

1 Introdução

A modelagem do processo de filtração durante o transporte de partículas através do meio poroso é de grande importância científica e industrial. Muitas aplicações podem ser identificadas em áreas como petróleo, química e engenharia ambiental.

Durante o transporte de uma suspensão particulada através de um meio poroso, as partículas podem ser capturadas. Esse processo, conhecido como filtração profunda, pode causar dano à formação (queda de permeabilidade). O entendimento do processo de filtração profunda é essencial para tecnologias industriais e ambientais tais como injeção de água em reservatórios de petróleo, filtração de água, transporte de poluentes no subsolo, etc.

Quase toda operação (perfuração, cimentação, injeção de fluidos, etc.) em poços de petróleo é uma fonte de dano à formação (redução de permeabilidade). Danificar a formação implica em queda de produtividade e/ou injetividade. Para evitar as dificuldades e o alto custo envolvido na recuperação de uma formação danificada é necessário minimizar o dano à formação.

Durante a produção de petróleo a pressão no reservatório tende a diminuir. Conseqüentemente, haverá um declínio de produção. Devido a este fato, torna-se necessário injetar fluidos no reservatório que, além de manter a pressão, também têm a função de deslocar o óleo (ou gás) em direção ao poço produtor.

Em poços marítimos (“offshore”) de petróleo, devido à facilidade de captação, injeta-se água do mar. Esta água contém partículas que podem ser capturadas no interior do meio poroso, diminuindo a permeabilidade da rocha e causando um grande impacto industrial. De acordo com Shecaira et al. (2002), a injeção de água (ver Figura 1) é a principal tecnologia aplicada em campos marítimos, sendo empregada em aproximadamente 74% do petróleo produzido no Brasil. Em 2002, o volume de água injetado excedia 140 milhões de litros por dia ($140 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{dia}$) e a produção de água alcançava cerca de 52 milhões de litros por dia ($52 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{dia}$). Em 2006, aproximadamente 500 milhões de litros

($500 \times 10^3 \text{ m}^3$) de água do mar devem ser injetados diariamente em campos brasileiros.

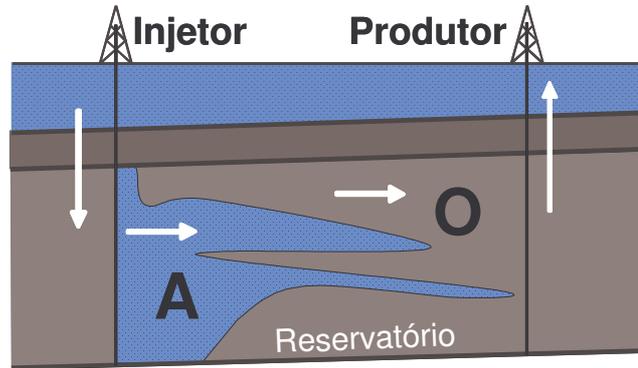


Figura 1: Esquema mostrando a injeção de água num reservatório de petróleo.

Embora a expressão “gerenciamento de água” seja bem conhecida, o comportamento da queda de injetividade deve ser precisamente entendido para permitir uma comparação consistente entre as duas opções: realizar um bom tratamento da água e necessitar de poucas intervenções (paradas na produção para a recuperação da injetividade) ou, ao contrário, injetar água com pior qualidade (maior teor de sólidos, por exemplo) e fazer freqüentes intervenções.

De modo geral, o declínio na injetividade ocorre devido ao entupimento do meio poroso, que pode ocorrer devido a vários mecanismos:

- a) Exclusão pelo tamanho: ocorre quando uma partícula encontra um poro de raio menor que o dela (Figura 2a);
- b) Deposição: devido às forças gravitacional e elétrica, as partículas podem ser desviadas da trajetória sugerida pelas linhas de fluxo e depositadas no interior do meio poroso (Figura 2b);
- c) “Bridging”: ocasionado pelo acúmulo de várias partículas nas gargantas dos poros. Neste caso, as partículas são menores que a garganta. Este processo é favorecido pelo aumento da deposição de partículas nas gargantas dos poros (Figura 2a);
- d) Difusão: devido à difusão, ocorre um aumento da probabilidade de partículas brownianas serem capturadas (Figura 2c).

A efetividade de cada mecanismo de captura de partículas depende das forças de interação entre o meio poroso, o fluido injetado e as partículas suspensas (Sharma e Yortsos, 1987a).

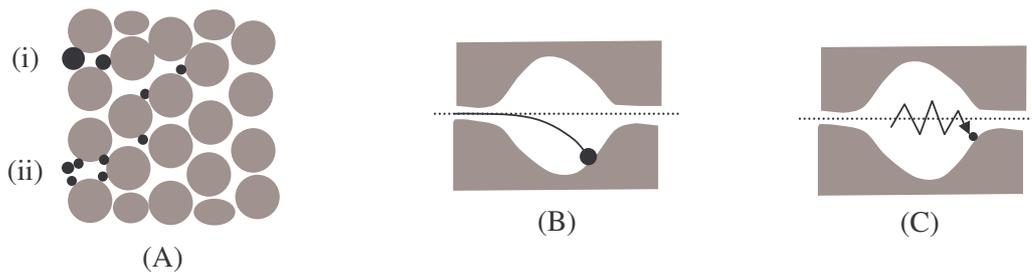


Figura 2: Mecanismos de captura de partículas: (A) Exclusão pelo tamanho (i) e “bridging” (ii); (B) deposição; (C) movimento browniano de uma partícula sobre uma linha de fluxo.

