

Mobilização de óleo retido em microcavidades mediante injeção de fluidos não-Newtonianos inelásticos

Mariana Dias Pena, Oldrich Joel Romero*, Daniel da Cunha Ribeiro

Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES campus São Mateus, Rodovia BR 101 Norte, km 60, Litorâneo, CEP 29.932-540, São Mateus, ES, Brasil

*Autor para correspondência

Endereço eletrônico: mariana-penal@hotmail.com (Pena, M. D.); oldrich.romero@ufes.br (Romero, O. J.); daniel.ribeiro@ufes.br (Ribeiro, D. C.)

O deslocamento de petróleo contido na rocha-reservatório, provocado pela injeção de fluidos, pode ser estudado tanto na escala macroscópica quanto na microscópica. A forma macroscópica é a que ocorre em escala de campo e é a forma tradicional de estudo dos softwares de simulação de reservatórios. Na microescala é onde fenômenos relacionados com o deslocamento podem ser identificados e para sua compreensão precisam de uma abordagem diferenciada. Estes fenômenos são por exemplo o trapeamento e/ou movimentação do óleo em microcavidades ou dead ends. É nesta escala, da ordem de 100 m, que o balanço das forças de capilaridade e principalmente das forças viscosas são importantes. Quando o fluido injetado tem características elásticas, como é o caso de soluções poliméricas, o balanço de forças é alterado. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho consiste em aprofundar os estudos referentes ao deslocamento de óleo trapeado em um micro poro mediante a injeção de fluidos não-Newtonianos, visando identificar como a alteração das propriedades do fluido injetado favorece a movimentação deste óleo. Para isto, considera-se que o comportamento do fluido injetado é governado pelo modelo de Carreau-Yasuda e escoar em uma microcavidade quadrada, que representa um “poro morto” contendo óleo. Desta forma condições semelhantes às encontradas em reservatórios de petróleo podem ser recriadas. As equações governantes são resolvidas utilizando o software FLUENT. Resultados iniciais considerando fluidos Newtonianos mostram que a invasão da microcavidade pelo fluido injetado é potencializada com a diminuição do número de Reynolds. Deste modo, o aumento da recuperação do óleo trapeado é favorecido por um baixo número de Reynolds.

Palavras-chave: EOR. Micro escala. Simulação numérica. FLUENT.

1. Introdução

No processo de injeção de água, o óleo residual é difícil de ser deslocado ou recuperado. Em comparação, a injeção de soluções poliméricas, devido à razão de mobilidade favorável entre os fluidos deslocante e deslocado, é mais efetiva. Observa-se que, pela redução da razão de mobilidades ocorre a redução dos “fingerings” e como consequência, a área varrida pelo fluido injetado aumenta em proporções significativas antes do início da produção do fluido injetado.

Por outro lado, embora o deslocamento do óleo seja facilitado por uma razão de mobilidades favorável, o óleo remanescente no reservatório pode se apresentar em diferentes formas, que estão relacionadas à estrutura do meio poroso, molhabilidade, e às propriedades do óleo e fluido injetados. O óleo residual pode existir na forma de volumes trapeadas em microporos denominados *dead-ends*. Em geral, a estrutura dos poros é bastante complicada (Fig. 1).

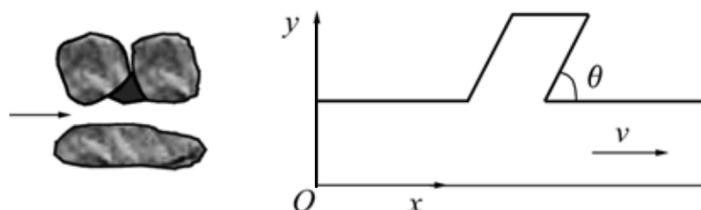


Figura 1: Óleo residual trapeado em um microporo e a geometria simplificada.

Desse modo, é importante estudar o escoamento geometrias que representes um *dead-end* de tal forma a entender com se dá o deslocamento do óleo na microescala.

Recentemente, o deslocamento do óleo residual preso em *dead-ends* através da injeção de polímeros tem recebido atenção especial. Para esse tipo de estudo, normalmente são utilizados fluidos viscoelásticos modelados por equações hiperbólicas que descrevem o comportamento elástico da solução polimérica aquosa (YIN *et al.*, 2012). Entretanto existe uma dificuldade acentuada com esta abordagem uma vez que são introduzidas novas incógnitas no sistema a ser resolvido, como as componentes do tensor elástico τ_{xx} , τ_{xy} e τ_{yy} , além do caráter hiperbólico do modelo.

