

1. Introdução

Dentro das inúmeras estratégias de exploração de um determinado reservatório, a injeção de água é amplamente utilizada na indústria do petróleo por ser um método bastante eficiente de reposição da energia primária do reservatório que, a medida que a produção avança, vai sendo dissipada, sendo de fundamental importância a sua reposição para que se possam obter maiores fatores de recuperação. No entanto, existem alguns aspectos que precisam ser melhorados durante o processo de recuperação secundária, como a baixa eficiência de varrido volumétrico devido a frentes não uniformes de deslocamento e a tendência dos fluidos a escoar pelos poros maiores deixando quantidades substanciais de óleo preso no meio poroso. Esta deficiência geralmente ocorre devido à grande diferença de mobilidades entre a água e o óleo e às elevadas tensões interfaciais entre o fluido deslocante e o deslocado.

Uma vez que a exploração de um reservatório envolve altos custos e riscos, o desenvolvimento de estudos que possam agregar conhecimento de propriedades físicas da rocha bem como do comportamento dos fluidos dentro da mesma são de grande valia por estarem diretamente ligados à produtividade e eficiência dos reservatórios.

Para melhorar a recuperação de petróleo, surgem outras tecnologias de EOR (*EOR – Enhanced Oil Recovery*) usadas para promover novos mecanismos de deslocamento e viabilizar a produção de óleo de um dado reservatório. Tais métodos de recuperação avançada são classificados como: térmicos (injeção de vapor e combustão *in-situ*), miscíveis (injeção de gases miscíveis), químicos (injeção de soluções alcalinas, polímeros, surfactantes e emulsões), entre outros.

Dentro dos diferentes métodos de recuperação com grande capacidade de melhoria no controle da mobilidade do reservatório e que poderia trazer resultados favoráveis com sua aplicação, pode-se citar o processo de injeção de emulsões. Durante a injeção de emulsões, as gotículas da fase dispersa escoam pelos caminhos preferenciais deixados e varridos pela injeção de água. Estas gotas

bloqueiam parcialmente alguns poros, diminuindo a permeabilidade efetiva e fazendo possível o deslocamento do óleo residual nas zonas que originalmente eram menos permeáveis, trazendo assim um aumento na eficiência de recuperação, conforme mostrado na Figura 1.1.

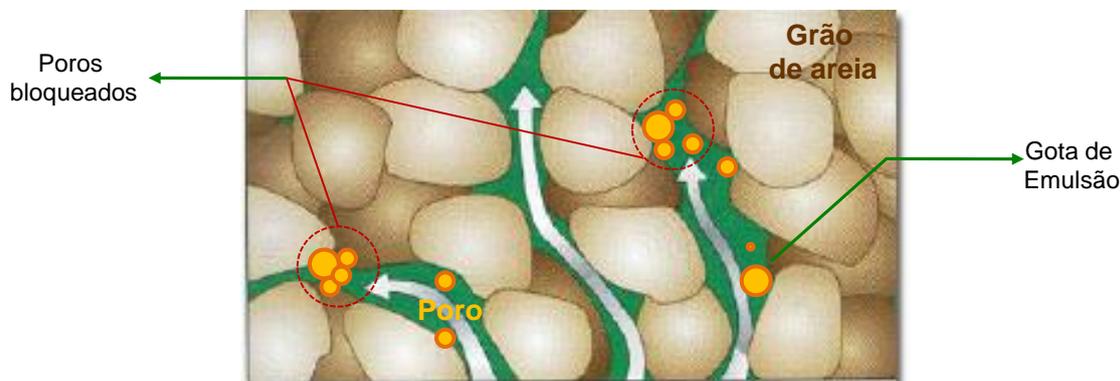


Figura 1. 1 Aglomeração e bloqueio de poros com gotículas da emulsão.

No entanto, o escoamento de emulsões em meios porosos é um processo altamente complexo e ainda não é totalmente conhecido. A visualização dos fenômenos que ocorrem na escala de poro certamente contribuirá significativamente para o melhor entendimento de como emulsões escoam no meio poroso e de como elas podem ser utilizadas eficientemente como um agente de recuperação melhorada. Baseados nisso, iniciaram-se trabalhos experimentais conduzidos em micromodelos, que são estruturas artificiais desenvolvidas para representar certas complexidades da estrutura porosa em determinada escala, e que proporcionam visualização dos processos de deslocamento, o que não é possível dentro de uma rocha real.

