

5 Resultados e Discussões

No presente capítulo, serão apresentados e analisados os resultados obtidos na simulação de injeção de soluções poliméricas para os dois casos em estudo: Variação da viscosidade do fluido injetado como função da taxa de cisalhamento e como função da taxa de extensão.

5.1. Modelo de Reservatório

Para estudar injeção de soluções poliméricas em um reservatório realista, foi utilizado o reservatório descrito no segundo modelo do 10º projeto comparativo da SPE (Society of Petroleum Engineers – SPE 10 – www.spe.org).

O objetivo desse modelo da SPE é comparar o aumento da escala e a diminuição da discretização do grid assim como a habilidade do modelo para prever o desempenho da injeção de água através de um modelo geológico contendo milhões de células. A escolha deste modelo foi devido à alta heterogeneidade de suas camadas.

O modelo geológico completo possui dimensões 365.76 x 670.56 x 51.82 m³, descrito em uma malha cartesiana regular contendo 60 x 220 x 80 células. O qual consiste em duas formações: no topo a formação *Tarbert* raso-marinho, possuindo 21.34 m, discretizado-a em 35 camadas, seguida pela formação *Upper Ness* (origem fluvial) possuindo 30.48 m, discretizados em 50 camadas. Ambas as formações são caracterizadas por grandes variações de permeabilidade, 8-12 ordens de magnitude.

No modelo original, o campo de porosidade está fortemente correlacionado com a permeabilidade e cerca de 2.5% dos blocos tem porosidade zero, portanto, são considerados como inativos. Além disso o modelo consiste de 5 poços verticais completados em toda a formação, sendo 4 produtores e 1 injetor localizados nas quinas e no centro do modelo respectivamente. O poço injetor possui uma taxa de injeção de 5,000 bbl/dia em condições de reservatório, e

uma pressão máxima de fundo do poço de 10,000 psi. Já os poços produtores possuem uma pressão máxima de 4,000 psi.

Na Figura 5-1 pode-se observar a porosidade representada em toda a malha no modelo original.

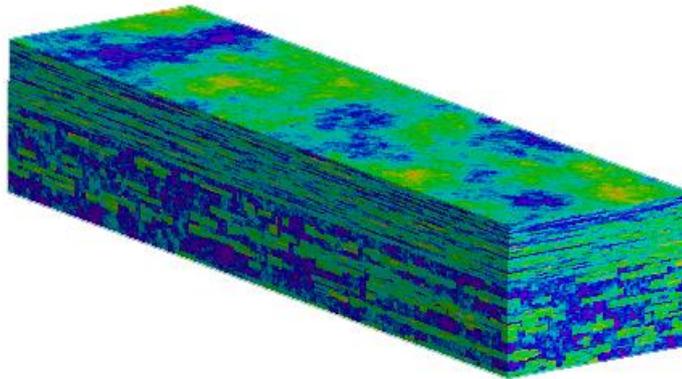


Figura 5-1 - Representação da porosidade no segundo modelo do 10º projeto comparativo da SPE.

No presente trabalho foi utilizado apenas a primeira camada do modelo geológico correspondente à formação *Tarbet* de dimensões 365.76 x 670.56 x 0.6096 m³ contendo 60 x 220 x 1 células. Para essa camada foi utilizado o campo de permeabilidade original do modelo enquanto que o campo de porosidade foi alterado tal que a porosidade mínima seja de $\phi = 0.01$. O arranjo de poços foi modificado para a configuração de 1/4 de *5-spot*, que consiste na localização dos poços injetor e produtor em cantos opostos da malha.

Os poços foram controlados através das vazões de injeção e de produção iguais a $Q_{ip} = 9.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Já as viscosidades da água e do óleo foram definidas respectivamente como $\mu_w = 0.001 \text{ Pa.s}$ e $\mu_o = 0.01 \text{ Pa.s}$, sendo que para o caso do estudo do comportamento extensional, a viscosidade do óleo foi considerada como sendo duas vezes a viscosidade da água. A saturação de água conata foi definida como $S_{wc} = 0.2$ e a saturação de óleo residual como sendo $S_{orw} = 0.4$. Por último as permeabilidades relativas da água e do óleo nas saturações residuais foram respectivamente $k_{rw} = 0.6$ e $k_{ro} = 1.0$.

5.2.

Resultados Obtidos Considerando a Variação da Viscosidade com a Taxa de Cisalhamento

A simulação realizada teve o objetivo de demonstrar os principais impactos decorrentes da injeção de soluções poliméricas considerando a variação da viscosidade com a taxa de cisalhamento no meio poroso em comparação com a injeção de água. Na Figura 5-2 pode-se observar o comportamento típico da viscosidade como função da taxa de cisalhamento de acordo com o modelo de potência utilizado.

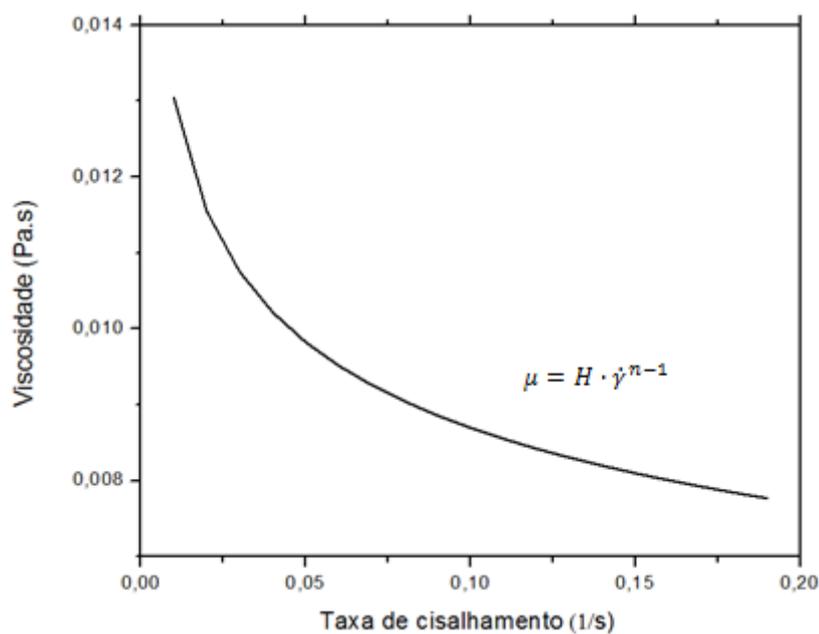


Figura 5-2 – Representação do comportamento da viscosidade conforme a taxa de cisalhamento de acordo com o modelo de potência.

Para o modelo não newtoniano em estudo, o parâmetro reológico e o índice de potencia utilizados respectivamente foram: $H = 0.0058$ e $n = 0.824$, sendo considerado que as saturações residuais não alteravam com a injeção de polímero.

Com isso, para a análise da variação da viscosidade com a taxa de cisalhamento foram avaliados dois tipos de injeção: injeção contínua e injeção alternada de água-polímero-água (APA). Sendo que na injeção alternada a variação foi baseada na quantidade de volumes porosos injetados. Considerando sempre que a quantidade total de volumes porosos (VP) injetados foi de 5 VP, tanto para a injeção contínua quanto para a alternada.

Uma série de casos foram estudados para que se fosse possível avaliar o comportamento da injeção de soluções poliméricas em meios porosos. Onde

avaliou-se os efeitos do tipo de injeção e para o caso de injeção alternada o tempo para início da injeção de polímero, assim como a variação da vazão injetada e a comparação com o escoamento de fluidos newtonianos. Esses casos estão listados na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Casos estudados para a viscosidade variando em função da taxa de cisalhamento.

Casos	Injeções	VP Injetado	Vazão de Injeção	Efeito Avaliado
Base	Água	5	Q_{ip}	-
1	Água-Polímero-Água	0.1-1-3.9	Q_{ip}	Tipo de injeção e tempo para início de injeção
2	Água-Polímero-Água	1-1-3	Q_{ip}	
3	Polímero	5	Q_{ip}	
4	Água-Polímero-Água	1-1-3	$0.1 Q_{ip}$	Variação da vazão
5	Água-Polímero-Água	1-1-3	$10 Q_{ip}$	
6	Polímero	5	$0.1 Q_{ip}$	
7	Polímero	5	$10 Q_{ip}$	
8	Água-Polímero-Água	1-1-3	Q_{ip}	Fluido Newtoniano
9	Polímero	5	Q_{ip}	

Assim sendo, para o caso 1 a injeção constituiu-se de 0.1 VP de água injetada, seguida por 1 VP de polímero e 3.9 volumes porosos de água para finalizar a injeção. O caso 2, considerou injeção alternada de 1 VP de água, seguido por 1 VP de polímero e 3 VP de água. E o caso 3 uma injeção contínua de polímero.

Para se avaliar a eficiência da injeção de soluções poliméricas todos os casos foram comparados para as mesmas condições de operação com a injeção contínua de água, considerada como caso base.

A Figura 5-3 apresenta o fator de recuperação (FR) e a concentração de polímero no poço injetor ($C_{p_{injetor}}$) em função do VP injetado para os casos 1, 2 e 3 em estudo, comparando os mesmos com a injeção contínua de água. Já na Figura 5-4 o corte de água (WCUT) e a pressão do poço injetor (IBP) são apresentados para os mesmos casos descritos anteriormente.

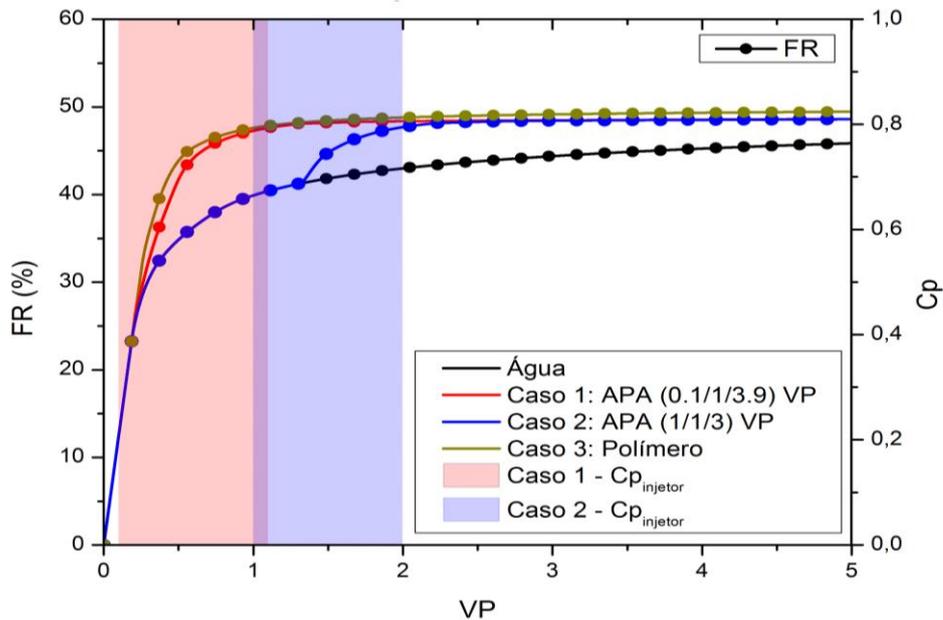


Figura 5-3 - Fator de recuperação em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base), injeção alternada APA (caso 1 e 2) e injeção contínua de polímero (caso 3) – Efeito do tipo de injeção e do início de injeção de polímero.

