

1

Introdução

As jazidas de petróleo inicialmente têm uma quantidade finita de energia natural, denominada energia primária, que é uma função dos fluidos em compressão, da pressão e da temperatura no reservatório. A produção que aproveita essa energia é denominada recuperação primária. Durante a produção acontece uma diminuição dessa energia, o que leva a uma queda de pressão que pode afetar a produtividade do poço em algum momento.

Para diminuir esse efeito e produzir uma quantidade adicional de óleo, pode-se fornecer energia secundária ou reduzir as resistências viscosa e capilar do escoamento até o poço produtor. Esses métodos pertencem à denominada recuperação secundária, por exemplo a injeção de água é uma técnica muito utilizada. A recuperação secundária procura aumentar a eficiência da recuperação e acelerar a produção.

É importante ressaltar que a eficiência da recuperação primária é baixa, por isso, é importante projetar o uso de métodos de recuperação secundária, com eles pode-se obter uma eficiência de 30 a 50% na recuperação de óleos.

Segundo Rosa et al.[1], após o uso dos métodos secundários, também conhecidos como *métodos convencionais de recuperação secundária*, pode-se usar os métodos recuperação avançada de óleo ou *Enhanced Oil Recovery* como injeção de gás miscível, injeção de polímero, dentre outros métodos.

Porém, atualmente o termo recuperação melhorada de óleo ou *Improved Oil Recovery* utiliza-se para agrupar os métodos de recuperação avançada (EOR) e as técnicas não convencionais ou modernas, as quais mantêm o objetivo de aumentar a recuperação e acelerar a produção de óleo.

1.1

Métodos de recuperação avançada de óleo

Como já foi relatado, o método de recuperação secundária mais usado é a injeção de água. Embora a injeção de água permita recuperar uma parte importante do óleo, possui um limite técnico e econômico. Nesse caso, a aplicação de outro grupo de técnicas pode ser atrativo, buscando sempre aproveitar os equipamentos de superfície e evitar que os poços sejam abandonados ou tamponados.

O óleo recuperado pelos métodos de recuperação secundária são função da eficiência de varrido horizontal e a eficiência de deslocamento.

$$M = \frac{\text{Mobilidade fluido}_{injetado}}{\text{Mobilidade fluido}_{deslocado}} = \frac{\frac{k_w}{\mu_w}}{\frac{k_o}{\mu_o}} \quad (1-1)$$

De acordo com Rosa et al.[1], a eficiência de varrido é função direta da razão de mobilidade entre os fluidos, definida pela equação (1-1). A mobilidade de um fluido é a razão entre a permeabilidade efetiva a esse fluido e a sua viscosidade. Por exemplo, uma razão de mobilidades cinco significa que o fluido injetado (água) flui cinco vezes melhor que o fluido deslocado (óleo). Então, um dos propósitos da recuperação avançada é aumentar a eficiência do varrido através da diminuição da razão de mobilidades; para isso pode-se injetar polímeros (aumentar a viscosidade da água) ou aplicar calor ao reservatório (reduzir a viscosidade do óleo).

É importante mencionar que as zonas contatadas pela água ainda têm óleo aprisionado (gotas microscópicas), conhecido como óleo residual que fica no reservatório basicamente devido às forças capilares. Óleo residual representa de 60% a 90% de todo o óleo ainda no reservatório (depois da injeção de água), o resto deve-se às zonas não contatadas (não varridas). Por isso, a importância do desenvolvimento de técnicas avançadas que ajudem a recuperar o óleo residual como a injeção de fluido miscível, onde as forças viscosas dominam o fenômeno devido à ausência das forças capilares (não interface).

Rosa et al.[1] classificam os métodos de recuperação avançada como:

1. Métodos miscíveis

- Injeção de hidrocarbonetos
- Injeção de CO_2

2. Métodos térmicos

- Injeção de fluidos quentes (água ou vapor de água)
- Combustão “in - situ”

3. Métodos químicos

- Injeção de polímero
- Injeção de solução micelar
- Injeção de solução ASP (Álcali - Surfactante - Polímero)

4. Outros métodos

A implementação de qualquer dos métodos apresentados é baseada em um estudo econômico e técnico, levando em consideração por exemplo os custos dos fluidos injetados, as mostras tomadas no campo e simulação numérica do reservatório.