Assim, com o intuito de facilitar a modelagem numérica, neste trabalho é utilizado um modelo não-Newtoniano inelástico. A intenção é utilizar, em trabalhos posteriores e em continuidade a este, modelos algébricos que traduzam os efeitos elásticos de forma simplificada. Por exemplo o modelo de Shunk e Scriven.

Os fluidos Inelásticos, ou Newtonianos generalizados são aqueles para os quais o tensor de tensão é proporcional ao tensor da taxa de deformação, mas a constante de proporcionalidade (a viscosidade) depende da taxa de deformação (THIEN, 2002). Para esse tipo de fluido faz sentido a modelagem apurada da função viscosidade através de modelos inelásticos. Tais modelos não possuem memória e nem elasticidade de maneira que são considerados inadequados para trabalhar com fluxos transientes, ou fluxos que possuem efeitos elásticos.

O fluido considerado neste trabalho é descrito pelo modelo de Carreau-Yasuda, que é do tipo pseudoplástico, ou seja, sua viscosidade decresce com a taxa de cisalhamento. A expressão que governa este modelo é a Eq. (1). Para mais detalhes a respeito desse modelo consultar Thien (2002).

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{(1-n)/2}}, \quad (1)$$

onde η_{∞} é a viscosidade a taxas de cisalhamento tendendo ao infinito, e η_0 é a viscosidade a taxas de cisalhamentos tendendo a zero, n é o índice de Power-law ($n-1$ é a inclinação da curva $(\eta - \eta_{\infty})/(\eta_0 - \eta_{\infty})$ versus $\dot{\gamma}$ em um gráfico log-log), e λ é a constante de tempo. O gráfico dessa equação está representado na Fig. 2.

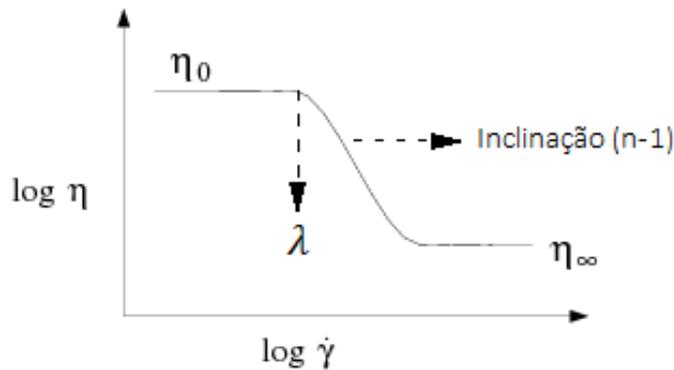


Figura 2: Variação da viscosidade com a taxa de cisalhamento de acordo com o modelo de Carreau. Destaque para os efeitos dos parâmetros “ n ” e “ λ ”.

2. Metodologia

Como mencionado, a geometria real que representa os *dead-ends* é complicada, portanto, de modo a facilitar os estudos, o modelo adotado consiste de duas placas paralelas separados uma distância c com uma microcavidade quadrada de lados c . A cavidade está a uma distância $2c$ da entrada do canal, e após $3c$ da cavidade encontra-se a saída do canal, tal como o apresentado na Fig. 3, onde $c = 1$ mm.

As condições de contorno utilizadas foram as seguintes

- Na entrada o escoamento é considerado previamente desenvolvido, sendo prescrito um perfil parabólico de velocidade

$$u = 6V_{med}(y - y^2) \quad (2)$$

- Nas paredes a velocidade é nula, logo

$$u = 0, v = 0, \tag{3}$$

- Na saída a pressão foi considerada nula.

Nesta configuração o fluido não-Newtoniano é injetado pelo lado esquerdo da Fig. 3, este fluido se movimentará ao longo do canal formado pelas placas paralelas procurando invadir a microcavidade, que se apresenta na forma de uma expansão / contração abrupta, para logo escoar ao longo das placas paralelas saindo pela face direita. A microcavidade contém o óleo retido o qual deve ser mobilizado. A eficiência do processo de recuperação (η) está associado com quanto desse óleo trapeado é deslocado pelo fluido injetado. De forma prática, nesta configuração 2D bastaria determinar a área inicial preenchida pelo óleo (A_{oi}) e a área final contendo óleo (A_{of}) após a injeção, de tal forma que $\eta = \frac{A_{oi} - A_{of}}{A_{oi}}$.

Entretanto, de tal forma a facilitar a simulação, neste trabalho não é considerado a presença do óleo, apenas o fluido injetado, por tanto a abordagem é monofásica. A determinação da eficiência do processo é obtida acompanhando a linha de corrente que separa o escoamento com a recirculação que se forma no interior da microcavidade. Nas Figs. 6 e 11 pode ser melhor visualizado esta explicação.

