

1

Introdução

1.1. Motivação

Um dos problemas mais desafiadores da nossa geração e possivelmente das seguintes, será tentar alongar o uso do petróleo como uma das principais fontes de energia no mundo. Obviamente isso passa por desenvolver processos e motores mais eficientes, diminuindo os desperdícios, como também a descoberta de novas jazidas petrolíferas. Não obstante, tentar aumentar o volume de óleo retirado dos reservatórios também é uma fronteira a ser explorada. Sabe-se que nos dias de hoje só é recuperado aproximadamente 20~45% da quantidade total do óleo armazenado dentro das estruturas geológicas onde o petróleo fica armazenado. Isto significa que no melhor cenário atual de exploração, podemos admitir que quando encerramos a produção de óleo em um campo, deixamos de extrair um volume de óleo igual ou maior do que foi explorado com a tecnologia atual de exploração.

O petróleo é acumulado em uma rocha porosa permeável. A geometria e dimensões do poro, a interligação entre eles (permeabilidade), as características do fluido, como viscosidade, composição química, etc..., interferem na migração do petróleo de uma região marginal do campo à região onde se localiza o poço produtor. Desta forma, a vida útil de um poço produtor e consequentemente do campo associado, depende fortemente de como o petróleo, vai migrar das regiões mais distantes para a zona produtora. Assim torna-se de vital importância a investigação de como ocorre este escoamento, e que parâmetros são mais significativos neste processo, para desta forma tentar otimizá-lo.

Existem hoje uma série de mecanismos artificiais que tentam aumentar o fator de recuperação de um campo, entre elas podemos citar:

- injeção de gás natural comprimido, para tentar manter a pressão original no campo produtor;
- injeção de água, para “empurrar” o petróleo para a região produtora;

- injeção de ácidos, para provocar fraturas e com isso aumentar a permeabilidade da rocha produtora;
- injeção de produtos químicos para alterar as características reológicas da água injetora, e aumentar sua mobilidade;
- Perfuração de poços horizontais;
- bombeamento multifásico (petróleo, gás e água), para aumentar a vazão de poços produtores, etc.

Em todas estas situações, estudos detalhados são realizados para potencializar tais medidas. A adição de produtos químicos na água injetora faz com que a água com aditivos (em geral, polímeros) tenha características não Newtonianas. O petróleo, por sua vez, pode ter já originalmente um comportamento não Newtoniano. O estudo de escoamentos de fluidos não Newtonianos em meios porosos se insere neste contexto. Um escoamento no interior de um meio poroso pode ser visto como um escoamento através de seções transversais com área variando entre um valor máximo, correspondendo ao poro, até um valor mínimo, correspondente à garganta do meio poroso.

Escoamentos de fluidos não Newtonianos têm sido foco de inúmeras atividades recentes de pesquisa, motivados principalmente por indústrias químicas, de alimentos e petrolíferas. Estas indústrias têm no seu dia-dia que lidar com estes tipos de fluidos e seus escoamentos. Estes tipos de escoamentos são comumente achados em nosso cotidiano, embora muitas vezes não sejam percebidos como tal, sendo simplificados ou confundidos, em sua maioria, como um escoamento de um fluido Newtoniano.

Podemos citar como exemplos de fluidos não Newtonianos, tintas, graxas, plásticos, chocolates, iogurtes, petróleo, lamas de perfuração e completação de poços de petróleo, entre outros.

Uma das características dos fluidos não Newtonianos é a variação da viscosidade com a taxa de deformação. Assim, ao longo de um escoamento isotérmico, o fluido apresentará diferentes níveis de viscosidade. Obviamente, este comportamento torna a análise dos escoamentos bem mais complexa do que no caso Newtoniano.

Além deste comportamento, os fluidos não Newtonianos possuem diferentes características entre si. Como exemplo pode-se citar as características elásticas

presentes em alguns fluidos e as variações da viscosidade com o tempo de deformação no escoamento. Assim, não existe uma única equação constitutiva para modelar os fluidos não Newtonianos. Na verdade, existem inúmeras equações constitutivas, e muitas outras ainda vêm sendo pesquisadas. Dentre as equações constitutivas, está a equação constitutiva de fluido Newtoniano Generalizado. Neste caso, o comportamento mecânico do fluido é dado pela seguinte expressão:

$$\boldsymbol{\tau} = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (1.1)$$