O método de interesse no presente trabalho pertence à classe dos métodos químicos de recuperação avançada, especificamente a injeção de emulsões. Segundo a literatura, a eficiência de recuperação é função das eficiências de varrido horizontal e vertical e da eficiência de deslocamento, que é função do número de capilaridade Ca definido como,

$$Ca = \frac{f_{viscosas}}{f_{capilares}} = \frac{\mu V}{\sigma}, \quad (1-2)$$

onde $f_{viscosas}$ e $f_{capilares}$ são as forças devido aos efeitos viscosos e da tensão interfacial, μ é a viscosidade de uma das fases, V é a velocidade média e σ é a tensão interfacial.

1.2

Revisão bibliográfica: Injeção de emulsões

De acordo com o relatado, a injeção de emulsões pertence aos métodos de recuperação avançada de óleo, ela tem recebido um importante interesse e portanto, um significativo desenvolvimento numérico - experimental.

Os primeiros trabalhos experimentais foram apresentados por McAuliffe[2]. Ele observou que a rápida canalização de água injetada no poço injetor até o poço produtor gera uma baixa recuperação do óleo que pode ser melhorada com a injeção de emulsões óleo/água, já que a medida

que um volume de emulsão entra nas zonas mais permeáveis, o fluxo começa a ser mais restrito e por isso a água começa escoar em novas zonas de baixas permeabilidades, incrementando a eficiência do varrido. Desta forma, o método pode diminuir a mobilidade do fluido injetado devido a um bloqueio dos poros. McAuliffe[2] também observou que a eficiência do bloqueio tem uma relação estreita como o tamanho da gota e o diâmetro característico das gargantas dos poros.

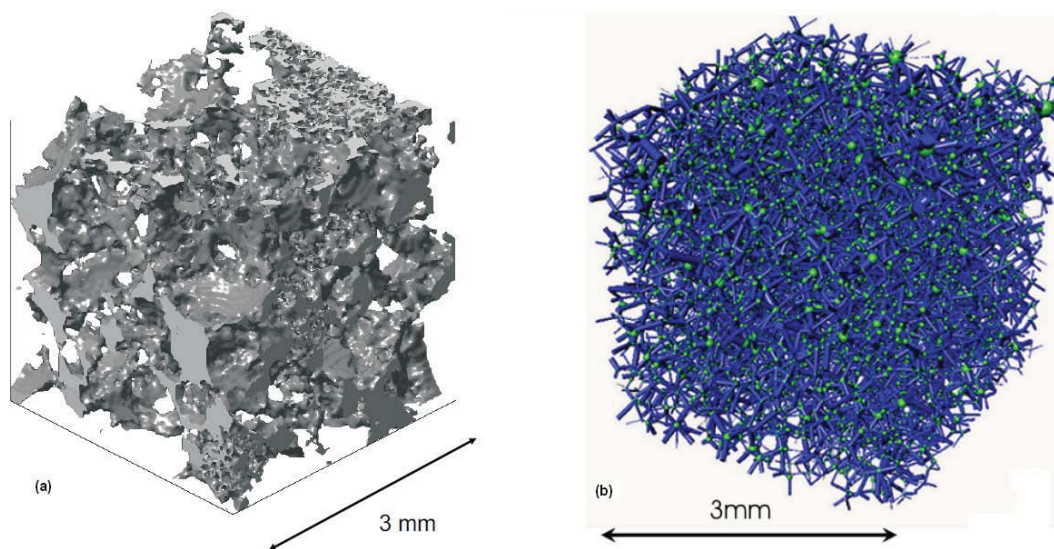


Figura 1.1: (a) Representação do espaço vazio no meio poroso e (b) modelo rede de capilares[3]

O comportamento macroscópico do escoamento através de meios porosos depende diretamente do escoamento na escala de poros. No trabalho de Oren e Bakke[3] estimou-se as propriedades físicas de uma amostra de rocha, como permeabilidade e pressão capilar através do entendimento do fenômeno em níveis microscópicos. Fotografias de seções do meio poroso foram utilizadas para construir um modelo de redes de capilares que representam o espaço poroso(ver figura (1.1)). No modelo de redes, os poros são representados por nós e as gargantas que conectam os poros são representados por capilares. Essa abordagem foi apresentada pela primeira vez por Fatt[4].