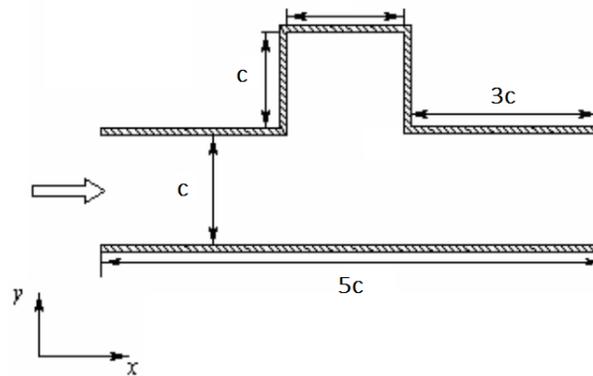


Figura 3: Modelo físico simplificado da microcavidade onde se processa o escoamento do fluido de Carreau-Yasuda.

Os parâmetros reológicos que definem os fluidos foram alterados entre as simulações de maneira que uma comparação entre os reais efeitos de cada um dos parâmetros separadamente fosse possível. Foram realizados 12 testes, com diferentes características. As características dos fluidos testados estão representadas nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1: Parâmetros do modelo de Carreau para fluidos do tipo 1.

Tipo do fluido	n	λ	η_0 , cP	η_∞ , cP
1.1	0,04	0,1	11,5	6
1.2	0,04	0,1	58	11,5
1.3	0,04	0,1	370	19
1.4	0,04	0,1	3.950	43

Tabela 2: Parâmetros do modelo de Carreau para fluidos do tipo 2.

Tipo do fluido	n	λ	η_0 , cP	η_∞ , cP
2.1	0,03	0,2	11,5	6
2.2	0,03	0,2	58	11,5
2.3	0,03	0,2	370	19
2.4	0,03	0,2	3.950	43

Tabela 3: Parâmetros do modelo de Carreau para fluidos do tipo 3.

Tipo do fluido	n	λ	η_0 , cP	η_∞ , cP
3.1	0,025	0,9	11,5	6
3.2	0,025	0,9	58	11,5
3.3	0,025	0,9	370	19
3.4	0,025	0,9	3.950	43

Os fluidos do tipo 1, quando comparados entre si, apresentam sempre os mesmos n e λ , assim como os do tipo 2 e 3 onde os parâmetros variados são somente η_0 e η_∞ .

A representação gráfica da variação da viscosidade com a taxa de cisalhamento para três fluidos representativos dos doze utilizados, é apresentada na Fig. 4 para diversos expoentes n e parâmetros λ . O fluido 3.1 que tem maior λ , é o primeiro a ser afetado pela taxa de cisalhamento, isto significa que a viscosidade diminui com taxas de cisalhamento muito baixas.

Para simular o fluxo do fluido no meio poroso foi utilizado o *software* FLUENT, com o comportamento não-Newtoniano inelástico governado pelo modelo de Carreau-Yasuda. A malha construída para a simulação possui 1.001 células, 2.092 faces e 1.092 nós, com uma razão de aspecto igual a 1,47646. O fluxo do fluido não-Newtoniano inelástico foi considerado bidimensional, isotérmico e permanente. O tempo necessário para cada simulação, nas condições supracitadas, foi de aproximadamente 23 segundos, sendo estabelecido o número máximo de iterações igual a 100.

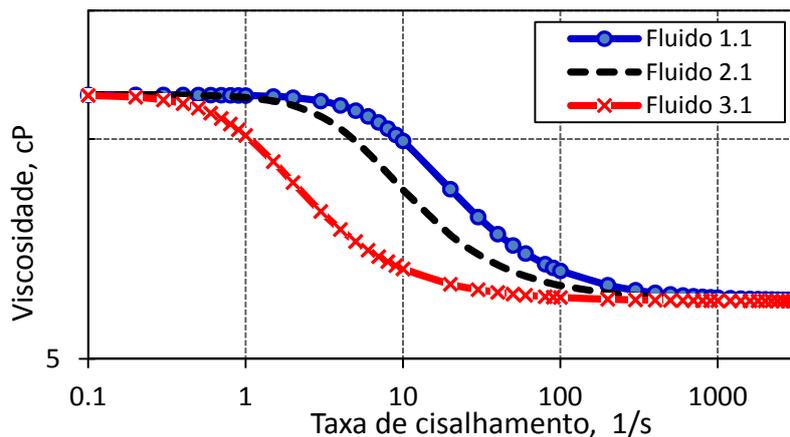


Figura 4: Viscosidade x taxa de cisalhamento para fluidos descritos pelo modelo Carreau-Yassuda com $\eta_0 = 11,5$ cP, $\eta_\infty = 6$ cP, n e λ descritos nas Tabelas 1, 2 e 3 respectivamente.

