

1

Introdução

Os custos e os desafios tecnológicos envolvidos na exploração de petróleo em profundidades cada vez maiores, como é o caso do Brasil são enormes. Com as recentes descobertas de reservatórios localizados em profundidades cada vez maiores, como por exemplo as reservas da camada pré-sal, torna-se necessário grandes investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a exploração desses novos campos de petróleo.

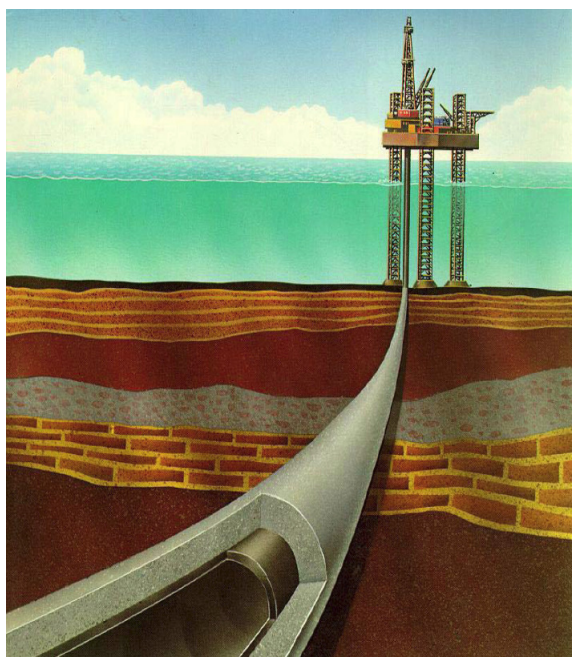


Figura 1.1: Exemplo esquemático de um poço

A exploração de novos campos de petróleo inicia-se após estudos geofísicos e geológicos que estabelecem a localização onde ocorrerá a perfuração do poço exploratório. Após a perfuração do primeiro poço, sendo comprovadas as reservas, novos poços são perfurados para iniciar-se a produção efetiva daquele campo. Na fase exploratória o custo da perfuração do poço representa algo entre 70% a 80% do custo total, já na fase de desenvolvimento (instalação de mais poços e plataforma para a produção) do campo, o custo de perfuração

dos poços fica entre 30% e 40%. Uma descrição simplificada do processo de perfuração é feita a seguir.

O processo de perfuração do poço é realizado em algumas fases. Essas fases são determinadas de acordo com as características das formações rochosas que serão perfuradas. Durante a perfuração de cada fase pela broca ocorre a circulação do fluido de perfuração que é bombeado pelo interior da coluna e retorna à superfície pelo anular formado entre a parede da rocha e a coluna (fig. 1.2 - a). O fluido de perfuração é utilizado principalmente para o carreamento do cascalho arrancado pela broca, para o resfriamento da coluna e da broca, além de sustentar a parede da rocha enquanto ainda não tenha sido instalado e cimentado o revestimento do poço (3).

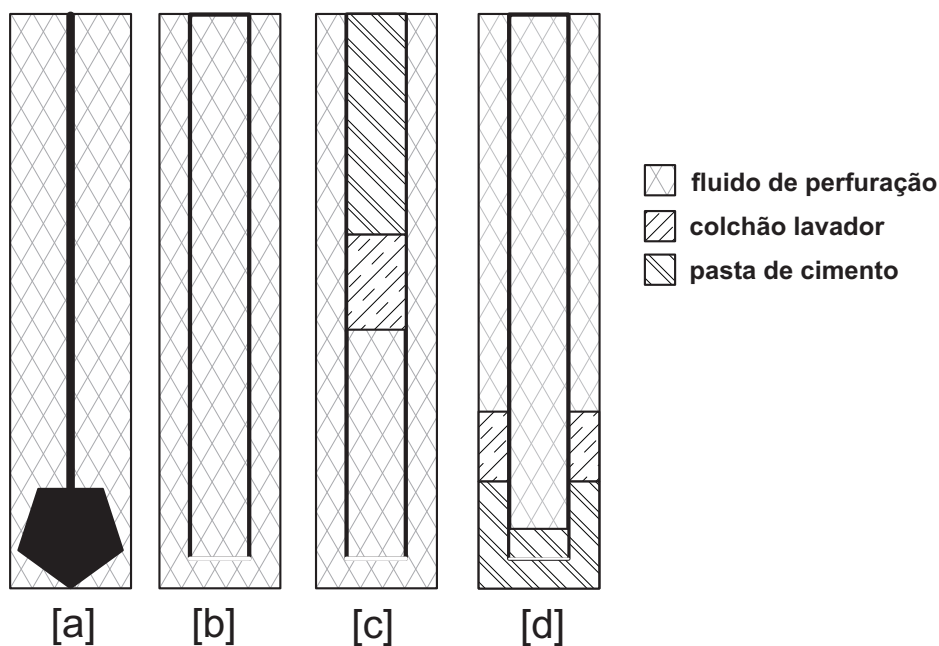


Figura 1.2: Exemplo esquemático da perfuração do poço

Ao final de cada uma das fases de perfuração da rocha, a coluna de perfuração é recolhida, e o interior do poço fica preenchido pelo fluido de perfuração. O passo seguinte é instalar o revestimento no interior do poço. A distância entre o revestimento e a parede do poço não é constante, formando assim um anular com excentricidade variável. Essa excentricidade é devida a seção não circular do poço e a flambagem do revestimento devido ao seu peso próprio. Para tentar diminuir essa excentricidade, centralizadores são colocados entre o revestimento e a parede da rocha. O uso dos centralizadores é mais limitado em poços com alta inclinação, pois os mesmos enrijecem o revestimento e dificultam sua descida (15).

