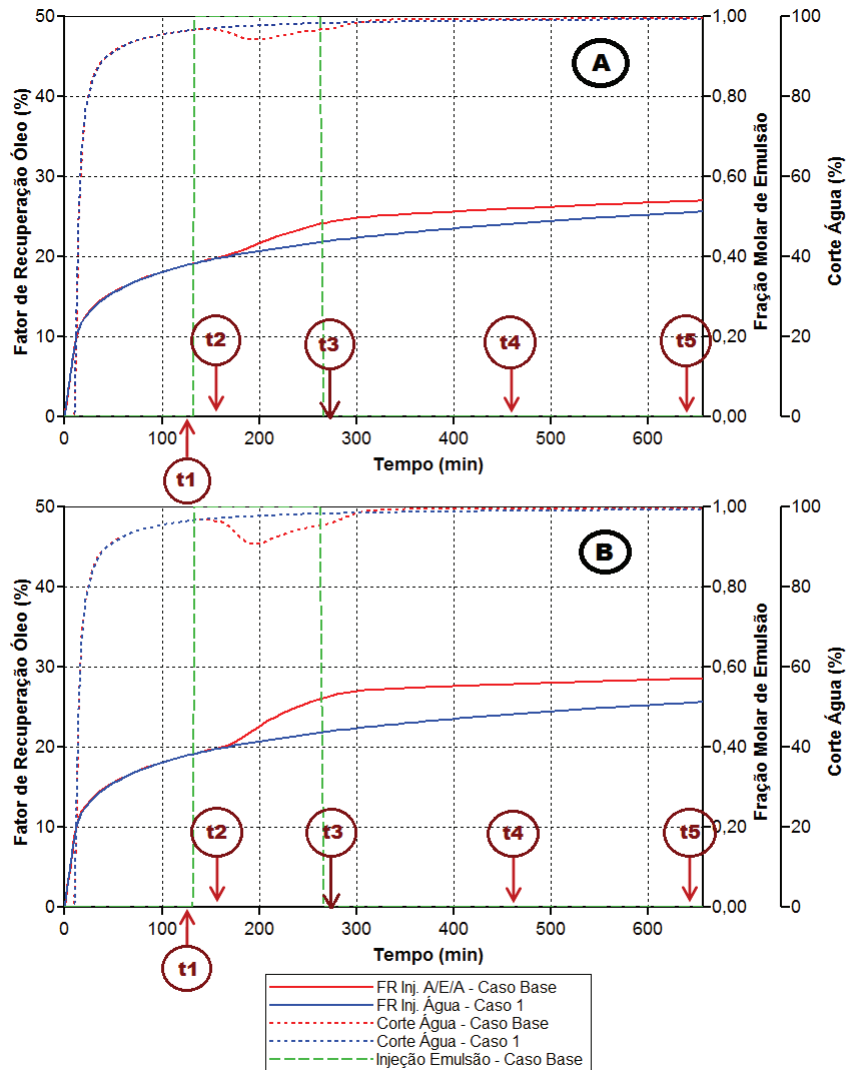


Figura 5.1: Simulação da injeção alternada A/E/A simulados para o Caso Base - A) Mecanismo de controle da mobilidade; B) Mecanismo de eficiência de deslocamento.

A eficiência de um processo de deslocamento de um fluido por outro, em um meio poroso, pode ser verificada a partir da variação de saturação dentro das áreas invadidas pelo fluido injetado.

Os mapas de saturação de água correspondentes aos três casos simulados: injeção de água (caso 1), injeção alternada A/E/A com os mecanismos de controle de mobilidade e de eficiência de deslocamento (“Casos Bases”) são

mostrados na Figura 5.2. Cada uma das figuras mostra o plano YZ do reservatório modelado, na direção YZ e conforme legenda a saturação de água aumenta com a intensidade da escala em azul. Os mapas comparam o perfil de saturação de água nos tempos de t_1 à t_5 indicados na Figura 5.1 A e B durante a injeção de água (A) e da injeção alternada A/E/A com os efeitos de controle de mobilidade (M) e de eficiência de deslocamento (D).

A= Injeção Água - Caso 1

M= Inj. Emulsão/Controle Mobilidade - Caso Base M

D= Inj. Emulsão/Deslocamento - Caso Base D

O primeiro instante (t_1), Figura 5.2(A1/M1/D1), é igual em todos os casos, pois corresponde à saturação da água imediatamente antes da injeção de emulsão.