Em um processo de filtração, parâmetros como a velocidade, a concentração de partículas, a distribuição do tamanho de partículas, a distribuição de tamanho de poros, as energias de interação (partículas-partículas e partículas-poros) e a composição do fluido e das partículas injetadas, podem determinar o(s) mecanismo(s) de retenção de partículas mais efetivo(s) (Imdakh e Sahimi, 1987, Chauveteau et al., 1988, Herzig et al., 1970, Sharma e Yortsos, 1987a).

Desta forma, a modelagem da retenção de partículas será diferente para diferentes valores dos parâmetros relevantes em cada processo. Para velocidade alta, por exemplo, os efeitos da difusão molecular e da deposição tornam-se menos efetivos (Chauveteau et al., 1998).

Um modelo fenomenológico para captura de partículas, com conseqüente queda de permeabilidade, foi proposto por Iwasaki (1937) e utilizado na teoria de filtração (Herzig et al., 1970) e na previsão do declínio de permeabilidade de rochas (Bedrikovetsky, 2001, Pang e Sharma, 1997).

O modelo mencionado acima assume que a cinética de captura é linear, e exibe uma boa concordância com testes laboratoriais. Portanto, pode ser utilizado para fins de previsão, como a determinação da “perda de injetividade” baseado em testes laboratoriais.

Entretanto, este modelo não distingue entre os diferentes mecanismos de dano à formação. Além disso, o modelo incorpora um coeficiente de filtração fenomenológico e não inclui parâmetros físicos reais tais como tamanho de poros e de partículas em suspensão, cargas elétricas, etc. Conseqüentemente, o modelo não pode ser utilizado para propósitos de diagnóstico baseado em parâmetros

físicos reais, tais como previsão da queda de injetividade baseado em dados de tamanho de poros e de partículas.

No caso do mecanismo de exclusão pelo tamanho, quanto maior o tamanho das partículas e menor o tamanho dos poros, mais intensa é a captura de partículas e maior é o dano à formação. Entretanto, muitas tentativas de correlacionar o dano à formação com os tamanhos das partículas e dos poros fracassaram (Bedrikovetsky et al., 2001). Isto pode significar que o mecanismo de exclusão pelo tamanho nunca domina, ou que o modelo fenomenológico não é suficientemente geral / universal. Uma forma de estudar esta inconsistência é a modelagem em micro-escala de cada mecanismo de captura.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo para o processo de filtração profunda, incorporando as funções de distribuição de tamanho de poros e de partículas, bem como os fatores de acessibilidade e de redução de fluxo. O sistema de equações obtido é constituído da equação do balanço de população, da cinética de captura de partículas e da cinética de obstrução de poros. Foram obtidas soluções analíticas do modelo proposto, que consiste de uma cadeia de Markov contínua (equações de Einstein - Smoluchowski), para vários casos particulares.

A partir do modelo citado acima, um modelo efetivo que difere significativamente do modelo clássico para as concentrações totais de partículas foi obtido. Para este modelo efetivo, foi considerada também a formação transiente do reboco externo. Além disso, o problema inverso para a determinação dos parâmetros envolvidos no modelo efetivo proposto foi resolvido e dados experimentais disponíveis na literatura foram tratados.

Na revisão bibliográfica (capítulo 2), os modelos e os testes experimentais desenvolvidos por vários autores para o processo de filtração profunda e o conseqüente dano à formação foram discutidos.

No capítulo 3, um modelo estocástico incluindo os efeitos de acessibilidade e de redução de fluxo de partículas é proposto e as equações governantes são discutidas. Várias soluções analíticas para casos particulares, bem como o tratamento de dados experimentais, são apresentadas no capítulo 4.

A partir do modelo estocástico proposto (incluindo as distribuições de tamanho de poros e de partículas), um modelo de medição (concentrações totais) é deduzido no capítulo 5. No capítulo 6, as soluções analíticas para um modelo

efetivo analítico são apresentadas e o problema inverso da determinação dos fatores de acessibilidade e redução de fluxo é resolvido. Além disso, uma metodologia experimental para a determinação da queda de injetividade durante o processo de filtração profunda é proposta.

No capítulo 7 um modelo transiente para a formação e o crescimento do reboco externo (desprezando a erosão e a compactação do reboco) é proposto. Ainda neste capítulo, soluções analíticas para o caso onde os coeficientes de redução de fluxo e de acessibilidade são constantes são obtidas.

Nos capítulos 8, 9 e 10 são apresentados os comentários finais, as conclusões e as sugestões para futuras pesquisas, respectivamente.