Analisando os casos descritos acima, pode-se observar que a utilização de soluções poliméricas é eficaz para se aumentar a taxa de recuperação de óleo, uma vez que em todos os casos obteve-se uma maior produção de óleo decorrente da injeção de polímero em comparação com a injeção de água que resultou em 46% de recuperação.

Comparando os casos de injeção alternada e de injeção contínua de polímero pode-se observar que os três casos não tiveram uma diferença significativa no valor final do fator de recuperação de óleo, que resultou em torno de 47%. Porém, é importante observar na injeção antecipada de polímero (caso 1) o aceleração da recuperação de óleo, pois a sua curva de produção sofre uma elevação mais brusca logo após o início da injeção de polímero.

A Figura 5-4 mostra que a pressão de injeção aumenta no momento em que a solução polimérica está sendo injetada, porém em seguida, retorna para a faixa de pressão equivalente à injeção de água. Ressaltando que esta pressão se mantém elevada e constante no caso da injeção contínua de polímero. Na figura observa-se que a maior redução do corte de água acontece durante o processo de injeção alternada de polímero para o caso com maior volume poroso de polímero injetado (caso 2) e não durante a injeção contínua de polímero que consegue apenas adiar um pouco a irrupção de água.

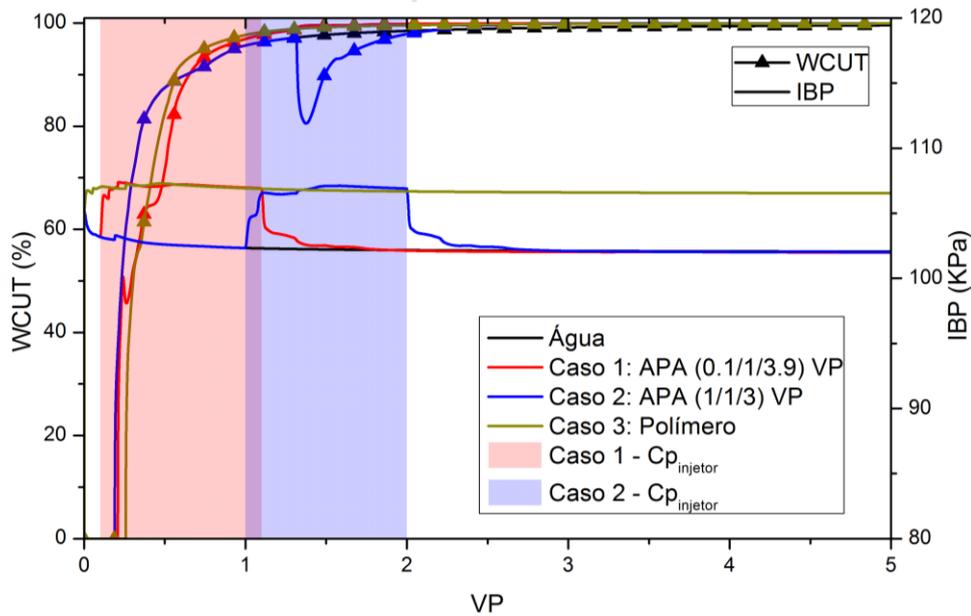


Figura 5-4 - Corte de água e pressão de injeção em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base), injeção alternada APA (casos 1 e 2) e injeção contínua de polímero (caso 3) – Efeito do tipo de injeção e do início de injeção de polímero.

Os resultados de produção também foram analisados em função de mapas de diferença de saturação de água (ΔS_w) entre cada caso de injeção de polímero (alternada ou contínua) e a injeção contínua de água ou caso base ($\Delta S_w = S_{w_{APA/Polímero}} - S_{w_{Água}}$). A Figura 5-5 apresenta os mapas da diferença de saturação de água entre os casos 1, 2 e 3 e injeção contínua de água (caso base) respectivamente.

Pode-se notar que para o caso 2, a injeção de polímero ainda não foi inicializada no primeiro tempo analisado, VP igual a 0.4. Com isso a saturação de água é a mesma para o caso 2 e para o caso base, logo a diferença de saturação de água fica entorno de zero. Em contrapartida, os casos 1 e 3 já iniciaram a injeção de polímero, logo a saturação de água é mais elevada próximo ao poço injetor, pois uma quantidade maior de óleo já foi varrida pela solução polimérica. Vale ressaltar a existência de uma área de maior saturação de óleo em ambos os casos representada por uma maior diferença de saturação de água. Além disso, próximo ao poço produtor tem-se valores negativos para a diferença de saturação, visto que a saturação de água para o caso base foi mais elevada neste ponto em relação aos casos 1 e 3.

Analisando as saturações em 4 volumes porosos, tem-se uma diferença de saturação de água positiva em todo o reservatório para os três casos, onde se teve uma maior saturação de água em todo o reservatório para os 3 casos

quando comparado com a injeção contínua de água. Comprovando assim a eficiência volumétrica das injeções de soluções poliméricas, uma vez que elas levam a uma frente de avanço mais estável e por consequência um maior fator de recuperação.

Comparando os resultados de produção com o mapa de diferença de saturação é possível observar a chegada de uma frente de óleo no poço produtor para todos os casos em $VP=1.6$. Porém nota-se que no caso 2 ocorre uma antecipação da chegada desta frente de óleo, visto que a mesma pode ser observada antes de 1.5 VP. Consequentemente com a chegada da frente de óleo nestes volumes porosos tem-se uma diminuição no corte de água. Também é possível observar que o avanço da frente de saturação para os casos 1, 2 e 3 são bem parecidas o que justifica o comportamento similar no volume de óleo produzido (Figura 5-3) sugerindo que a injeção alternada APA (1/1/3) é tão eficiente quanto a injeção contínua de polímero sem o risco de se ter altas pressões de injeção.

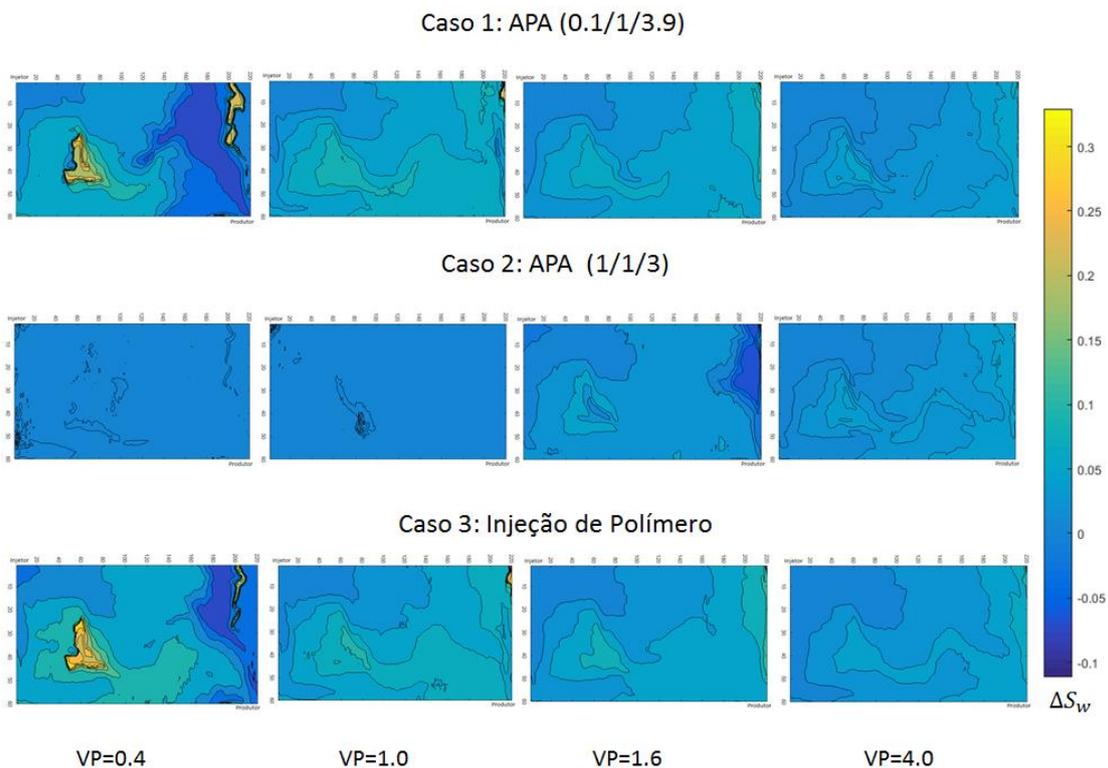


Figura 5-5 - Mapas da diferença de saturação de água durante o processo de injeção alternada APA (casos 1 e 2) e injeção contínua de polímero (caso 3) – Efeito do tipo de injeção e do início de injeção de polímero.

Os mesmos gráficos gerados anteriormente foram gerados para diferentes vazões de injeções alternadas de polímero e comparados novamente com a injeção contínua de água. Onde para o caso 4 a vazão de injeção foi reduzida em dez vezes e para o caso 5 a vazão foi aumentada em dez vezes. Enfatizando que em ambos os casos a injeção de polímero iniciou após a injeção de 1 VP de água.

Observa-se na Figura 5-6 um aumento no fator de recuperação para ambos os casos, porém o caso 4 atinge um fator de recuperação mais elevado (48%) do que o caso 5 (47%). Isto pode ser explicado analisando o comportamento da viscosidade do polímero com a taxa de cisalhamento mostrada na Figura 5-2. Vazões mais altas levam a taxas de cisalhamento mais altas e consequentemente viscosidades mais baixas da solução polimérica e maiores razão de mobilidade óleo/água.

Com relação ao corte de água, Figura 5-7, as curvas são muito similares, apenas notando-se uma queda mais acentuada no momento em que começa a injeção de polímero tanto para o caso 4 quanto para o caso 5, causada pelo aumento da produção de óleo. A pressão do poço injetor se torna notoriamente superior no caso 5, devido à alta taxa de injeção.

Analisando os mapas da diferença de saturação (Figura 5-8), é possível observar que para o instante de 1.6 VP injetados as frentes de avanço são bem parecidas e instáveis para ambos os casos, embora as vazões sejam diferentes. Ao longo do processo de injeção os mapas se mantem muito parecidos, portanto nenhum caso mostra ser mais eficiente do que o outro.