Ao comparar nos diferentes instantes de tempo os mapas de saturações da injeção de emulsão para o mecanismo de controle de mobilidade (M) com a injeção contínua de água (A) percebe-se uma frente de avanço da água mais eficiente (maior área invadida pelo fluido de injeção) e uniforme (a formação de caminhos preferenciais é menos intensa). Estas características ficam mais evidentes ao final da injeção da emulsão, Figura 5.2(M3). A Figura 5.2(M4) mostra um avanço da injeção para novos caminhos, não percorridos anteriormente pela injeção contínua de água, confirmando que a injeção de emulsão bloqueou a passagem pelas zonas mais permeáveis, desviando o fluxo para outras regiões.

No caso da injeção alternada de água e emulsão para o mecanismo de eficiência de deslocamento (D), Figura 5.2(D1-D5), pode-se observar claramente durante a injeção de emulsão, Figura 5.2(D2), o deslocamento de uma zona de menor saturação de água. O que mostra a movimentação de um banco de óleo que não foi varrido anteriormente pela injeção inicial de água. Esse resultado em conjunto com a estabilidade da frente de avanço da água, Figura 5.2(D3) explicam o conseqüente aumento do fator de recuperação de óleo observado na Figura 5.1 no instante t_3 .

As Figuras 5.2(D3-D5) também mostram um melhor perfil de saturação de água quando comparadas com os perfis da injeção contínua de água, Figura 5.2(A3-A5), evidenciando uma melhora na mobilização de óleo residual que é refletido no fator de recuperação.

Analisando os mapas de saturação dos três casos simulados, mais uma vez, verifica-se um melhor resultado na simulação da injeção de emulsão com o efeito de deslocamento, ratificando os efeitos atribuídos na elaboração da curva de permeabilidade relativa da emulsão para este mecanismo.