Como o interesse principal desse trabalho é avaliar o desempenho de fluidos não-Newtonianos inelásticos no deslocamento do óleo residual trapeado em microcavidades, uma linha foi traçada no centro do *dead-end* para que os valores de velocidade pudessem ser graficados em função da distância (y) no interior da cavidade (Fig. 5). Assim, as velocidades nas paredes $y = 0$ e $y = 2c$ são iguais a zero, enquanto que o centro do vórtice encontra-se entre os limites $c < y < 2c$. É importante salientar que a velocidade está normalizada em relação à velocidade média prescrita na entrada.

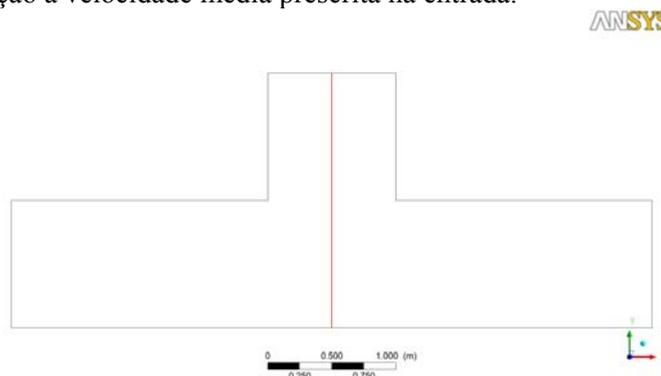


Figura 5: Linha de referência utilizada para apresentar os perfis de velocidade das Figs. 7 a 10.

3. Resultados e discussões

Os resultados obtidos mostram que o fluxo no interior da microcavidade origina vórtices. A velocidade e o centro desse vórtice é função dos parâmetros reológicos dos fluidos, da velocidade de entrada do fluido, bem como das características geométricas da microcavidade. Os vetores velocidade, independente de sua intensidade, foram todos apresentados do mesmo tamanho para facilitar a visualização do vórtice tal como mostrado na Fig. 6.

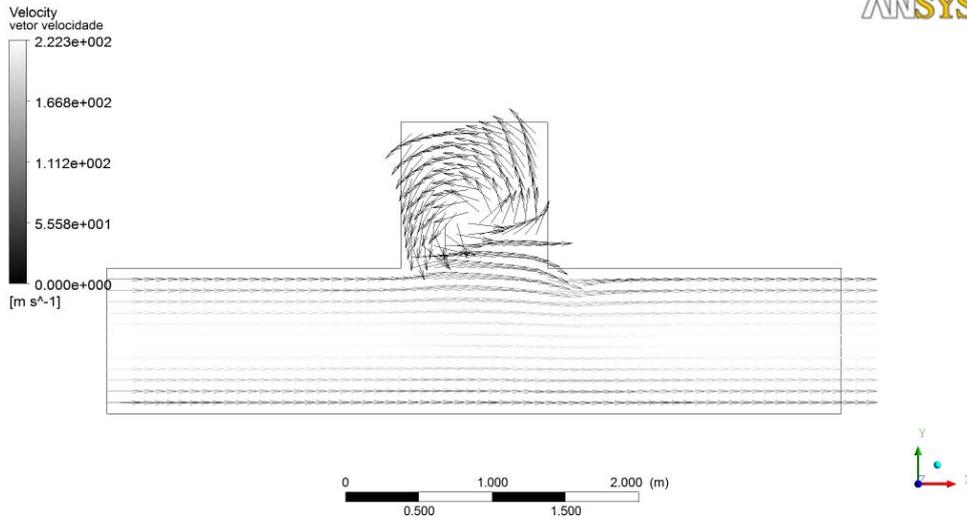


Figura 6: Vetores velocidade ao longo do canal e da microcavidade. Em destaque o vórtice formado.

As *Figs. 7, 8 e 9* contêm os perfis de velocidade medida ao longo da linha de centro vertical, obtida com os fluidos representados nas *Tabelas 1, 2 e 3* respectivamente. As posições $y = 0$ corresponde à parede inferior, $y = 1$ ao início da microcavidade e $y = 2$ a parede superior da microcavidade. O ponto onde a velocidade é nula representa o centro do vórtice, e quanto mais perto de $y = 2$ for localizado, significa que melhor é o processo de invasão e por consequência mais eficiente será a mobilização do óleo trapeado.