onde $\boldsymbol{\tau}$ é o tensor das tensões, $\dot{\gamma}$ é o tensor taxa de deformação, definido como: $\text{grad } \mathbf{v} + (\text{grad } \mathbf{v})^T$, sendo $\mathbf{v}$ o vetor velocidade, $\dot{\gamma}$ é o modulo do tensor taxa de deformação, definido como: $\sqrt{0,5 \text{ tr } \dot{\gamma}^2}$ e η é a função viscosidade. Os fluidos não Newtonianos que se comportam segundo este modelo constitutivo são conhecidos como puramente viscosos. Porém, existem algumas situações em que este modelo fornece bons resultados mesmo que o fluido não seja somente puramente viscoso. Quando o escoamento é viscométrico por exemplo, as características elásticas do fluido não terão influência no escoamento, e a utilização do modelo de fluido não Newtoniano Generalizado fornecerá resultados satisfatórios mesmo para um fluido viscoelástico.

A função viscosidade deve representar o comportamento de cada fluido específico. Existem diversas expressões para a função viscosidade, que são determinadas empiricamente, de acordo com o comportamento do fluido num escoamento de cisalhamento. Por exemplo, pode-se citar algumas expressões mais utilizadas na literatura, que apresentam tensão limite de escoamento:

Modelo Power-Law (Bird et al., 1987):

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1.2)$$

Modelo de Ellis (Bird et al., 1987):

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\tau / \tau_{1/2})^{\alpha-1}} \quad (1.3)$$

Nos modelos apresentados acima temos que η é a função viscosidade, k é o índice de consistência, n é o índice “power law”, η_0 é o limite superior para a viscosidade, $\tau_{1/2}$ é o valor do módulo do tensor das deformações ($\sqrt{0,5 \text{ tr } \tau^2}$) onde a viscosidade é igual a $\eta_0 / 2$ e α é o expoente de potência.

Dentre os fluidos que se comportam como Newtoniano Generalizados, estão os que são conhecidos como fluidos viscoplásticos. A característica principal deste tipo de fluido é a presença de uma tensão limite de escoamento. Acima da tensão limite de escoamento o material comporta-se como líquido, e abaixo, como sólido. Atualmente, na verdade, este tipo de comportamento vem sendo discutido com maiores detalhes. O que se tem observado, com a utilização de equipamentos mais sensíveis e mais precisos, é que a existência da tensão limite de escoamento pode ser questionada. Os instrumentos mais antigos não eram capazes de medir tensões/deformações abaixo dos valores limites (as deformações, por exemplo, seriam muito pequenas). Atualmente, instrumentos mais precisos indicam que, os materiais viscoplásticos escoam mesmo abaixo da suposta “tensão limite de escoamento”. O que ocorre realmente é que os níveis de viscosidade são bastante elevados nesta faixa de taxas de cisalhamento, e o fluido apresenta um comportamento bi-viscoso. Por outro lado, embora não correspondam inteiramente à verdade, os modelos com “tensão limite de escoamento” levam a resultados bastante satisfatórios.

Como exemplo de equações que caracterizam a função viscosidade de um material viscoplástico podemos citar os modelos de:

- Bingham (Bird et al., 1987):

$$\eta = \begin{cases} \infty & \tau \leq \tau_0 \\ \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu_p & \tau \geq \tau_0 \end{cases} \quad (1.4)$$

- Herschel-Bulkley (Bird et al., 1987):

$$\eta = \begin{cases} \infty & \tau \leq \tau_0 \\ \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1} & \tau \geq \tau_0 \end{cases} \quad (1.5)$$

- Carreau-Yasuda (Bird et al., 1987)

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{a}} \quad (1.6)$$

Nas equações acima, τ_0 é a tensão limite de escoamento, μ_p é a viscosidade plástica, k é o índice de consistência, η_0 é a viscosidade a baixas taxas de deformação, η_∞ é a viscosidade a altas taxas de deformação, λ é a constante de tempo, a é o coeficiente exponencial, n é o expoente, são parâmetros reológicos do material, obtidos empiricamente. Enquanto que os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley modelam o fluido com tensão limite de escoamento, caracterizando-o como um sólido para tensões abaixo deste valor, os modelos de Ellis e Carreau-Yasuda têm um comportamento bi-viscoso.

Este trabalho tem como objetivo analisar numericamente o escoamento axisimétrico de um fluido viscoplástico através de uma expansão e contração abrupta subsequente, em regime permanente. Escoamentos com estas características são comumente encontrados em engenharia, como em processos de extrusões, escoamentos em tubos de seções variáveis e meios porosos.