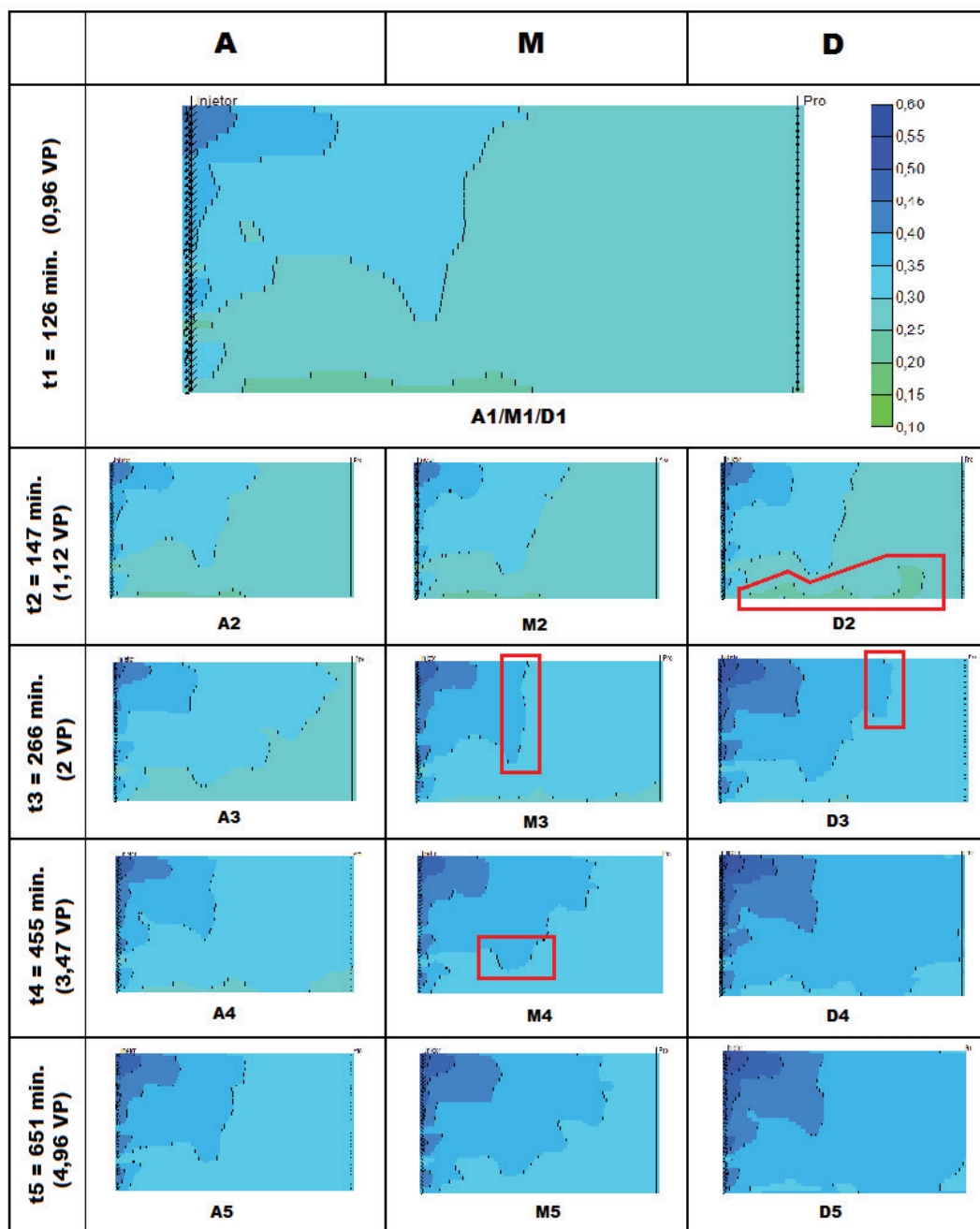


Figura 5.2: Mapas de Saturação de Água (S_w) durante o processo de injeção alternada A/E/A simulados para o “Caso Base”.

5.2

Efeito do volume poroso de emulsão injetada

Com o objetivo de avaliar o fator de recuperação em função da quantidade de emulsão injetada, foram realizadas análises paramétricas do volume poroso de emulsão injetada a partir do “Caso Base”. A Figura 5.3 mostra as simulações para os dois mecanismos estudados (controle de mobilidade e eficiência de deslocamento), onde se observa um aumento no fator de recuperação de óleo

com o incremento do volume poroso de emulsão injetada, sendo este maior para o mecanismo de eficiência de deslocamento.

A alteração no volume de injeção significa a utilização dos efeitos considerados (redução da permeabilidade relativa da emulsão no meio e redução no valor da saturação de óleo residual) nas curvas de permeabilidade relativa da emulsão por um menor ou maior período de tempo. Desta forma quanto maior for o volume de emulsão injetada maior será o fator de recuperação.

Os casos simulados mostram um fator de recuperação de óleo para o mecanismo de controle de mobilidade de 27,6%, 27,0% e 26,3% para a injeção de emulsão de $1,5 V_p$, $1 V_p$ e $0,5 V_p$, respectivamente, enquanto que para o mecanismo de eficiência de deslocamento os valores encontrados são de 29,7%, 28,6% e 27,0%, comparados com 25,6% obtido na injeção contínua de água. O aumento observado no fator de recuperação, em ambos os mecanismos, não é proporcional ao aumento do volume poroso de emulsão injetada.

As Figuras 5.4 e 5.5 correspondem aos mapas de saturação (planos do reservatório modelado, direção YZ) das simulações estudadas nesta seção, nos seguintes instantes de tempo: antes da injeção de emulsão, no meio da injeção de emulsão, ao final da injeção de emulsão e ao final da injeção de água.

Os mapas comparam o perfil de saturação de água em cada um dos casos ratificando os resultados observados na Figura 5.3.

5.3

Efeito do tempo de início de injeção de emulsão

Com o intuito de avaliar o efeito do tempo escolhido para o início da injeção de $1 V_p$ de emulsão no fator de recuperação, foram realizadas análises paramétricas a partir do Caso Base, comparando a injeção no tempo correspondente a injeção de $1 V_p$ (“Caso Base”), corte de água de 99% ($3,740 V_p$) e antes do *breakthrough* ($0,053 V_p$). Nestas análises todos os parâmetros foram mantidos fixos com exceção do início da injeção de emulsão. Os resultados são apresentados na Figura 5.6.

Nas referidas figuras, o caso ilustrado pela curva rosa corresponde à injeção de emulsão quando a produção de água atingiu 99% (caso 4b) e o caso ilustrado pela curva verde corresponde à injeção de emulsão antes da chegada da água ao poço produtor (caso 4a).

Para os dois mecanismos estudados, controle de mobilidade e eficiência de deslocamento, nota-se que ao final da injeção de cinco volumes porosos, o fator de recuperação é muito similar nos três casos, mas observa-se que quanto mais cedo se inicia a injeção de emulsão, antecipa-se a produção de óleo. Este fato decorre do efeito de uma varredura mais eficiente (melhor razão de