A principal vantagem de se trabalhar com micromodelos é que estes permitem a visualização de interações fluido-fluido e fluido-sólido, permitindo estudos detalhados do escoamento bifásico na escala de poro.

Com o intuito de ter um melhor entendimento do escoamento de emulsões através de um meio poroso, diversos autores (Cartmill and Dickey, 1969; McAuliffe, 1973; Alvarado e Marsden, 1979; Soo and Radke, 1984; Thomas and Farouq-Ali, 1989; Zeidani e Polikar, 2008) estudaram extensivamente o processo, através de estudos experimentais em meios porosos, capilares e micromodelos. Em seguida, é apresentada uma revisão bibliográfica dos diferentes trabalhos

realizados na área de escoamento de emulsões, estes trabalhos serviram de base para conseguir estudar e visualizar o processo de deslocamento de óleo através da injeção de emulsões óleo em água em um micromodelo.

1.1 Escoamento de Emulsões em Meios Porosos

Visando diminuir as incertezas na compressão do escoamento de emulsões em meios porosos, Cartmill e Dickey (1969) realizaram estudos em micromodelos compostos de esferas de vidro distribuídas em uma espécie de sanduíche (*Glass beads*) com diferentes valores de permeabilidade em série. Os resultados dos experimentos mostraram uma significativa redução na permeabilidade do micromodelo, devido a uma considerável retenção de gotículas de óleo na união entre duas zonas com permeabilidades diferentes. Da mesma forma, foi observado um fenômeno de agregação de gotículas ou floculação nos poros, gerando uma emulsão mais concentrada e com maior tendência à coalescência.

McAuliffe (1973) propôs o conceito de redução da permeabilidade devido ao escoamento de emulsões num meio poroso. Sua teoria considera uma gota de óleo de uma emulsão, entrando numa garganta de poro de dimensão menor do que a gota, como mostrado na Figura 1.2.

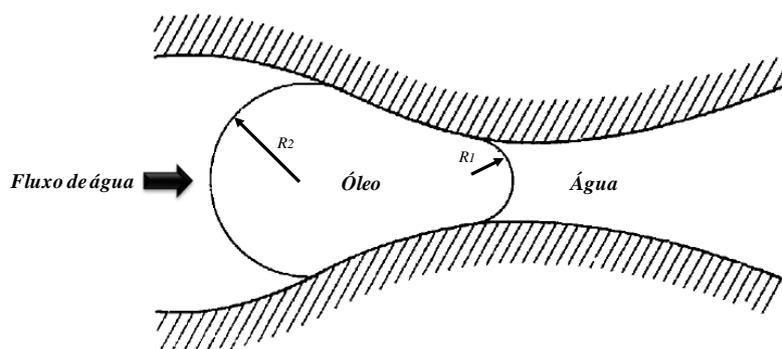


Figura 1. 2 Representação do fenômeno de Bloqueio. (McAuliffe, 1973)

Pode-se observar que o raio de curvatura da região frontal da gotícula é menor do que o da região de trás da gota, isto faz com que a pressão capilar, que é inversamente proporcional ao raio de curvatura, na frente da gota seja maior do que atrás da gota. Portanto, é necessária uma pressão maior para forçar a gota

escoar pela constrição. Esta pressão Laplaciana requerida para deslocar a gota através da garganta do poro é dada pela seguinte expressão:

$$\delta P = 2\sigma \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (1.1)$$

onde σ é a tensão interfacial e r_1 e r_2 , os raios de curvatura da parte dianteira e posterior da gotícula, respectivamente. De acordo com Schraam (1996), se a diferença de pressão ao longo do poro é menor do que a fornecida pela equação 1.1, a gotícula de óleo pode provocar um bloqueio do escoamento na garganta de poro. Este fenômeno, conhecido como Efeito Jamin (Jamin, 1860; Gardescu, 1930) estabelece o princípio de McAuliffe (1973) na teoria de redução da permeabilidade em meios porosos.

Posteriormente, no trabalho de Alvarado e Marsden (1979) foi estudado o escoamento de emulsões óleo em água através de capilares e meios porosos, focando seus resultados na análise do comportamento reológico das emulsões. De acordo com seus resultados, encontraram que para uma faixa de 5-50% de concentração de óleo, as emulsões apresentam comportamento Newtoniano, enquanto que para valores de concentração acima de 50% comportam-se como fluidos pseudoplásticos. O valor associado com a transição de newtoniano a não Newtoniano depende fortemente da concentração do surfactante utilizada. Do mesmo modo, foi considerada a emulsão como um fluido homogêneo, onde o tamanho médio das gotículas influencia fortemente na viscosidade da emulsão.