Os resultados sugerem um pequeno incremento da eficiência de deslocamento devido à melhora de eficiência volumétrica com a redução da taxa de injeção do polímero, efeito que é consequência direta do aumento da viscosidade da solução polimérica e, portanto, uma melhora também na redução da mobilidade da água. Porém o maior efeito dado pela redução da vazão de injeção é dado pela menor pressão de injeção, conforme Figura 5-7.

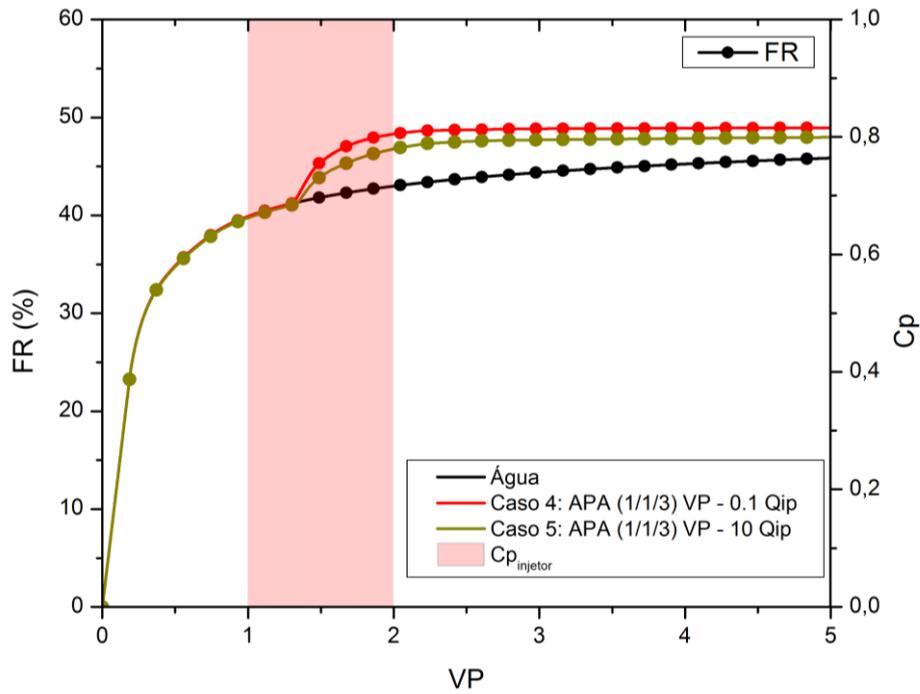


Figura 5-6 - Fator de Recuperação em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base) e injeção alternada APA (casos 4 e 5) – Efeito da vazão de injeção.

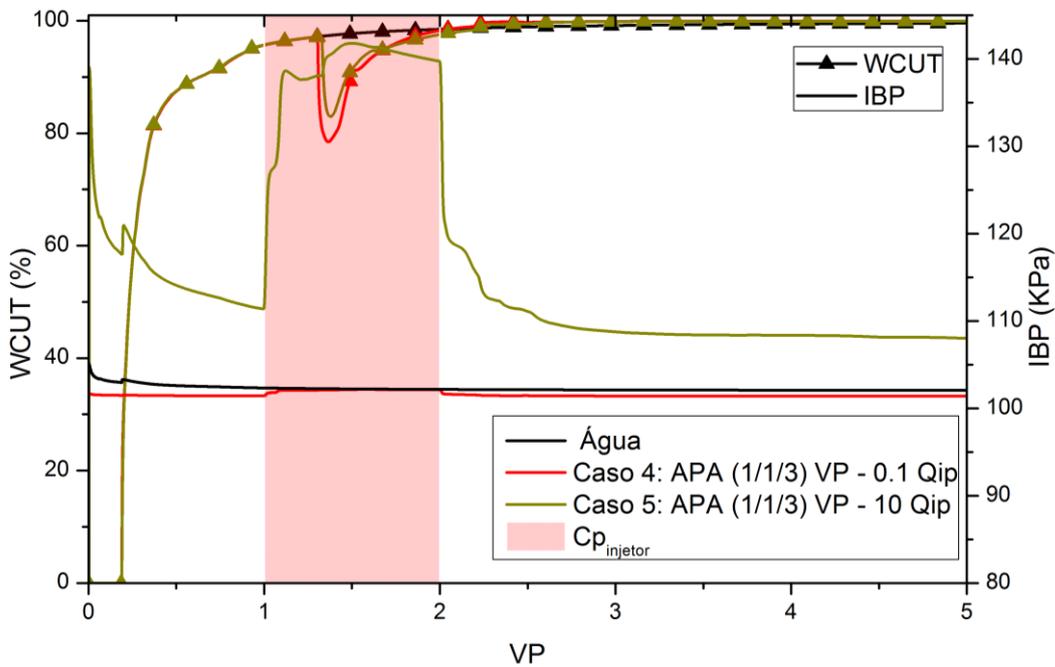


Figura 5-7 - Corte de água e pressão de injeção em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base) e injeção alternada APA (casos 4 e 5) – Efeito da vazão de injeção.

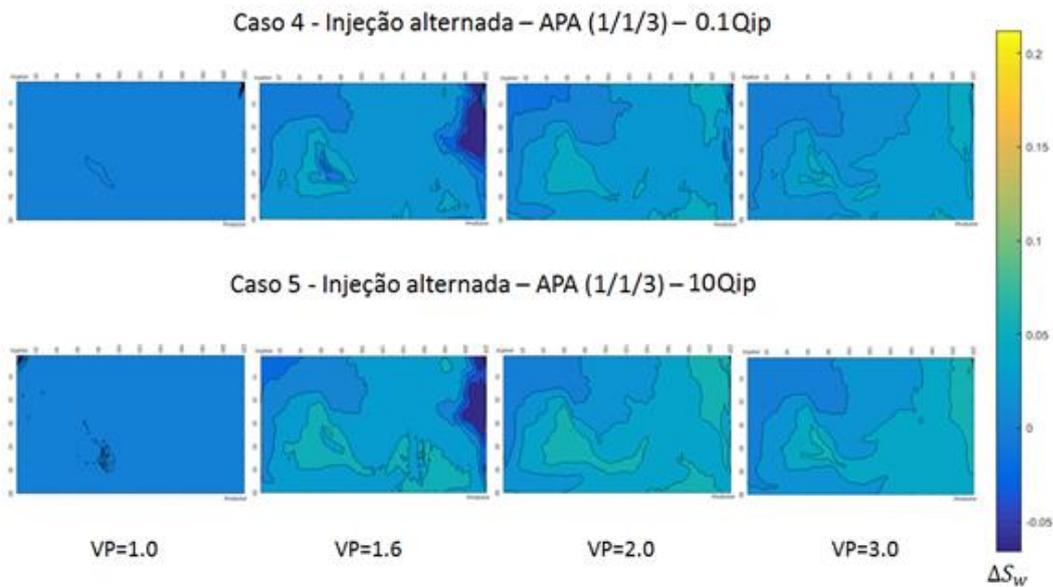


Figura 5-8 - Mapas da diferença de saturação de água durante o processo de injeção alternada APA (casos 4 e 5) – Efeito da vazão de injeção.

A mesma análise de variação de vazão de injeção foi realizada para injeção contínua de polímero (casos 6 e 7). Na Figura 5-9 observa-se que assim como no caso da injeção alternada de polímero, a injeção com menor vazão de injeção, caso 6, retornou um fator de recuperação um pouco superior à injeção com maior vazão, caso 7, 50% e 49% respectivamente, uma vez que altas vazões levam a viscosidades mais baixas e conseqüentemente a um aumento da razão de mobilidade água-óleo. Na Figura 5-10, pode-se observar que as curvas de corte de água para os casos de injeção alternada apresentam um comportamento similar, porém novamente a pressão de injeção é muito superior para o caso 7.

Com relação aos mapas da diferença de saturação (Figura 5-11), observa-se que tanto no caso 6 quanto no caso 7 a frente de avanço não são estáveis, nem uniformes e muito similares. Sendo importante ressaltar que como a injeção é contínua de polímero, não ocorre aquele aumento repentino da produção de óleo e por conseqüência não há a queda no corte de água.

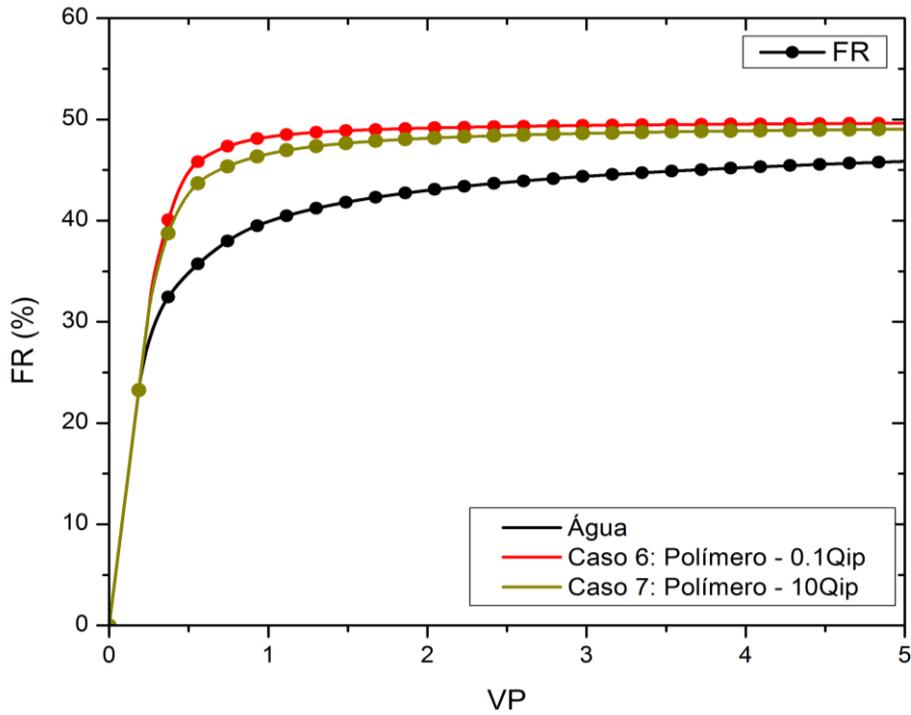


Figura 5-9 - Fator de Recuperação em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base) e injeção contínua de polímero (casos 6 e 7) – Efeito da vazão de injeção.