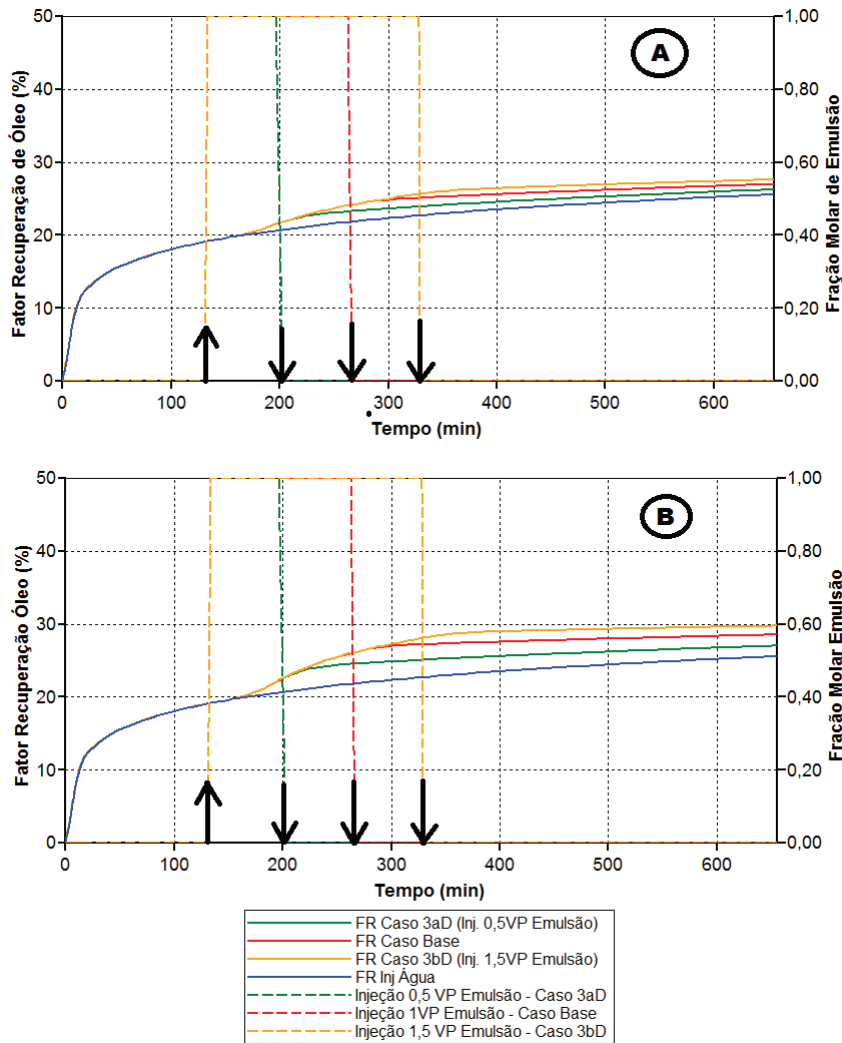


Figura 5.3: Efeito do volume poroso de emulsão injetada no fator de recuperação de óleo durante o processo de injeção alternada A/E/A - A) Mecanismo de controle da mobilidade; B) Mecanismo de eficiência de deslocamento.

mobilidades e eficiência de deslocamento do projeto de injeção) realizada pelo fluido deslocante. Mais uma vez observa-se um melhor resultado no mecanismo de eficiência de deslocamento do que no mecanismo de controle de mobilidade.

5.4

Efeito dos parâmetros das curvas de permeabilidade relativa da emulsão injetada

A seguir serão apresentados os resultados encontrados para a variação da intensidade dos mecanismos de controle de mobilidade e de eficiência de deslocamento.