Nos ensaios laboratoriais realizados por Soo e Radke (1984a, 1985), emulsões estáveis diluídas de óleo em água foram injetadas em pacotes de areia com características controladas. Os autores propõem uma teoria de filtração, onde o mecanismo de captura de gotas no meio poroso é devido a dois processos de retenção, chamados deformação (*straining*) e interceptação (*Interception*), conforme esquematizado na Figura 1.3.

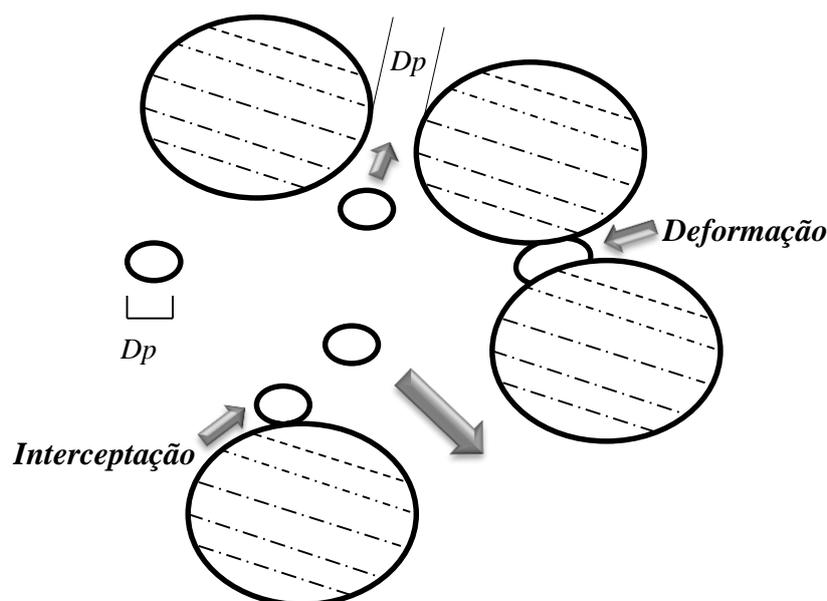


Figura 1. 3 Mecanismos da injeção de emulsões no meio poroso. (Soo and Radke, 1984)

No mecanismo de atração (*straining*), a captura de gotas é atribuído a forças elétricas, hidrodinâmicas e van der Waals. No mecanismo de interceptação (*interception*) a gotícula de óleo, um pouco maior que a garganta de poro, flui até a garganta e fica obstruída pelas forças capilares. A reentrada de gotas pode ocorrer devido a altos gradientes de pressão. De acordo com suas observações, existe não somente a possibilidade de deformação das gotinhas (permitindo, por exemplo, sua passagem por uma abertura de garganta menor que seu diâmetro original), mas também, no limite dessa deformação, sua quebra em partículas menores, o que alteraria a distribuição de tamanho de gotas fluindo no interior do meio poroso, com relação à distribuição original injetada. Em outro trabalho, Soo e Radke (1984b) estudaram os efeitos da velocidade no escoamento de emulsões através de meios porosos, citando a relação entre as forças hidrodinâmicas (viscosas) e as forças capilares como determinante para o nível de ocorrência desses eventos.

Khambaratana *et al.* (1998) conduziu experimentos em amostras de arenito com o intuito de entender os mecanismos físicos associados durante a injeção de emulsões com tamanho médio de gotas comparáveis com tamanhos de poro. Os estudos mostraram alta variabilidade na reologia da emulsão durante sua injeção no meio poroso. Também foi observado que a captura das gotículas da fase

dispersa da emulsão, ocorre devido a um processo de filtração, fenômeno proposto por Soo and Radke (1984).

1.1.1 Escoamento de Emulsões em Capilares

Cobos *et al.* (2007) desenvolveram estudos experimentais e análise numérica para avaliar o escoamento de emulsões óleo em água através de um capilar de 200 μm de diâmetro, com garganta de 50 μm ; conforme pode ser visto na Figura 1.4. Os experimentos consistiram na visualização microscópica do escoamento e da medição de pressão em função da vazão para diferentes tipos de emulsões (para o estudo do efeito de tamanho de gota usaram-se emulsões com a mesma concentração e diferentes tamanhos de gotas).