Pode-se perceber que os melhores resultados foram obtidos com os fluidos 1.1, 2.1 e 3.1, todos com $\eta_0 = 11,5$ e $\eta_\infty = 6$, para os quais o centro do vórtice aparece em posições superiores (aproximadamente $y = 1,35$ mm), indicando maior invasão da cavidade. Posterior comparação entre os melhores resultados mostrou uma superposição das curvas, indicando que a variação dos parâmetros n e λ não apresentou melhoras significativas.

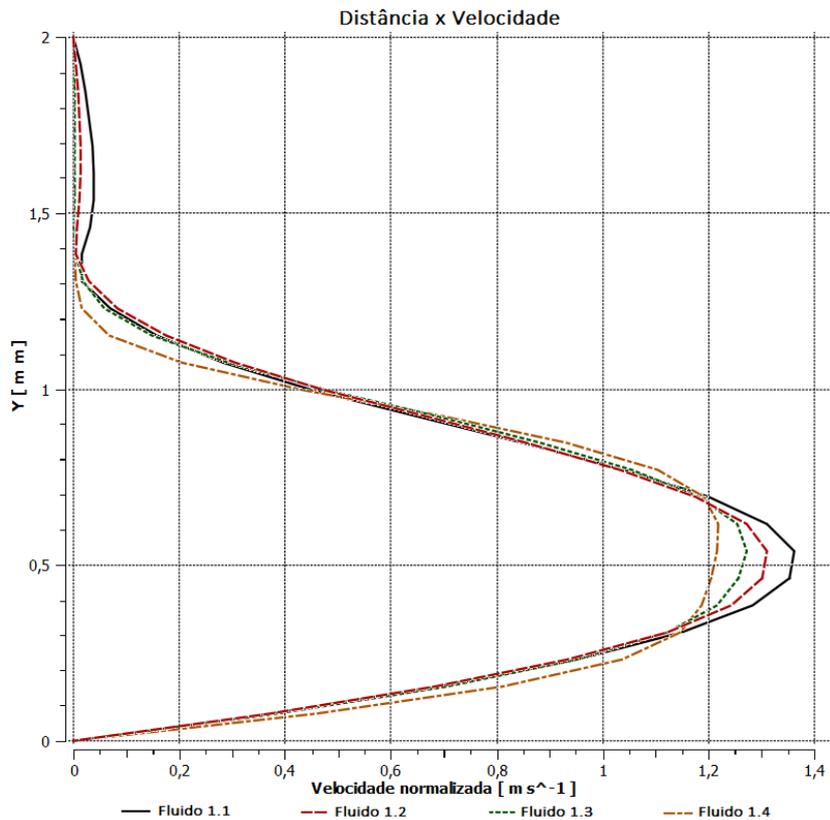


Figura 7: Perfis de velocidade ao longo da linha de centro obtidos com fluidos do tipo 1.

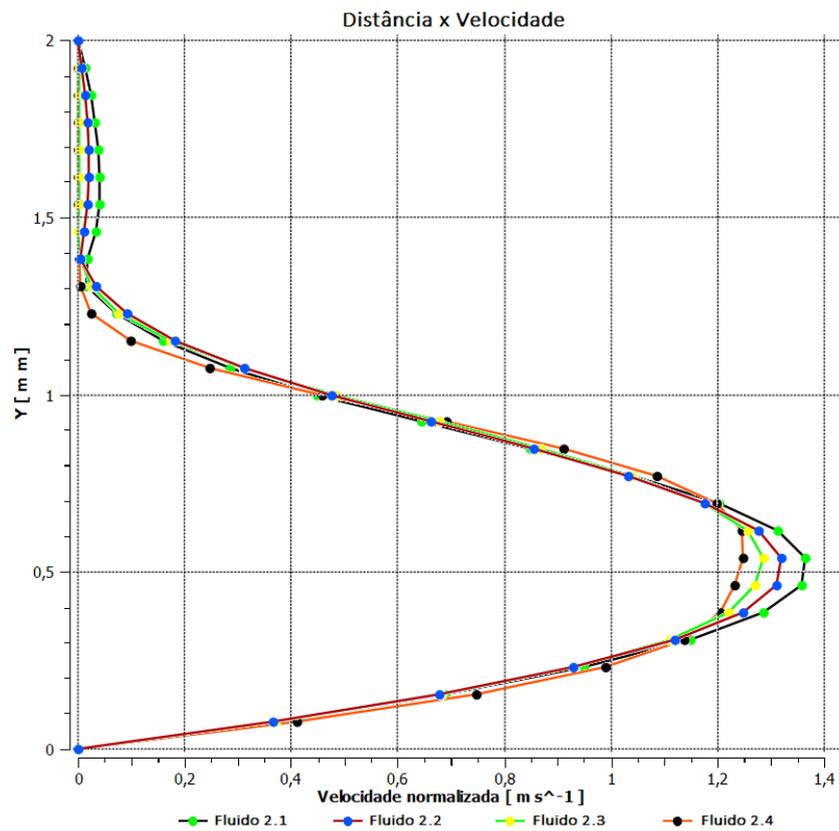


Figura 8: Perfis de velocidade ao longo da linha de centro obtidos com fluidos do tipo 2.