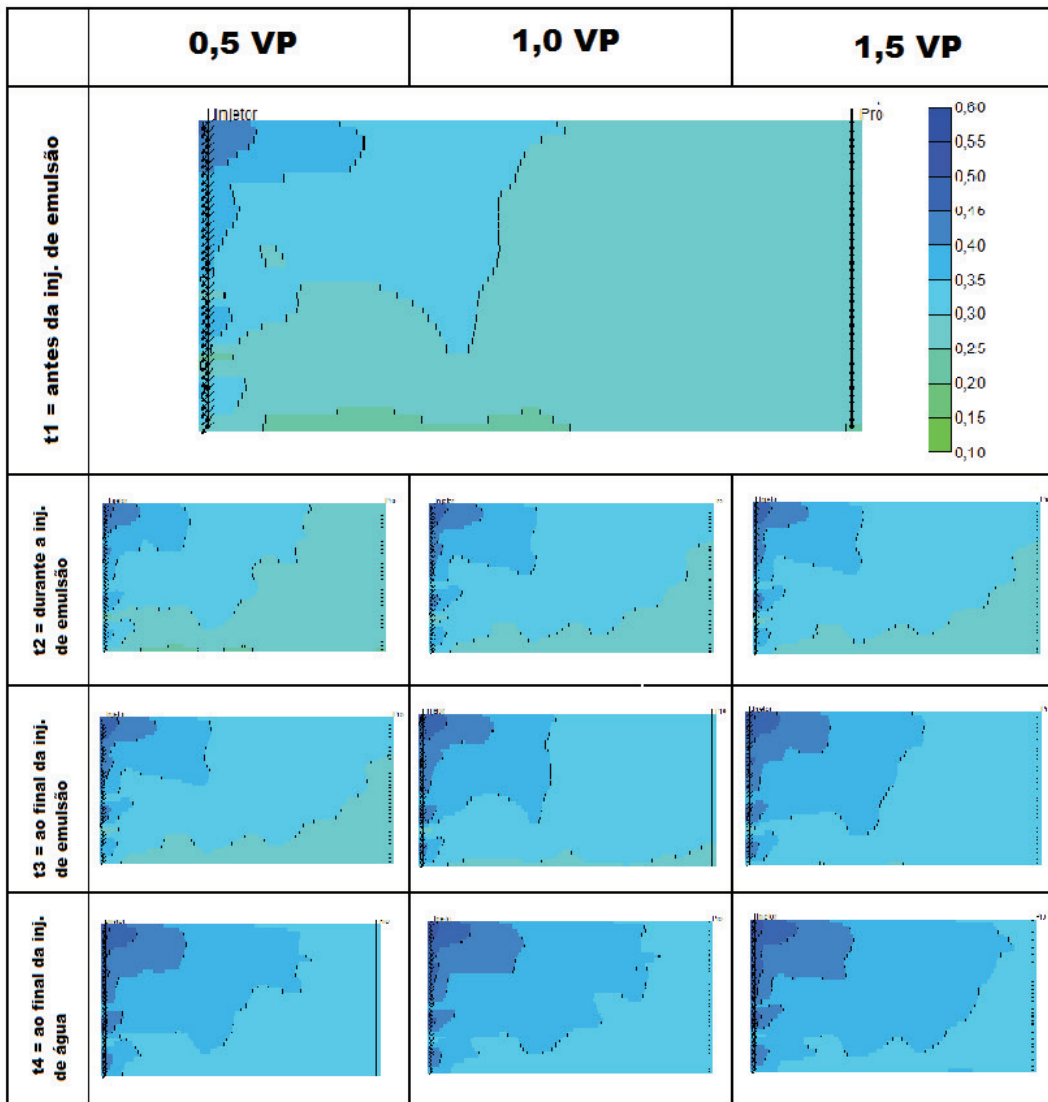


Figura 5.4: Mapas de Saturação de Água (S_w) durante o processo de injeção alternada A/E/A simulados para os casos 3 - Mecanismo de Controle de Mobilidade.

5.4.1 Mecanismo de Controle da Mobilidade

A Figura 5.7 mostra uma análise comparativa do fator de recuperação para os diferentes fatores de bloqueio estudados (casos 5a, 5b e 5c). A alteração dos fatores de bloqueio (f_b) resulta na alteração dos valores de permeabilidade relativa da água no intuito de simular diferentes efeitos da emulsão no controle da mobilidade, o que pode ser interpretado como a avaliação da injeção de emulsões com diferentes características (tamanho de gota, concentração da fase dispersa, viscosidade dos fluidos, etc).