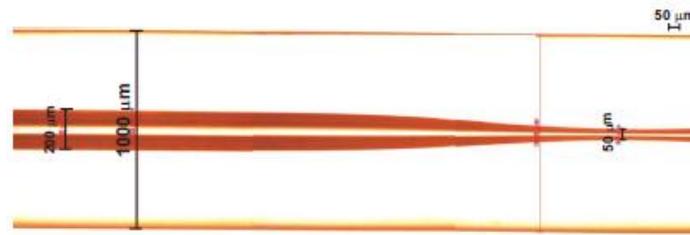


Figura 1. 4 Seção interna do capilar com garganta. (Cobos, 2007)

Baseados em estes estudos, foi encontrado que para altas vazões de injeção, as forças viscosas predominam e isto dificulta o bloqueio dos poros. Já em vazões pequenas, as forças capilares são mais importantes e, conseqüentemente, é mais difícil deformar a gota, facilitando o bloqueio, conforme mostrado Figura 1.5.

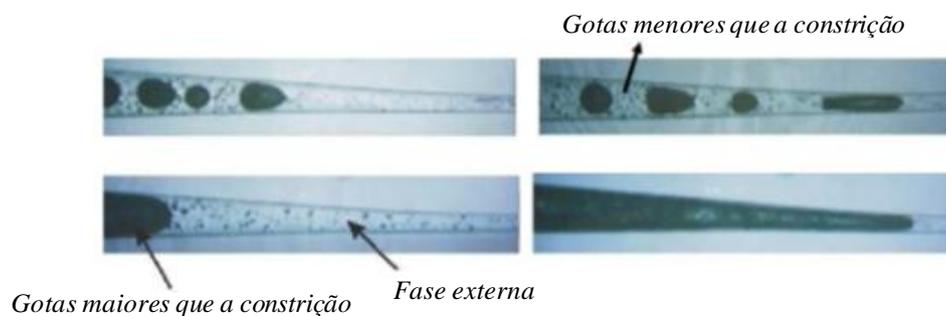


Figura 1. 5 Sequência de imagens no escoamento de emulsão através do capilar com constrição. (Cobos, 2007)

Também se observou que as emulsões com tamanhos médios de gota menores que a constrição do capilar produzem uma relação linear entre a queda de pressão e a vazão, sendo assim que o diâmetro de gota da emulsão não influi na resposta. Nestes casos, a resposta é só função da viscosidade aparente da emulsão. Para os casos em que o tamanho médio das gotas é maior que o tamanho da constrição, a queda de pressão é uma forte função da tensão interfacial, da vazão e da razão entre o tamanho das gotas e o diâmetro do poro.

1.1.2 Escoamento de Emulsões em Micromodelos

Estudos desenvolvidos por Zeidani e Polikar (2008), tiveram como objetivo investigar a aplicação de emulsões como agentes de bloqueio, na recuperação de poços de gás abandonados considerados como os maiores emissores de gás no ambiente. De tal modo, foram realizados dos tipos de experimentos; o primeiro deles, consistiu na visualização dos mecanismos de captura das gotículas da emulsão em um micromodelo composto por esferas de vidro (*bead packs*) através de duas placas planas (Figura 1.6) e o segundo experimento foi conduzido para o monitoramento do frente de avanço da emulsão, quantificação do incremento na pressão de injeção e redução da permeabilidade durante o processo de injeção de emulsões. O procedimento experimental envolveu a preparação e caracterização de emulsões óleo em água variando a concentração do surfactante.



Figura 1. 6 (a)Captura de Gotas (b) Acumulação de Gotículas e (c) Coalescência de gotas no meio poroso. (Zeidani and Polikar, 2008)

Foi notado que a razão entre o raio das gotas da fase dispersa (óleo) e o raio da constrição ou garganta de poro, assim como a concentração do surfactante desempenham um papel importante no mecanismo de captura de gotas. Da mesma forma, foi observado que altas vazões de injeção, as gotas menores do que as gargantas fluem rapidamente e facilmente sem apresentar uma variação significativa na pressão em função do tempo. No entanto, a baixas vazões de injeção apresentou-se uma maior deposição de gotinhas nos poros.