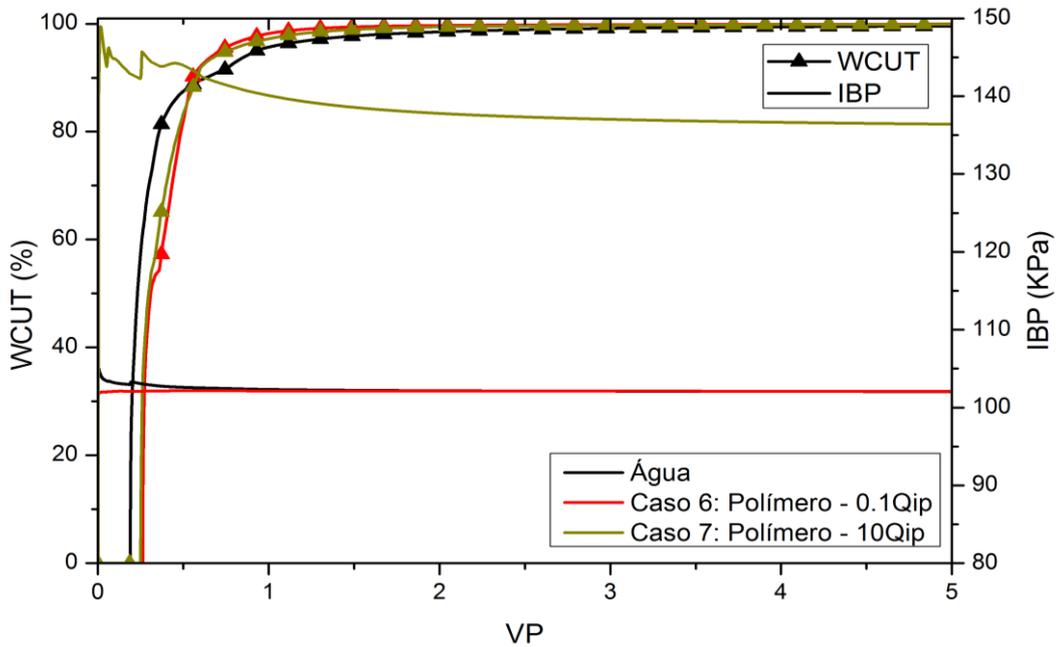


Figura 5-10 - Corte de água e pressão de injeção em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base) e injeção contínua de polímero (casos 6 e 7) – Efeito da vazão de injeção.

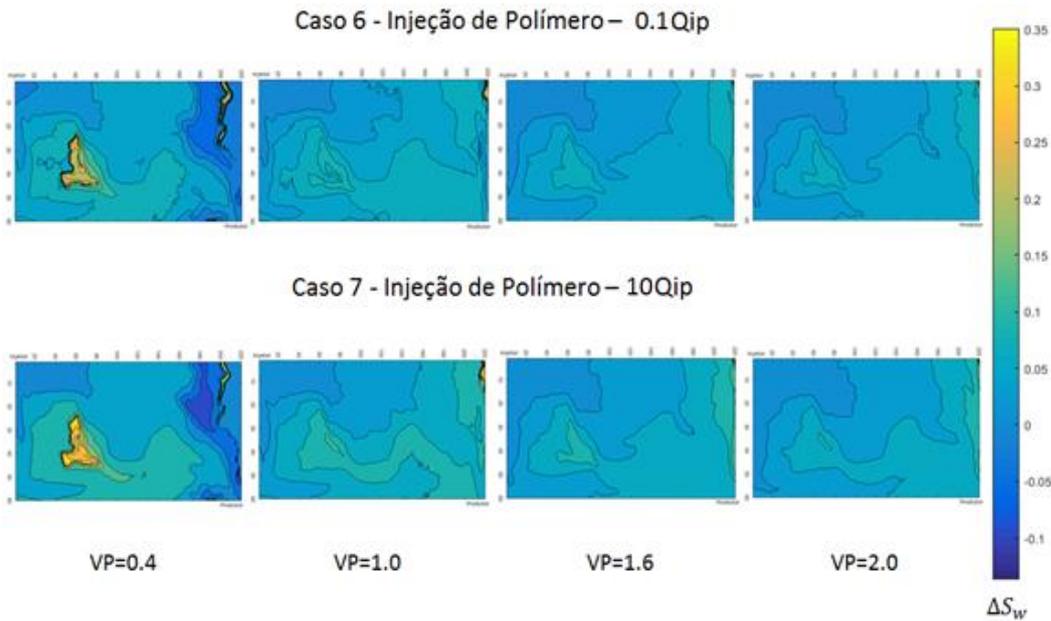


Figura 5-11 - Mapas da diferença de saturação de água durante o processo de injeção contínua de polímero (casos 6 e 7) – Efeito da vazão de injeção.

Em seguida os casos comparando o comportamento de um fluido newtoniano e não newtoniano foram avaliados. O caso 8 levou em consideração a injeção de um polímero de viscosidade constante ($\mu_p = 0.0545$), ou seja, se comportando como um fluido Newtoniano com viscosidade mais alta que a água e o mesmo foi comparado com o caso 2, correspondente à injeção de polímero com comportamento de fluido não Newtoniano. A viscosidade do polímero para o caso 8 foi definida como a maior viscosidade encontrada para o caso 2 dentre todas as células do reservatório. Para ambos os casos foram consideradas injeções alternadas de polímero após a injeção de 1 VP de água.

A Figura 5-12 mostra uma leve aceleração da produção e um fator de recuperação levemente superior para a injeção de soluções poliméricas com viscosidade constante, caso 8. O menor fator de recuperação observado para o caso 2 pode ser consequência da variação da viscosidade em cada célula atingindo valores uma abrangência bem grande, podendo variar de viscosidades muito baixas até viscosidades mais altas, diferentemente do caso 8 onde foi levado em consideração uma viscosidade constante igual ao valor máximo encontrado para o caso 2.

Na Figura 5-13 nota-se uma pressão de injeção muito mais elevada no caso considerando o polímero como fluido Newtoniano, visto que o fluido injetado se tornou mais viscoso e as curvas de corte de água sendo muito

similares, sofrendo novamente uma queda brusca a partir do momento em que ocorre a injeção de polímero, pois ocorre um aumento na produção de óleo.

O fato que a viscosidade do polímero decai com a taxa de cisalhamento faz com que a pressão de injeção seja menor, sem comprometer a produção de óleo.

Assim como nos gráficos de produção, os mapas da diferença de saturação (Figura 5-14) também comprovam que o fluido Newtoniano nas condições apresentadas, oferece uma melhor eficiência de varrido. No instante de tempo igual a 2.6 volumes porosos, o caso 8 apresenta uma diferença de saturação mais elevada do que o caso 2, portanto sua saturação de água é mais elevada e sua saturação de óleo inferior. Levando a uma melhor eficiência de varrido por se ter menos óleo residual.

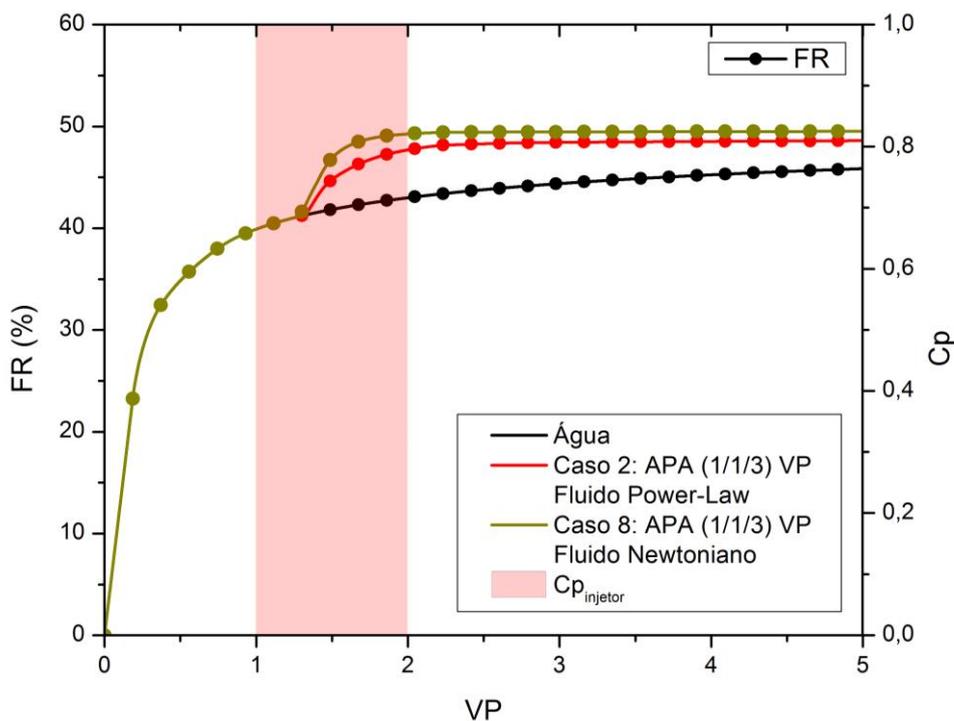


Figura 5-12 - Fator de Recuperação em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base) e injeção alternada de polímero (caso 2 e 8) – Efeito da variação da viscosidade usando o modelo viscoso.