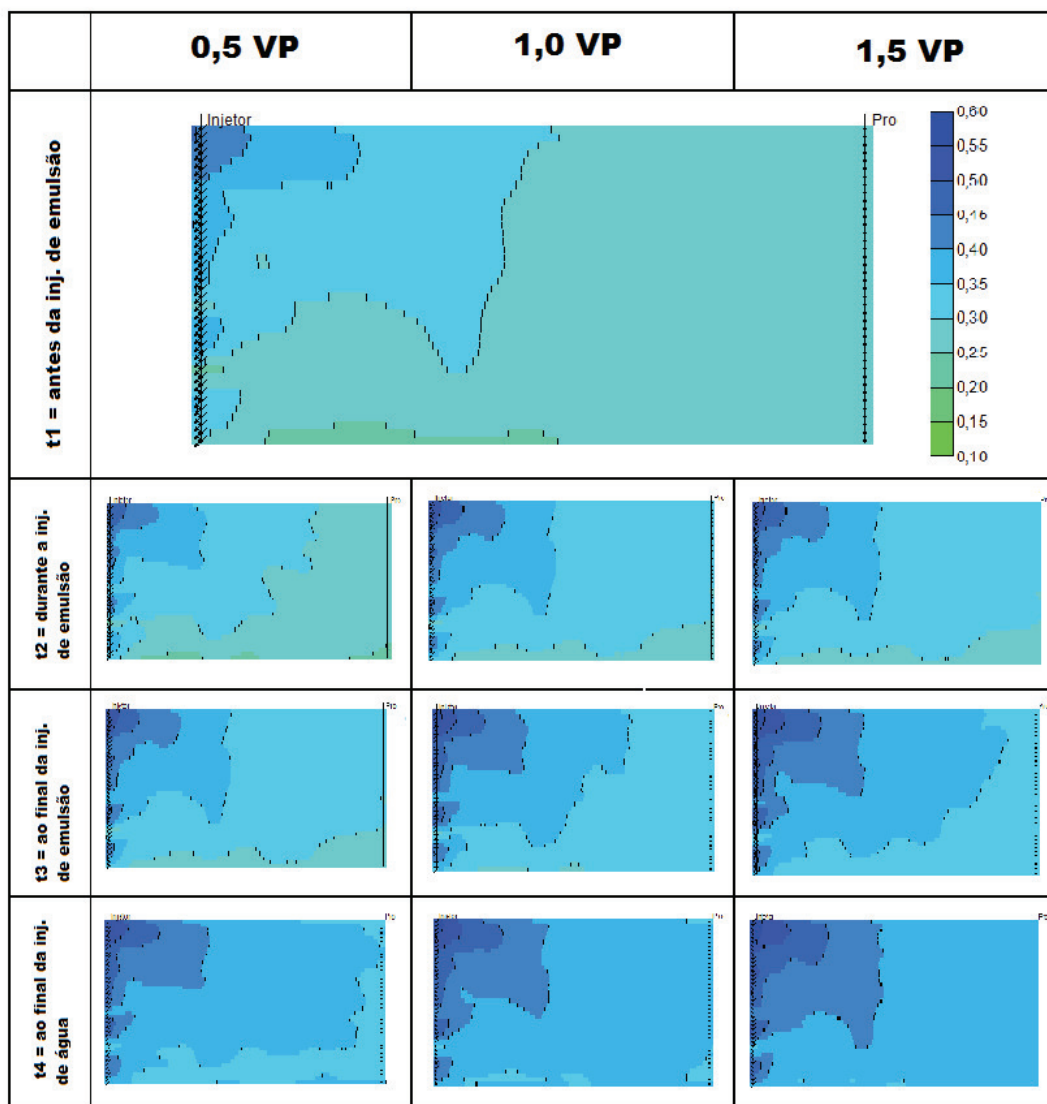


Figura 5.5: Mapas de Saturação de Água (S_w) durante o processo de injeção alternada A/E/A simulados para os casos 3 - Mecanismo de Eficiência de Deslocamento.

Os resultados mostram o aumento do fator de recuperação com a diminuição do fator de bloqueio. As emulsões simuladas com os fatores de bloqueio de $f_b=0,6$, $f_b=0,3$, $f_b=0,2$ e $f_b=0,1$ produzem um fator de recuperação final de óleo de 26,1%, 27,0%, 28,0% e 29,8%, respectivamente, comparados com 25,6% obtido com a injeção contínua de água.

A redução do fator de bloqueio é consequência da diminuição da permeabilidade relativa da fase aquosa durante a injeção de emulsão. Desta forma quanto menor for o fator de bloqueio, menor será a mobilidade da água no reservatório gerando uma razão de mobilidades água-óleo mais favorável.