Para o perfeito entendimento de escoamentos de emulsões em meios poroso, é necessário o estudo detalhado deste escoamento na escala de poros. Nesta escala, a emulsão não pode ser tratada como um fluido contínuo já que as gotas da fase dispersa são de tamanho semelhantes às gargantas dos poros. A representação gráfica desta ideia aparece na figura (1.2). Desta forma, o objeto de estudo deste trabalho é o escoamento de uma gota imersa em um

fase contínua através de um capilar com garganta, que serve como modelo de uma garganta de poro.

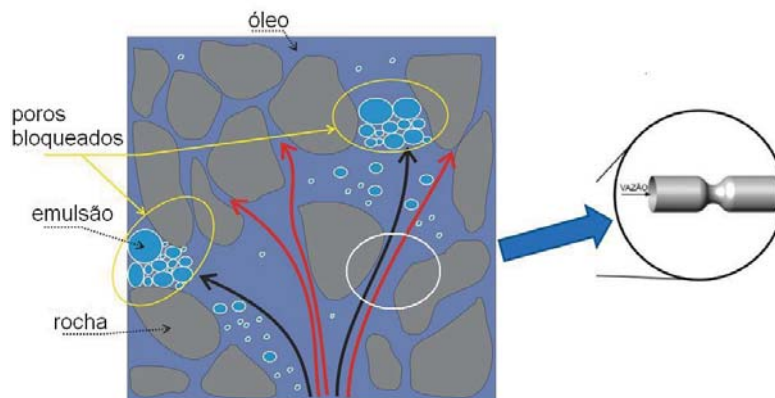


Figura 1.2: Representação do mecanismo de bloqueio e modelo do capilar com garganta[5]

O escoamento de uma gota através de um capilar reto ou com garganta é um problema clássico muito estudado na literatura através de experimentos e análises teóricas/numéricas. Ho e Leal[6] estudaram o escoamento de uma gota imersa em uma fase contínua através de um capilar, como é mostrado na figura (1.3). Eles descobriram a existência de um gradiente de pressão **extra** devido à presença da gota, que é função da razão de viscosidades e a vazão de entrada.

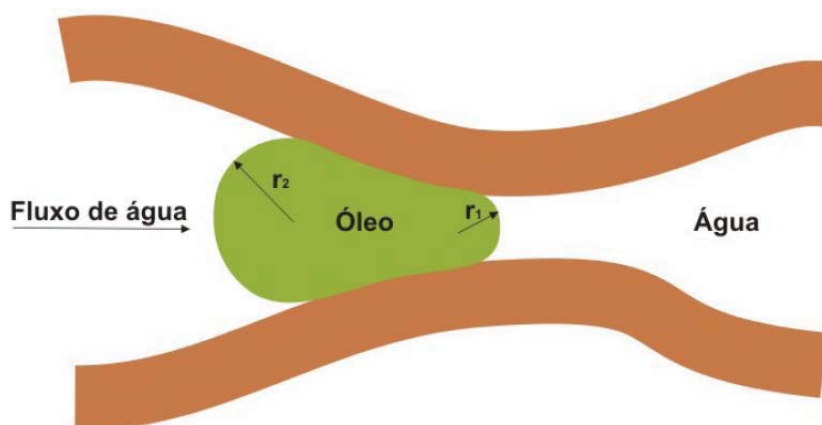


Figura 1.3: Mecanismo do bloqueio de poro[7]

Recentemente, Cobos et al.[8] analisaram também o problema experimentalmente e discutiram como a pressão variava quando a gota escoava no capilar com garganta, explicando um dos mecanismos do bloqueio.