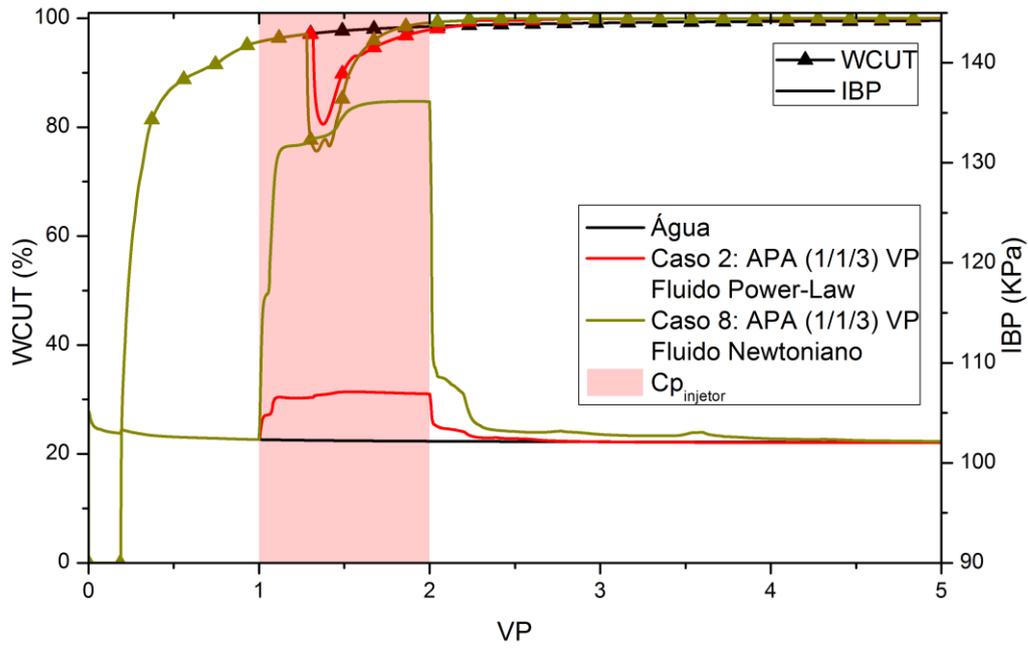
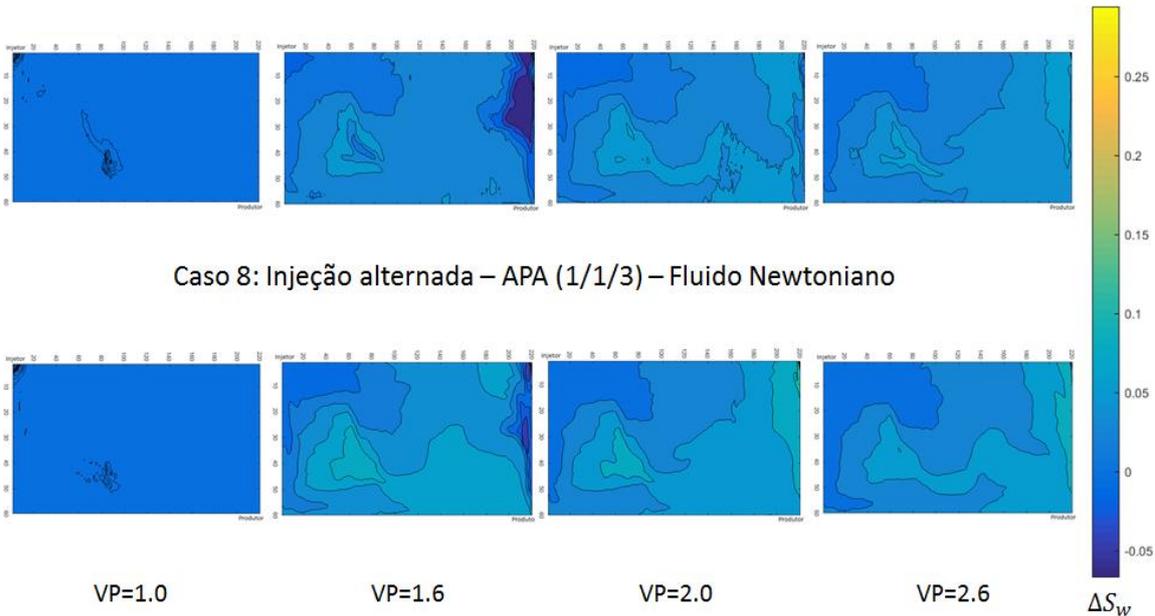


Figura 5-13 - Corte de água e pressão de injeção em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base) e injeção alternada de polímero (caso 2 e 8) – Efeito da variação da viscosidade usando o modelo viscoso.

Caso 2: Injeção alternada – APA (1/1/3) – Fluido Não-Newtoniano



Caso 8: Injeção alternada – APA (1/1/3) – Fluido Newtoniano

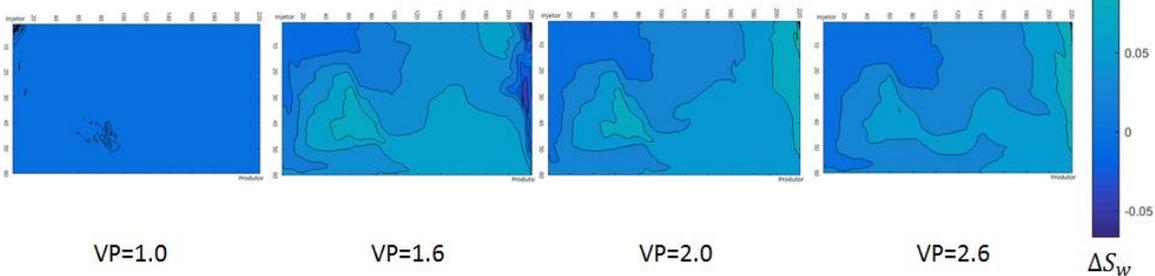


Figura 5-14 - Mapas da diferença de saturação de água durante o processo de injeção alternada APA (caso 2 e 8) – Efeito da variação da viscosidade usando o modelo viscoso.

A mesma análise comparando o comportamento do polímero como fluido newtoniano e não newtoniano (casos 3 e 9 respectivamente) foi realizada para a injeção contínua de polímero, com viscosidade $\mu_p = 0.0328$. Na Figura 5-15 pode-se observar que o fator de recuperação entre os casos de injeção contínua de polímero não foi alterado ao final da produção, pois ambos alcançaram valores muito próximos. O que pode ser visto também nos mapas da diferença de saturação na Figura 5-17, onde as frentes de avanço para o caso 9 foram um pouco mais estáveis quando comparadas ao caso 3, ocasionando uma pequena melhora na sua eficiência de varredura devido à menor saturação de óleo residual no reservatório após a injeção de polímero.

Quanto a pressão do poço injetor (Figura 5-16), os resultados são análogos ao anterior, pois a curva de pressão para o fluido Newtoniano é mais elevada do que a de injeção de água e do que o caso 3, devido a sua maior viscosidade. E novamente as curvas de corte de água são similares, sem que ocorra a queda no corte de água pois não há o aumento repentino na produção de óleo.

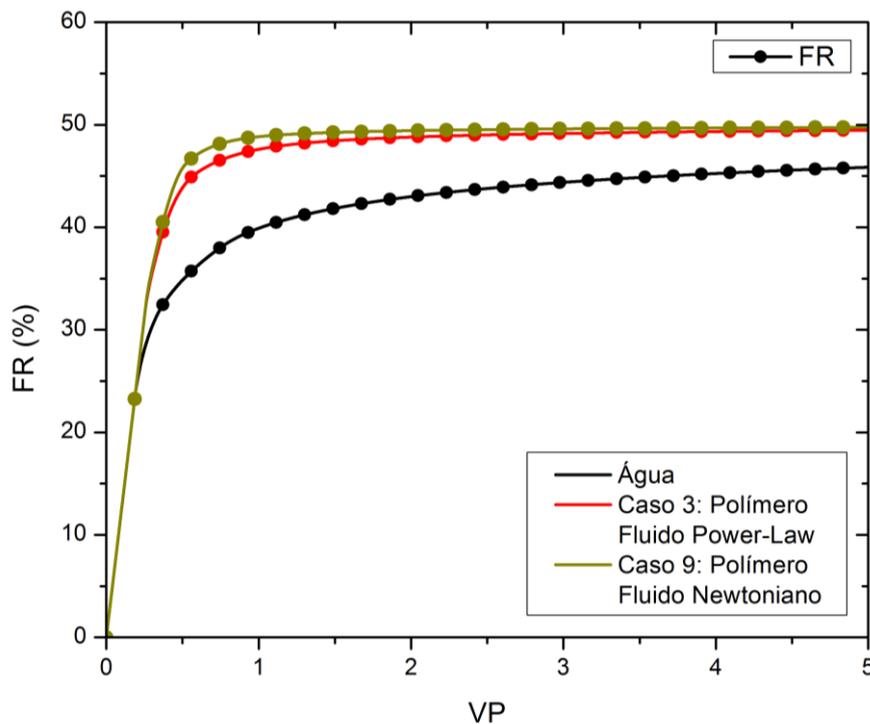


Figura 5-15 - Fator de Recuperação em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base) e injeção contínua de polímero (casos 3 e 9) – Efeito da variação da viscosidade usando o modelo viscoso.

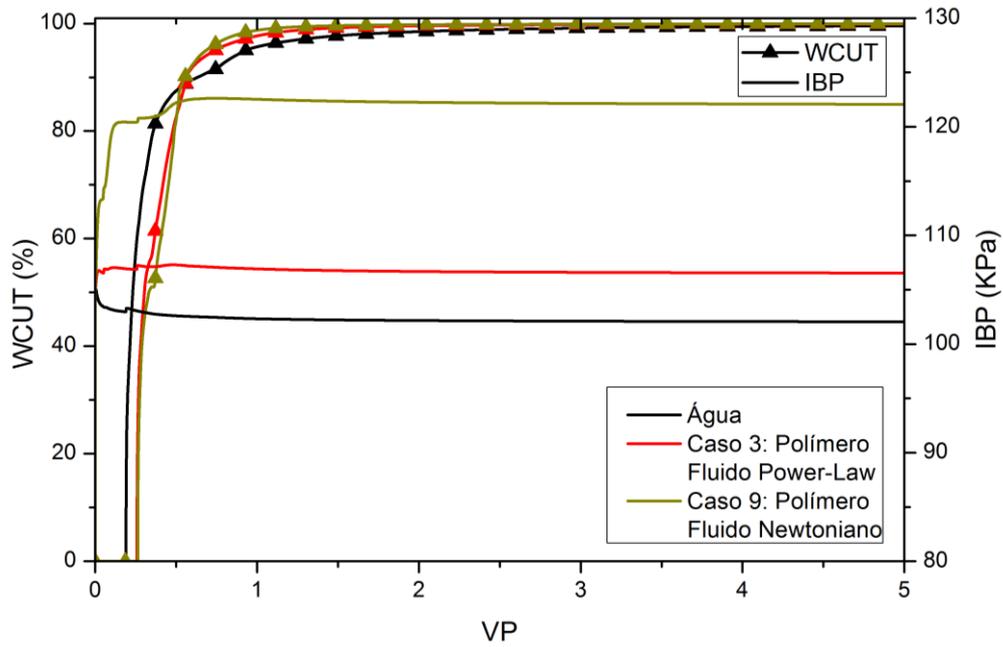
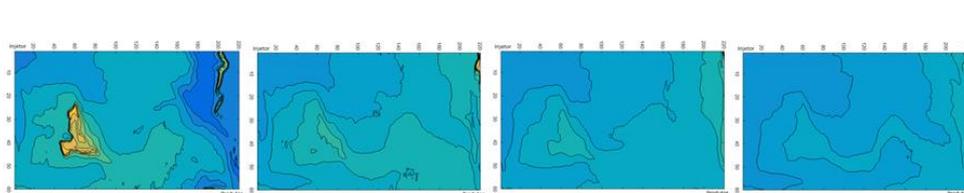
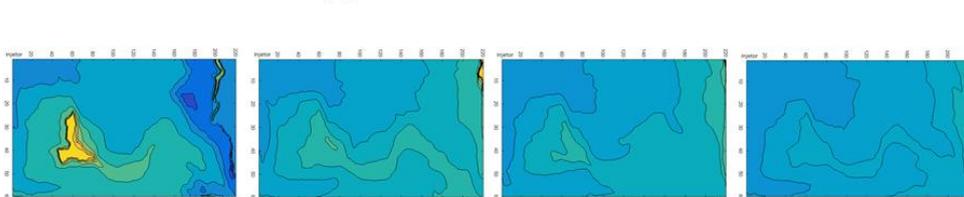


Figura 5-16 - Corte de água e pressão de injeção em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base) e injeção contínua de polímero (casos 3 e 9) – Efeito da variação da viscosidade usando o modelo viscoso.