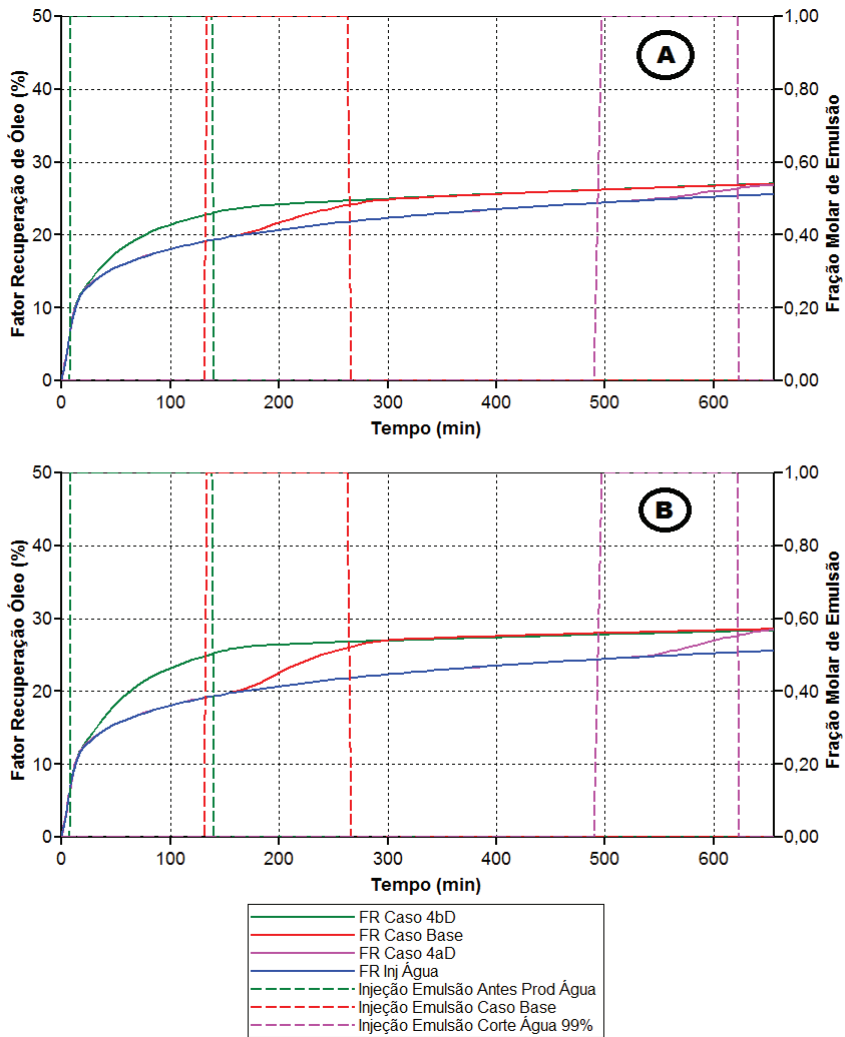


Figura 5.6: Efeito do tempo de início da injeção de emulsão no fator de recuperação de óleo durante o processo de injeção alternada A/E/A - A) Mecanismo de controle da mobilidade; B) Mecanismo de eficiência de deslocamento.

5.4.2 Mecanismo de Eficiência de Deslocamento

Os resultados do fator de recuperação de óleo obtidos para as simulações realizadas utilizando as curvas de permeabilidade relativa da emulsão com saturações de óleo residual de 20% (caso 2); 25% (caso 5d) e 35% (caso 5e) são apresentadas na Figura 5.8.

Como era de se esperar quanto maior é o deslocamento da curva de permeabilidade relativa da emulsão para a esquerda (maior saturação de óleo residual) menor é a produção de óleo.

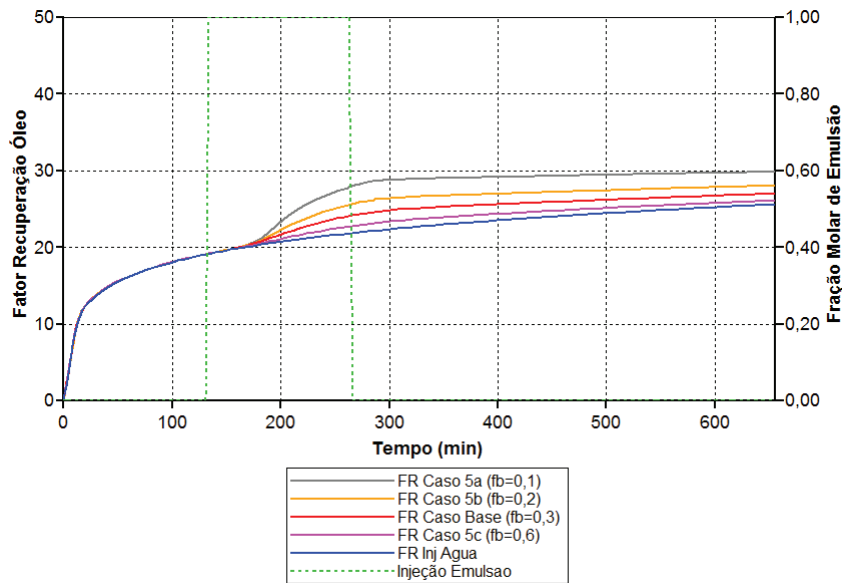


Figura 5.7: Efeito do fator de bloqueio da emulsão injetada no fator de recuperação de óleo durante o processo de injeção alternada A/E/A.

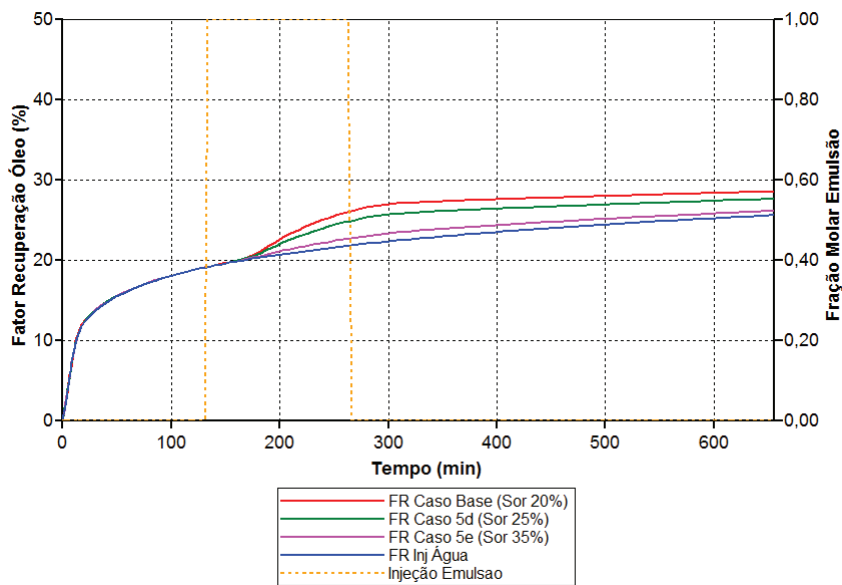


Figura 5.8: Efeito da mudança da Sor no fator de recuperação de óleo durante o processo de injeção alternada A/E/A.