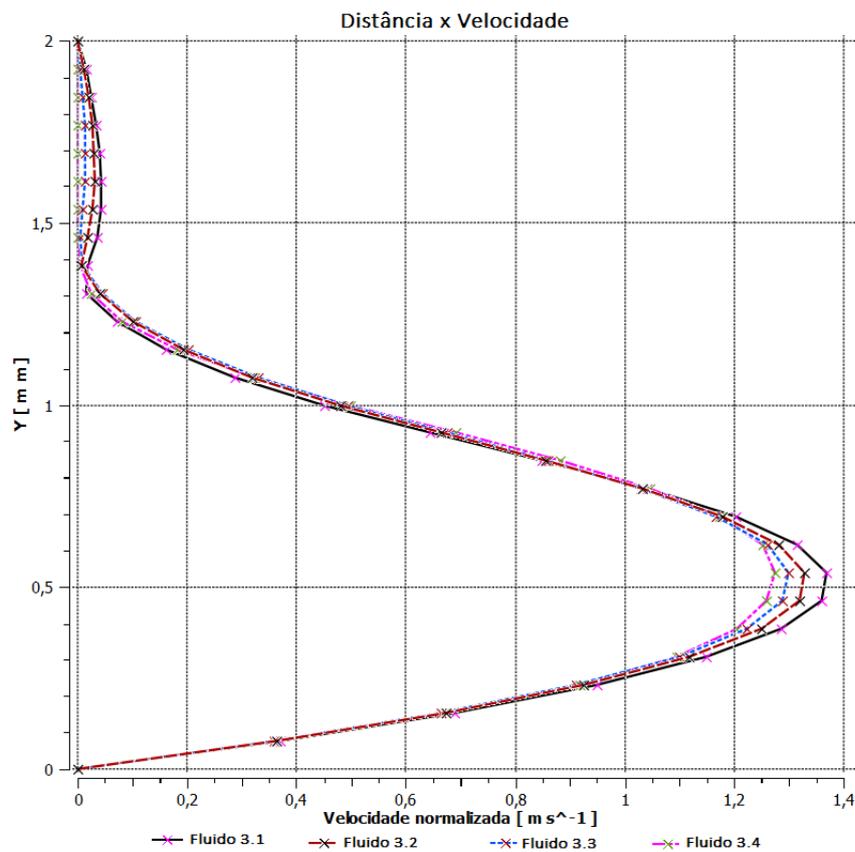


Figura 9: Perfis de velocidade ao longo da linha de centro obtidos com fluidos do tipo 3.

Por fim, o melhor resultado obtido com o modelo não-Newtoniano inelástico foi comparado com a resposta do fluido Newtoniano com viscosidade $\eta = \eta_0 = 11,5$ cP. A Fig. 10 mostra que o fluido

Newtoniano invadiu de maneira mais competente a cavidade, apresentando o centro do vórtice em posição mais elevada (aproximadamente $y = 1,4$ mm), quando comparado com o não-Newtoniano (aproximadamente $y = 1,3$ mm). Além disso, através das linhas de corrente das Figs. 11 e 12, percebe-se que a área invadida pelo fluido Newtoniano é maior.