Caso 3: Injeção de Polímero - Fluido Não-Newtoniano



Caso 9: Injeção de Polímero – Fluido Newtoniano



VP=0,4

VP=1,0

VP=1,6

VP=2,0

ΔS_w

Figura 5-17 – Mapas da diferença de saturação de água durante o processo de injeção contínua de polímero (casos 3 e 9) – Efeito da variação da viscosidade usando o modelo viscoso.

5.3.

Resultados Obtidos Considerando a Variação da Viscosidade com a Taxa de Extensão

Os efeitos elásticos de soluções poliméricas podem se manifestar na forma de um aumento da viscosidade extensional do fluido com a taxa de extensão. Desta forma, no escoamento de um fluido viscoelástico através de um meio poroso observa-se um aumento da queda de pressão quando comparado ao escoamento de um fluido Newtoniano com a mesma viscosidade. Isso pode ser modelado fazendo a viscosidade variar com a taxa de extensão.

Os parâmetros utilizados para o modelo foram: parâmetro reológico de Carreau-Yassuda $n_{cy} = 0.8$, constante viscoelástica $\alpha = 180^{1/2}$, tempo de relaxação da molécula $\lambda = 5.0$ e viscosidades iniciais e infinitas respectivamente $\mu_0 = 0.001$ e $\mu_\infty = 0.01$. Na Figura 5-18, tem-se o comportamento típico da variação da viscosidade em função da taxa de extensão para soluções poliméricas viscoelásticas.

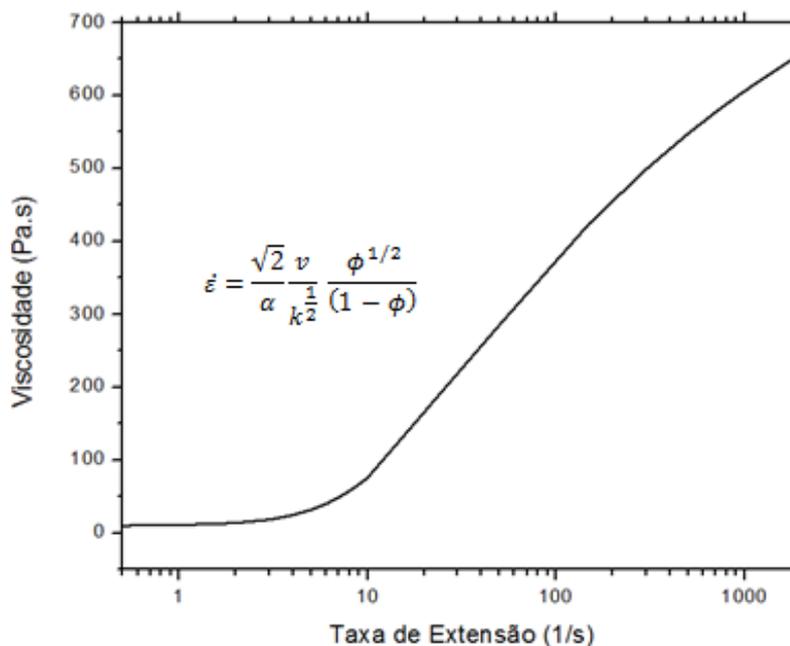


Figura 5-18 - Representação do comportamento da viscosidade em função da taxa de extensão de acordo com o modelo de Carreau-Yassuda.

Assim como na seção anterior, a injeção contínua de água foi comparada com a injeção alternada de água-polímero-água e com a injeção contínua de polímero, porém usando o modelo viscoelástico para o cálculo da viscosidade do

polímero. Foram avaliados os efeitos da variação da vazão de injeção e o tipo de injeção. Esses casos estão listados na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 - Casos estudados para a viscosidade variando em função da taxa de cisalhamento.

Casos	Injeções	VP Injetado	Vazão de Injeção	Efeito Avaliado
10	Água-Polímero-Água	1-1-3	Q_{ip}	Tipo de injeção e variação de injeção
11	Polímero	5	Q_{ip}	
12	Água-Polímero-Água	1-1-3	10,000 Q_{ip}	
13	Polímero	5	10,000 Q_{ip}	

Na Figura 5-19 tem-se o fator de recuperação para os casos 10 e 11 em comparação com a injeção contínua de água, pode-se notar que as curvas se sobrepõem para todos os casos. O mesmo ocorre com as curvas de corte de água e de pressão de injeção, Figura 5-20. Portanto, apresentando nenhuma eficácia na injeção de soluções poliméricas com comportamento viscoelástico.

A mesma conclusão pode ser tirada ao se avaliar os mapas da diferença de saturação (Figura 5-21) pois nota-se que o valor da diferença de saturação de água entre os casos de injeção de polímero e o caso de injeção de água em todos os mapas está em torno de zero. Ou seja, a saturação de água ao longo do reservatório para os dois casos analisados e para o caso base é a mesma. Portanto não houve uma melhora na eficiência de varrido do reservatório ao se analisar o comportamento viscoelástico do polímero, visto que.

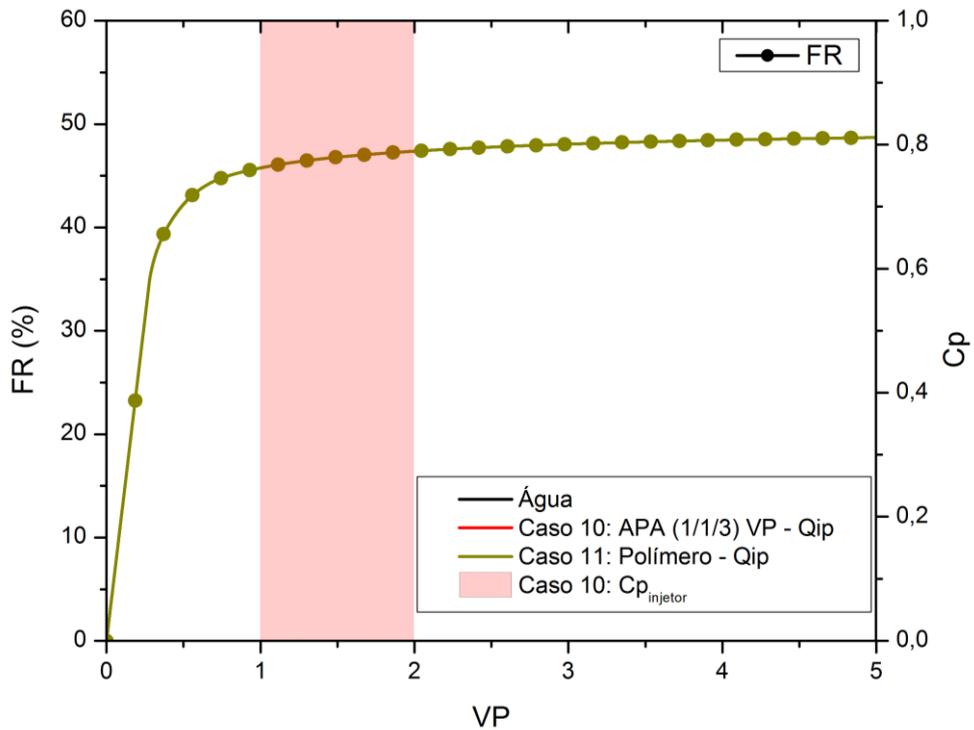


Figura 5-19 - Fator de Recuperação em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base), APA (caso 10) e injeção contínua de polímero (caso 11) – Modelo viscoelástico usando a vazão inicial Q_{ip} .

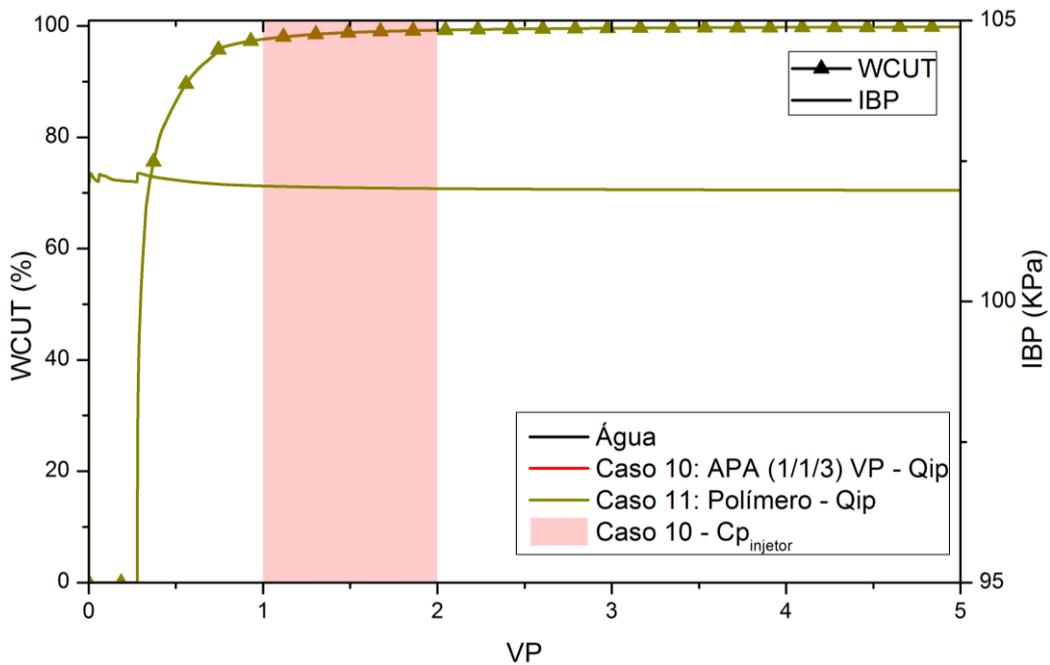


Figura 5-20 - Corte de água e pressão de injeção em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base), APA (caso 10) e injeção contínua de polímero (caso 11) – Modelo viscoelástico usando a vazão inicial Q_{ip} .