5.4.3 Efeito da Heterogeneidade do Meio Poroso

A Figura 5.9 apresenta o resultado dos fatores de recuperação para os casos simulados (Casos 6), onde se mantiveram todos os parâmetros do “Caso Base”, modificando apenas a permeabilidade absoluta do reservatório segundo a tabela 4.1.

Pode-se observar, durante a injeção inicial de água, uma maior recu-

peração de óleo para o reservatório homogêneo. Isto pode ser devido ao fato que no reservatório com permeabilidade absoluta homogênea os canais preferenciais formados são consequência somente da instabilidade relacionada com a alta razão de mobilidade entre os fluidos deslocante e deslocado.

O reservatório mais homogêneo reduz a formação dos canais preferenciais de fluxo criados pela diferença de mobilidade entre a injeção de água e o óleo, fazendo com que a varredura do reservatório seja feita de forma mais uniforme.

Observa-se que o alto grau de heterogeneidade e sua distribuição no meio poroso influencia a eficiência do processo de injeção de emulsão e por tanto o fator de recuperação.

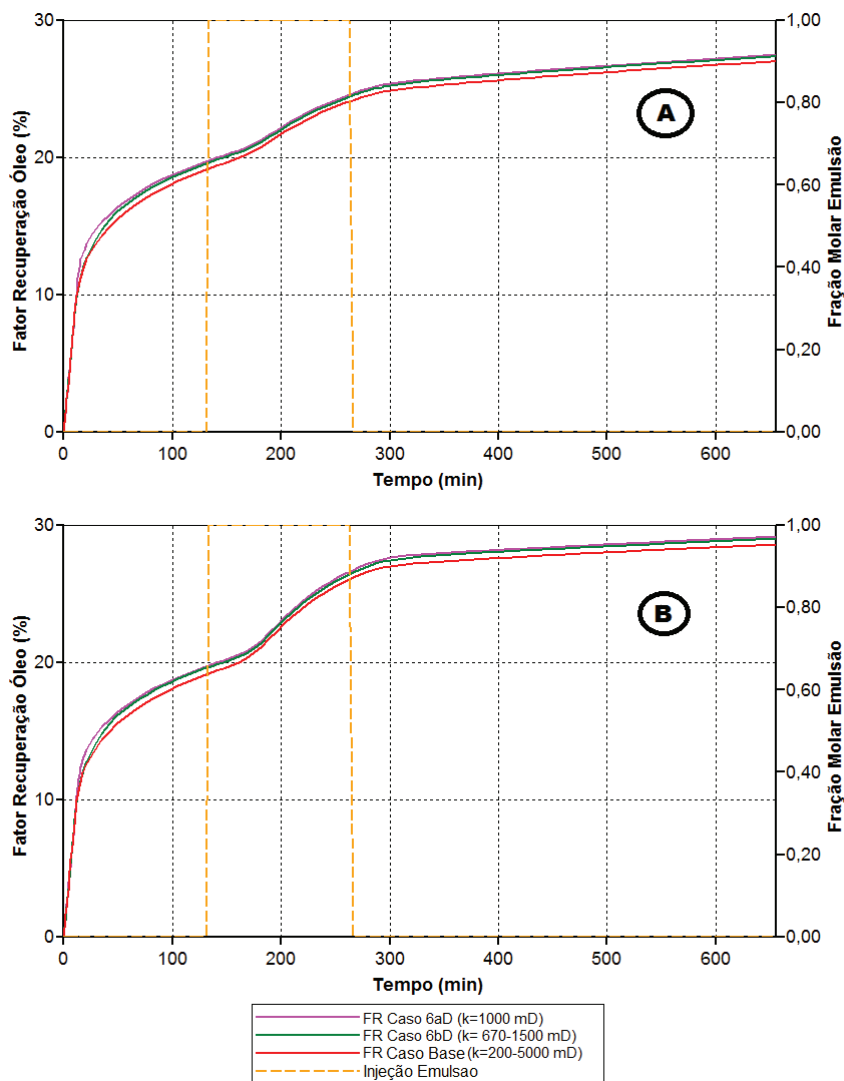


Figura 5.9: Efeito da heterogeneidade do reservatório no fator de recuperação durante o processo de injeção alternada A/E/A - A) Mecanismo de controle da mobilidade; B) Mecanismo de eficiência de deslocamento.