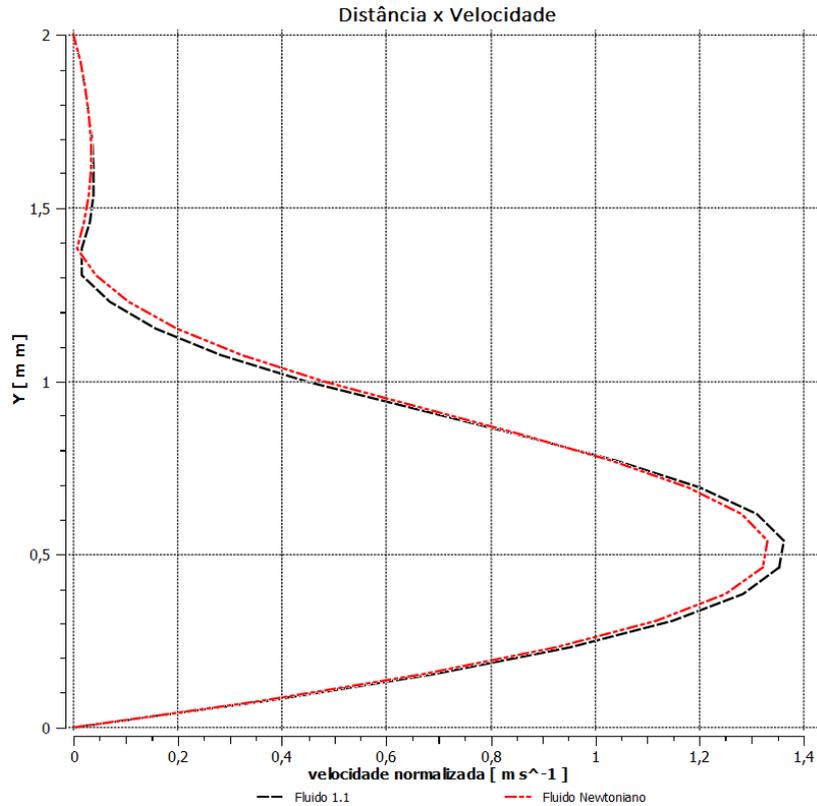


Figura 10: Comparação entre os perfis de velocidade de um fluido Newtoniano (linha tracejada vermelha) com o fluido 1.1.

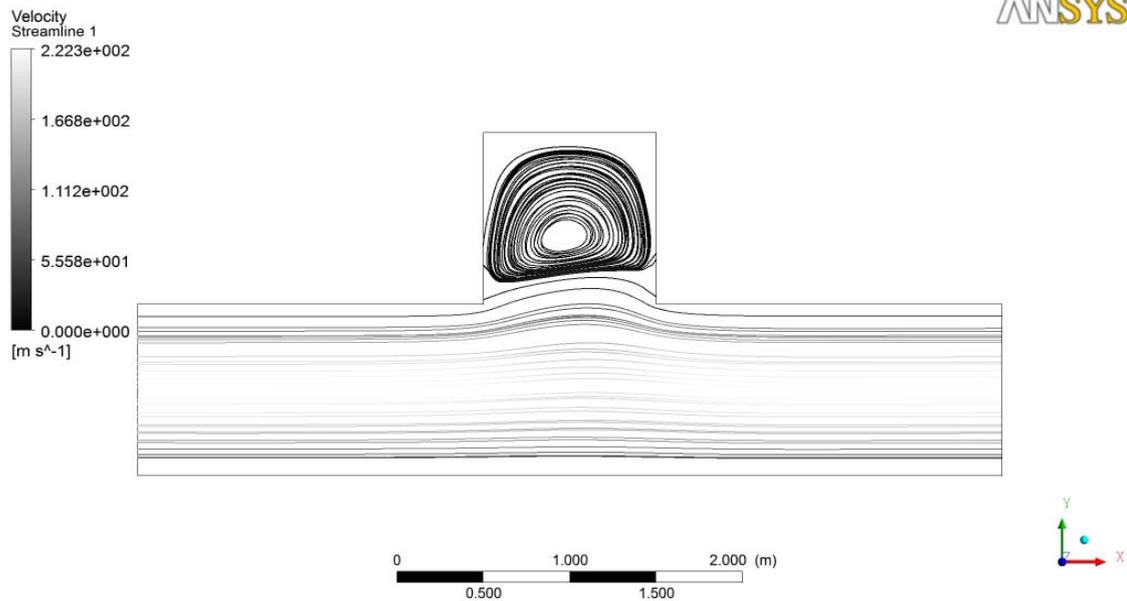


Figura 11: Linhas de corrente desenvolvidas com o fluido Newtoniano.