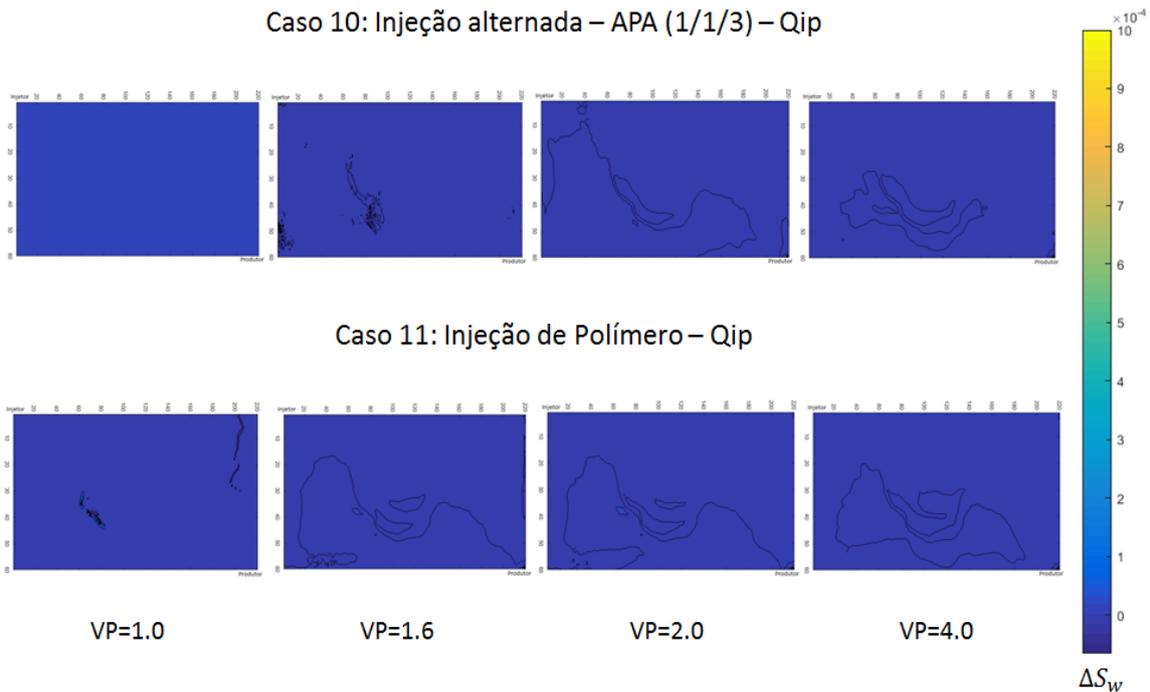


Figura 5-21 – Mapas da diferença de saturação de água durante o processo de injeção alternada APA (caso 10) e injeção contínua de polímero (caso 11) – Modelo viscoelástico usando a vazão inicial Qip.

Seguidamente, para explorar o comportamento viscoelástico do polímero aumentou-se a vazão de injeção em dez mil vezes, casos 12 e 13, para atingir valores de taxa de extensão que levam às viscosidades mais altas. Sendo importante enfatizar que para um caso realista deve-se considerar o comportamento geomecânico da rocha para evitar propagação de fraturas devido a altas vazões de injeção, informação que para o presente modelo não estão disponíveis. Além disso a velocidade tipicamente utilizada em reservatórios se encontrar na faixa entre 1 a 3 pés/dia. Portanto a vazão utilizada no modelo ultrapassa esses valores, sendo esta utilizada apenas para uma análise paramétrica para que se fosse possível avaliar o comportamento da viscosidade com a sua taxa de extensão para injeções poliméricas.

A Figura 5-22 representa o fator de recuperação para os casos 12 e 13. Pode-se observar uma maior produção de óleo decorrente da injeção de polímero em relação à injeção de água. É possível observar também uma aceleração da produção durante a injeção contínua de polímero (caso 13). Embora o FR final seja igual para os dois casos (50%), o aumento da produção de óleo está associado à melhora da eficiência de deslocamento do óleo devido ao aumento da viscosidade extensional pela deformação elástica do polímero no meio poroso.

Na Figura 5-23, observa-se que a pressão de injeção cresceu muito a partir do momento em que a solução polimérica começa a ser injetada. E com relação ao corte de água as curvas são bem similares sofrendo uma leve queda para o caso alternado, caso 12, durante o período de injeção de polímero. Os mapas da diferença de saturação, Figura 5-24, mostram uma frente de avanço um pouco mais estável para o caso de injeção contínua de polímero, porém os mapas de ambos os casos são muito parecidos, sendo assim nenhum dos casos representa uma melhor eficiência em relação ao outro.

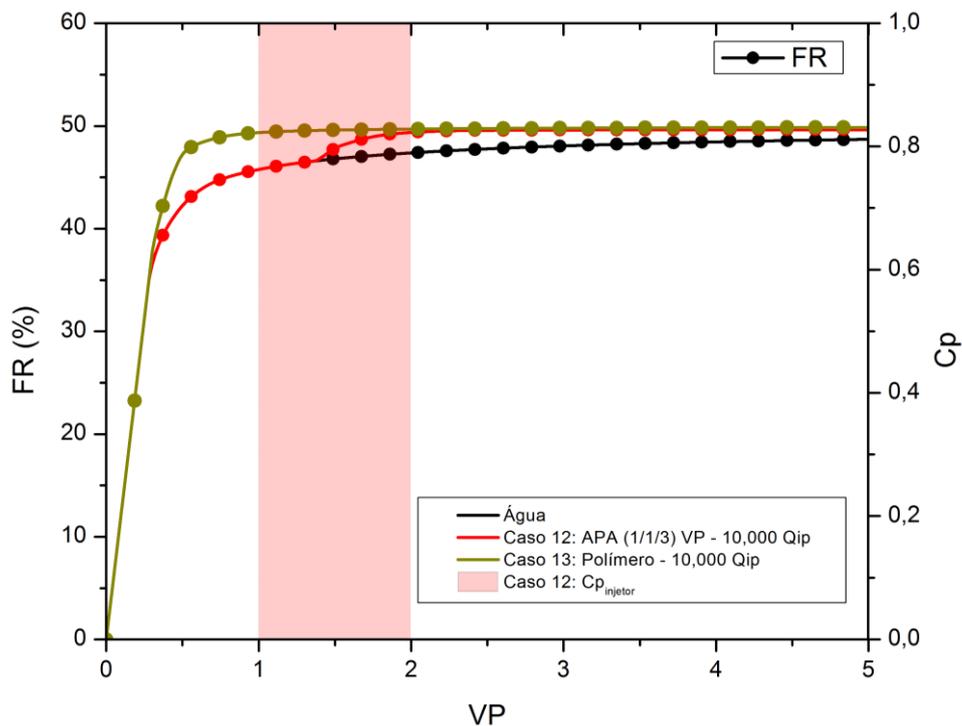


Figura 5-22 - Fator de Recuperação em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base), APA (caso 12) e injeção contínua de polímero (caso 13) – Efeito da vazão de injeção usando o modelo viscoelástico.

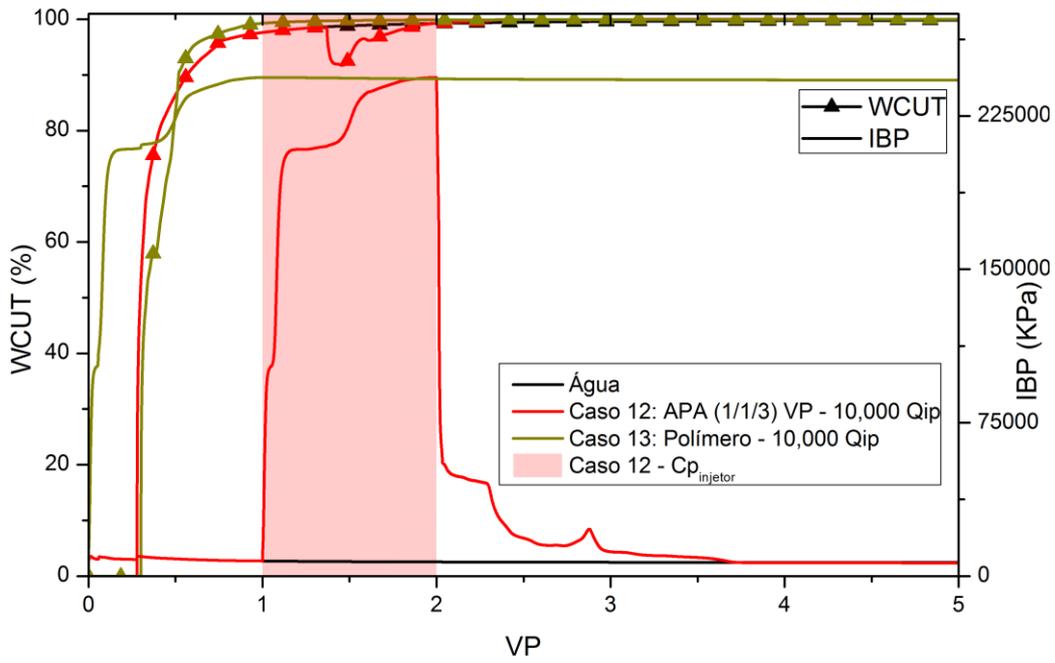
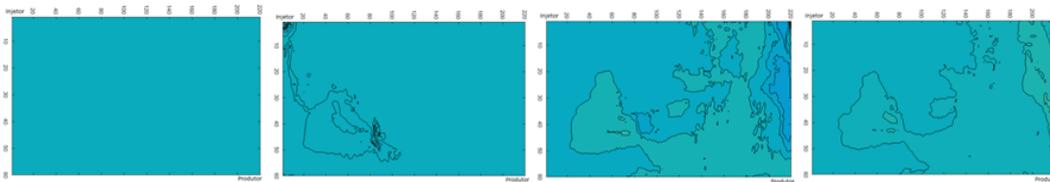
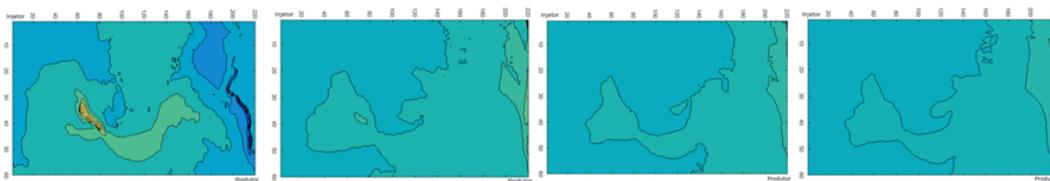


Figura 5-23 - Corte de água e pressão de injeção em função do VP injetado para a injeção contínua de água (caso base), APA (caso 12) e injeção contínua de polímero (caso 13) – Efeito da vazão de injeção usando o modelo viscoelástico.

Caso 12: Injeção alternada – APA (1/1/3) – 10,000 Qip



Caso 13: Injeção de Polímero – 10,000 Qip



VP=0.4

VP=1.0

VP=1.6

VP=4.0

ΔS_w

Figura 5-24 – Mapas da diferença de saturação de água durante o processo de injeção alternada APA (caso 12) e injeção contínua de polímero (caso 13) – Efeito da vazão de injeção usando o modelo viscoelástico.