Guillén *et al.* 2007 realizaram experimentos em diversos meios porosos conectados paralelamente com diferentes permeabilidades, incluindo uma visualização do escoamento de emulsões através de um meio poroso transparente, formado por esferas de vidro não consolidadas. As visualizações mostraram como as gotinhas da fase dispersa da emulsão bloqueiam os poros mais permeáveis, permitindo assim o varrido de outras áreas ainda não atingidas, o que levou a uma mudança na saturação residual de óleo. Na Figura 1.7, pode-se observar uma gota (cor vermelho) de diâmetro similar ao tamanho da garganta sendo retida e bloqueando parcialmente a garganta de poro formada por duas esferas de vidro. Esta gota tem tamanho similar ao tamanho da garganta, mas depois de pouco tempo acabou se deformando devido a um aumento da pressão, conseguindo passar através da garganta.



Figura 1. 7 Processo de aglomeração das gotas de emulsão O/A, em um meio poroso de vidro.

Em um experimento posterior, foi possível observar uma mudança do caminho preferencial dos fluidos deslocantes, mediante a aglomeração e bloqueio parcial dos poros mais permeáveis com gotas da fase dispersa da emulsão. O bloqueio parcial dos poros diminuiu consideravelmente o fluxo através deles, conforme mostrado na Figura 1.8, fazendo um varrido mais eficiente do óleo.

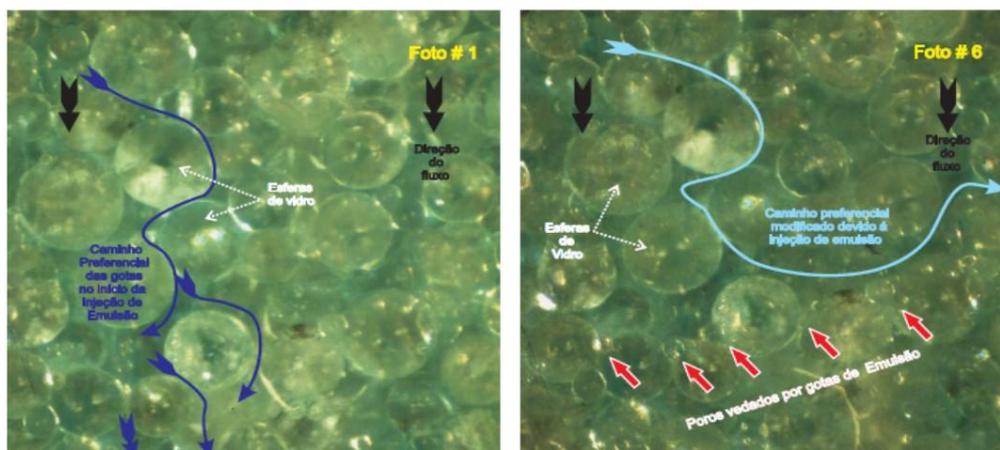


Figura 1. 8 Visualização da mudança do caminho preferencial dos fluidos deslocantes mediante o bloqueio parcial dos poros mais permeáveis com emulsão.

1.2 Objetivos e Escopo da Dissertação

Nesse trabalho de dissertação teve-se como principal objetivo estudar e visualizar experimentalmente o processo de deslocamento de óleo por injeção de emulsões diluídas de óleo em água através de um meio poroso e a aplicação destas emulsões como agentes de bloqueio e controle de mobilidade. Assim, foi utilizado um micromodelo fabricado em vidro, onde foram realizados experimentos de escoamento bifásico, avaliando o efeito da capilaridade tanto na eficiência do processo de deslocamento quanto na resposta do fator de recuperação. Foi também analisada a influência da molhabilidade, que está associada não somente aos fluidos, mas também ao material do qual foi feito o micromodelo.

O entendimento do processo de escoamento de emulsões em meios porosos, possui como objetivo, aumentar a compreensão e obter um melhor conhecimento do processo de injeção de emulsões, o qual irá contribuir no desenvolvimento da técnica como processo de recuperação avançada de petróleo.

1.3 Roteiro da Tese

Esta dissertação está dividida em 5 Capítulos, sendo que neste primeiro foi feita uma breve introdução, bem como uma apresentação da motivação para este estudo e objetivos do mesmo. Em seguida, O Capítulo 2 apresenta uma revisão de alguns

conceitos básicos necessários para uma correta compreensão do trabalho, e uma revisão bibliográfica relacionada aos micromodelos e sua utilização em estudos de escoamento bifásico. No Capítulo 3, apresenta-se a descrição da bancada experimental, assim como também os procedimentos experimentais seguidos. No Capítulo 4 será feita uma apresentação dos resultados obtidos dos experimentos realizados. Por fim, no Capítulo 5 serão levantadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.