Não foram poucas as simulações numéricas deste escoamento. Shen e Udell[9] usaram o método de elementos finitos para solucionar o escoamento de uma bolha semi-infinita através de um tubo reto. A posição da frente da bolha foi definida pelo balanço das forças de tensão interfacial e as forças viscosas e de pressão. Eles também estudaram o efeito do número de capilaridade Ca na forma da bolha. Martinez e Udell[10] também estudaram a dinâmica de uma gota em um capilar reto utilizando o método de integrais de fronteira, eles discutiram detalhadamente o efeito da razão de viscosidades, geometria da gota e número de capilaridade Ca na dinâmica da gota. Por isso, seus resultados serão utilizados para validar o modelo desenvolvido no presente estudo. Tsai e Miksis[11] também desenvolveram o modelo da gota usando o mesmo método, no entanto, eles adicionaram a geometria de um capilar com garganta. Além disso, estudaram o complexo mecanismo de quebra de gota.

Problemas com superfícies livres, onde o domínio físico não é conhecido a priori e faz parte da solução do problema, podem ser resolvidos numericamente por diferentes métodos. Nos métodos Lagrangeanos, pontos da malha são pontos materiais que se movem com o escoamento. Desta forma, os pontos da malha estão sempre localizados sobre a interface. A grande limitação destes métodos é a forte deformação que a malha pode sofrer.

Nos métodos Eulerianos, a malha é fixa e a interface deve ser **capturada** através de algum método. Estes métodos evitam a deformação excessiva da malha, porém introduzem erros na localização da interface e no cálculo da força capilar, que envolve o cálculo da curvatura da interface. Neste trabalho, utiliza-se um método Euleriano conhecido como método de curva de nível (**Level Set**). A posição da interface é definida por uma curva de nível.

Na sua tese de doutorado, Sussman[12] desenvolveu o método *Level Set* para determinar a interface de dois fluidos imiscíveis. Diferentemente dos métodos com malha móvel, a formulação com malha fixa é bem mais fácil de implementar, generalizar para problemas 3D e permite grandes deformações da interface. No entanto, existem importantes desvantagens em relação à perda da conservação de massa e a espessura finita da interface. Sussman et al.[13] também estudaram a simulação do escoamento ar - água com grande diferenças de massas específicas, efeitos da tensão superficial e da viscosidade. Tryggvason et al.[14] discutiram uma variedade de métodos para resolver escoamentos multifásicos, apresentando um método como um híbrido entre a captura e o acompanhamento, o qual utiliza uma malha estacionária para o

fluido todo enquanto a interface é acompanhada por outra malha.

A modelagem das forças na interface representa uma dificuldade adicional na utilização do método *Level Set*, Shepel e Smith[15] as modelaram como uma força distribuída no corpo concentrada em uma faixa perto da interface, para isso usaram uma função especial conhecida como delta δ , que é definida no seguinte capítulo.

1.3

Objetivos do trabalho

Os objetivos principais do trabalho são:

- Simular numericamente o escoamento de uma gota imersa em um líquido através de um capilar reto e com garganta usando o método de elementos finitos.
- Determinar a relação vazão - diferença de pressão em função da geometria do capilar, tamanho de gota, a razão de viscosidades entre a gota e a fase contínua, o número de capilaridade (vazão).

1.4

Roteiro da dissertação

O capítulo 2 discute a modelagem matemática do problema, ou seja, as equações que governam o escoamento bifásico, a conhecida equação de Navier - Stokes e a equação advectiva relacionada ao método *Level Set*.

O capítulo 3 é dedicado à descrição dos métodos numéricos usados para resolver o problema: método de elementos finitos para discretizar as equações, o método de Newton para solucionar a não linearidade das equações e o método de Euler implícito na parte transiente do problema.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados numéricos, é mostrado como a dinâmica da gota é influenciada pela razão das viscosidades entre as fases, geometria do capilar e o efeito da tensão interfacial.

As conclusões e os comentários finais são apresentados no capítulo final do trabalho.