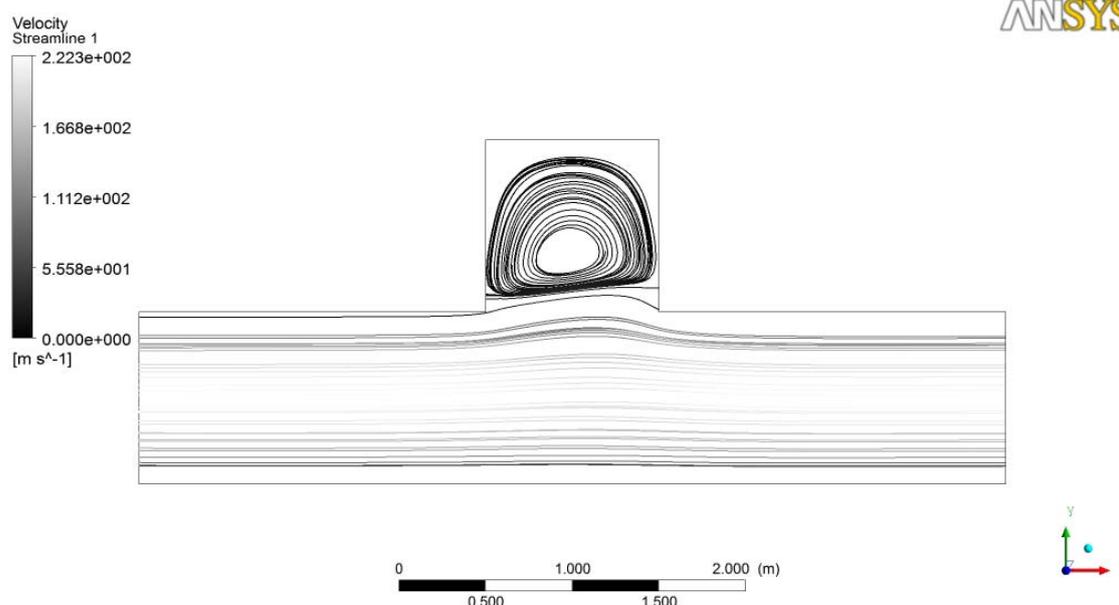


Figura 12: Linhas de corrente desenvolvidas com o fluido 1.1.

4. Considerações finais

Neste trabalho foi utilizado o modelo inelástico governado pelo modelo de Carreau-Yasuda para descrever o comportamento não-Newtoniano do fluido injetado. O estudo pretende avaliar a qualidade desse tipo de fluido para deslocar óleo trapeado em microcavidades ou *dead-ends*. Os resultados mostraram que a resposta com fluido Newtoniano é mais adequada que a de fluidos não-Newtonianos inelásticos, pois a área invadida pelo primeiro é maior, resultando no deslocamento de maior volume de óleo. Esse resultado reflete as características inelásticas do modelo e dos fluidos utilizados e o principal comportamento do modelo que é a diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento.

Este resultado é coerente uma vez que o comportamento das soluções poliméricas requer um modelo mais complexo para melhor capturar suas características elásticas, que são importantes neste tipo de estudo.

Portanto, como sugestão para trabalho posterior é a modelagem do fluxo de fluidos em meios porosos com a utilização de modelos que incorporem as características elásticas dos fluidos. O modelo de Shunk e Scriven $\eta_e(\dot{\gamma}) = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{[1 + (\lambda_e \dot{\gamma})^2]^{(1-n_e)/2}}$ pode ser incorporado em futuras análises.

Agradecimentos

Professor Oldrich Joel Romero agradece à FAPES pelo suporte financeiro concedido.

Referências bibliográficas

CROCHET M J, DAVIES A R, WALTERS K.: *Numerical Simulation of non-Newtonian flow*. New York: Elsevier Science Publisher B V, 1984: 85-120.

HESTER, R. D.; FLESHER, L. M.; MCCORMICK, C. L.: *Polymer Solution extension viscosity effects of polymer solutions for enhanced oil recovery*. Enhanced Recovery Symposium Tulsa, 1994: SPE/DOE 27823.

HUIYING, Z.; HONGIUM, Y.: *Numerical Simulation Study on Micro Sweep Efficiency of Viscoelastic Polymer Solutions Flow in Dead Ends*. International Conference on Energy and Environment Technology, 2009.

ROSA, A. J. *et. al.*: *Engenharia de Reservatórios de Petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2006. p. 832.

THIEN, N.: *Understanding Viscoelasticity*. Singapore: Mechanical engineering department. National University of Singapore, 2002.

WANG, D.M., *et al.* 2000. *Vicous-Elastic Polymer Can Increase Microscale Displacement Efficiency in Cores*. Paper SPE 63227-MS Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas,, U.S.A., 1-4 October.

YIN *et. al.*: *Flow Characteristics of Viscoelastic Polymer Solution in Micro-pores*. Paper SPE 154640 presented at the SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia Held in Muscat, Oman, 16-18 April 2012.

YIN *et. al.*: *Mechanism of Effect of Micro-Forces on Residual Oil Chemical Flooding*. Paper SPE 114335 presented at at the 2008 SPE Improved Oil Recovery Symposium Held in Tulsa. Oklahoma, U.S.A., 19-23 April 2008.

YIN *et. al.*: *Study Flow Behaviors of Viscoelastic polymer solution in Micropore With dead End*. Paper SPE 101950 presented at 2006 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio, Texas, U.S.A., 24-27-September 2006.

ZHANG, L.;YEU. X.: *Displacement of Polymer Solution on Residual Oil Trapped in Dead Ends*. China University of Petroleum, Beijing 102249, China, 2008.