Juntamente com os casos analisados anteriormente, tanto para a vazão inicial, casos 10 e 11, quanto para maiores vazões, casos 12 e 13, pode-se analisar também os mapas de viscosidade conforme representados nas figuras abaixo.

Na Figura 5-25 são apresentadas as injeções alternadas de polímero para as duas vazões analisadas, casos 10 e 12. E na Figura 5-26 são apresentadas as injeções contínuas de polímero para ambas as vazões, casos 11 e 13.

É possível observar que para o caso com a vazão inicial Q_{ip} (caso 10), a viscosidade ao longo do reservatório não é alterada, ela se mantém praticamente constante, em torno do valor da viscosidade da água, o que explica a sobreposição das curvas de produção na Figura 5-19. Enquanto que com a vazão 10,000 vezes maior nota-se que a viscosidade varia ao longo do reservatório, devido ao comportamento viscoelástico do polímero, efeito responsável pelo aumento do fator de recuperação observado nos casos com a maior taxa de injeção (Figura 5-22).

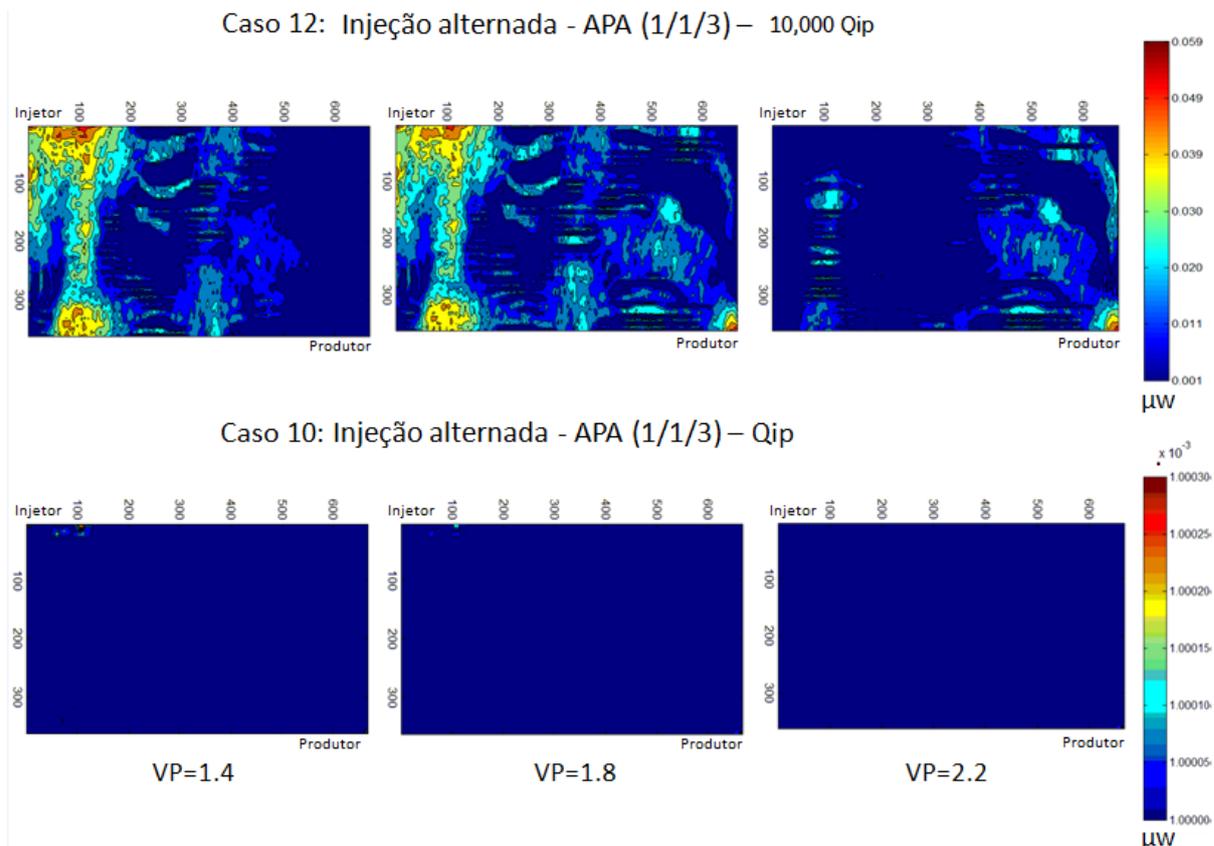


Figura 5-25 - Mapas da Viscosidade da fase aquosa durante o processo de injeção alternada de polímero para a vazão inicial Q_{ip} (caso 10) e 10,000 Q_{ip} (caso 12) – Modelo viscoelástico.

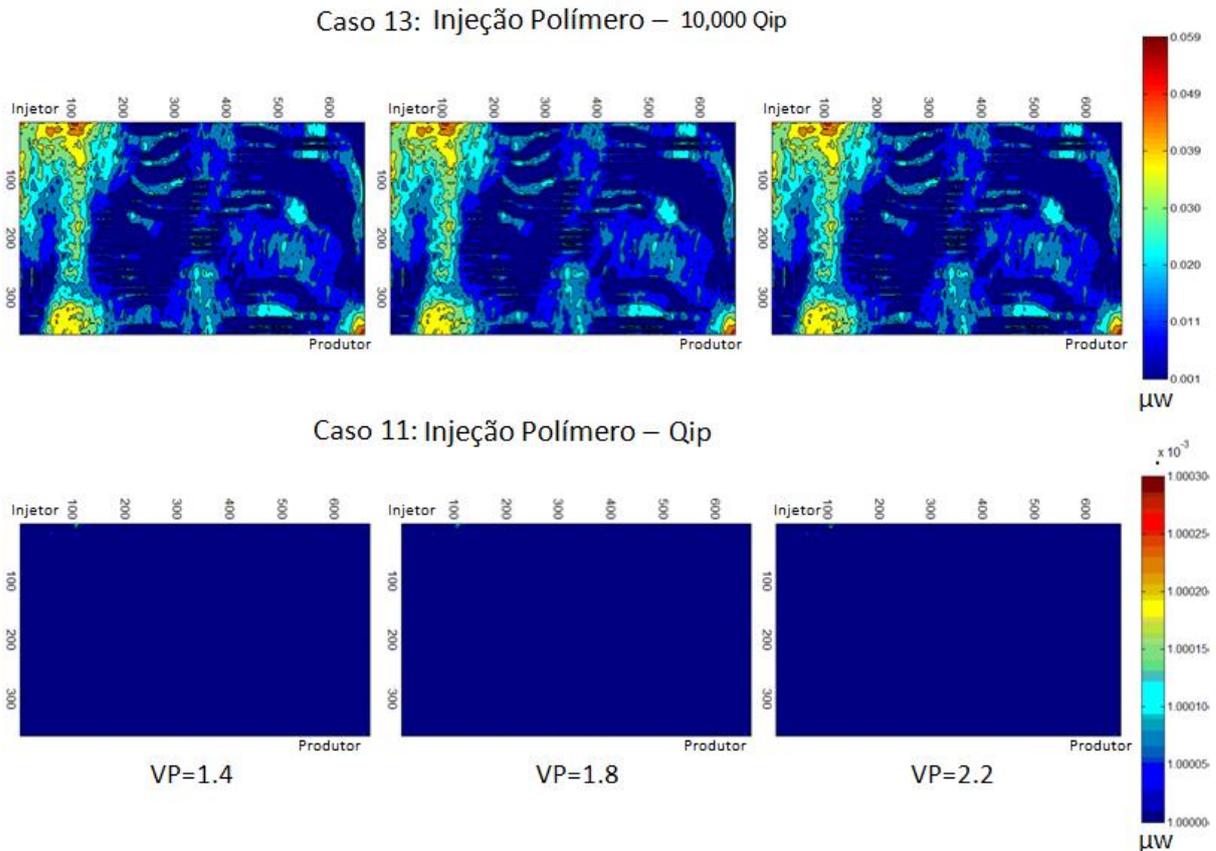


Figura 5-26 - Mapas da Viscosidade da fase aquosa durante o processo de injeção alternada de polímero para a vazão inicial Qip (caso 11) e 10,000 Qip (caso 13) – Modelo viscoelástico.

Portanto o efeito viscoelástico só pode ser observado para vazões muito altas, que para o caso aqui modelado correspondeu a velocidades superficiais elevadas, ultrapassando grandemente a faixa típica de velocidade em meios porosos. Com isso, uma forma de se obter o aumento da viscosidade extensional para vazões mais baixas seria através da utilização de soluções poliméricas com tempos de relaxação maiores, pois estes efeitos já foram observados experimentalmente e podem ser vistos na Figura 5-27, onde tem-se o comportamento da viscosidade como função da taxa de extensão para dois valores de tempo de relaxação.

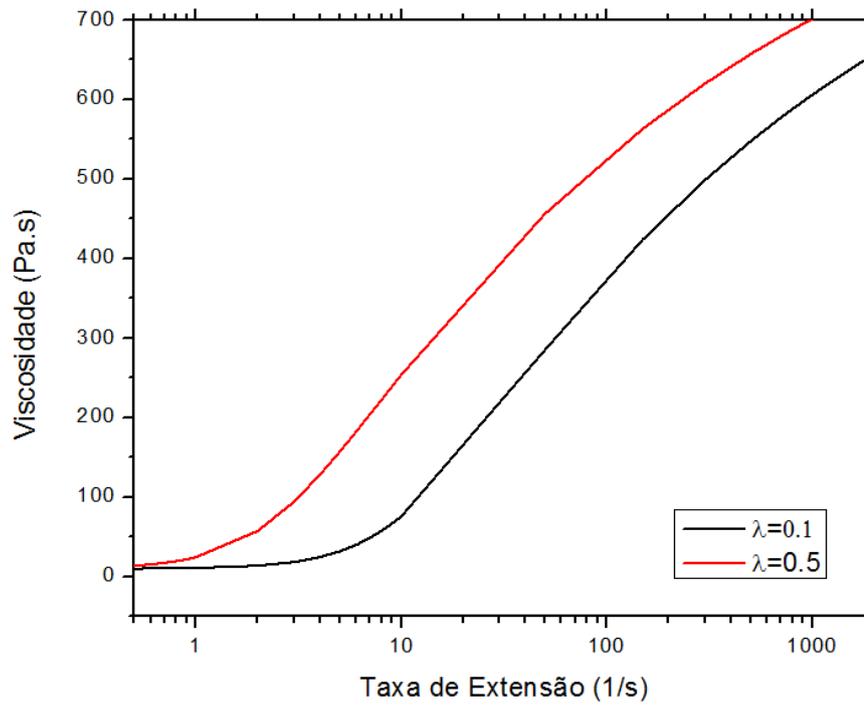


Figura 5-27 – Representação do comportamento da viscosidade em função da taxa de extensão de acordo com o modelo de Carreau-Yassuda para duas taxas de relaxação.