Após posicionar o revestimento no interior do poço, é necessário preencher o espaço que restou entre o revestimento e a parede da rocha; esse processo é denominado cimentação do poço. A cimentação tem como objetivos: preencher o espaço entre o revestimento e o poço; promover aderência entre a parede externa (rocha) e o revestimento; fornecer suporte mecânico para o revestimento; além de isolar as formações impedindo perdas de fluido.

A cimentação primária consiste no bombeio da pasta de cimento pelo interior do revestimento e em sequência pelo anular até esta atingir sua posição final onde o cimento irá enrijecer. No início deste processo (fig. 1.2 - b) o poço (anular e interior) está preenchido pelo fluido de perfuração. A partir daí são bombeados em sequência um fluido colchão lavador, a pasta de cimento, e novamente um fluido de perfuração que serve nesse caso como fluido de deslocamento (fig. 1.2 - c). Essa sequência pode ser um pouco diferente, contendo vários fluidos espaçadores ou mais de uma pasta de cimento. Com a pasta de cimento posicionada a circulação de fluido é interrompida até o cimento endurecer (fig. 1.2 - d).

Para o sucesso da operação de cimentação é necessário que seja removido completamente o fluido de perfuração e/ou o fluido espaçador pela pasta de cimento não havendo mistura entre eles. Problemas ou falhas ocorridos durante a cimentação podem afetar o isolamento hidráulico do poço propiciando a migração de gases ou líquidos da rocha para o anular, podendo ocasionar severas perdas de produtividade, segundo Moore (11), como também colocar em risco a segurança de operação e causar danos ambientais.

A evolução não uniforme da interface entre os fluidos na direção azimutal, levando a coexistência de diferentes fluidos na mesma seção, é um dos principais fatores que levam a falhas no processo de cimentação. Esta evolução não uniforme pode ser causada pela excentricidade do espaço anular, que causa a uma maior velocidade na região mais larga do anular, pela razão desfavorável de viscosidade, que tende a tornar a interface instável e pela diferença de massas específicas, que leva a uma estratificação dos fluidos no caso de poços horizontais

Existem na literatura diversos trabalhos que estudam o processo de cimentação. Alguns fatores influenciam fortemente o resultado final do processo de cimentação, entre eles destaca-se, a reologia dos fluidos envolvidos, as características geométricas dos poços, a taxa de bombeio dos fluidos e o volume bombeado de cada fluido.

A maior parte dos trabalhos nesta área tem por objetivo determinar a posição das interfaces entre os fluidos e a evolução dessas interfaces durante o bombeio, para que se possa avaliar a eficiência do deslocamento da pasta

de cimento e a qualidade da cimentação realizada. Muitos desses trabalhos contemplam a natureza não-Newtoniana da pasta de cimento, no entanto poucos consideram a variação da excentricidade do anular formado pelo poço e o revestimento.

Sauer (17), faz uma extensa revisão sobre os trabalhos existentes na literatura que tratam da cimentação de poços de petróleo e gás até a década de 1980. Segundo ele a cimentação é uma das etapas mais complexas do processo de perfuração. Ele propõe critérios para a escolha dos parâmetros envolvidos no processo de cimentação.

McLean *et. al.* (10) desenvolveram um modelo analítico onde o anular excêntrico foi sub-dividido em setores. Cada setor foi considerado um anular concêntrico e com gradiente de pressão idêntico aos demais. Com esse modelo eles obtiveram a tensão limite de escoamento da pasta de cimento.

Seguindo a linha de modelos analíticos Beirute e Flumerfelt (1), propuseram aproximar o anular concêntrico com razão de raios próximas a unidade por placas paralelas. O modelo desenvolvido era 1D onde a velocidade era obtida para um determinado tempo (quasi-estático). Integrando a velocidade ao longo da interface é possível determinar a posição da interface e com isso determinar o volume deslocado em função do tempo.

No trabalho de Tehrani *et. al.* (19), foi realizado um estudo experimental do deslocamento de um fluido por outro fluido utilizando anulares excêntricos. Eles mostraram que a interface entre os dois fluidos é estável para fluidos com reologias similares e diferentes densidades desde que o fluido mais denso esteja abaixo da interface. O estudo considerou fluidos Newtonianos e não-Newtonianos.

Bittleston (18) desenvolveu um modelo que considera a excentricidade do poço constante e utiliza um sistema de coordenadas cartesianas para representar a geometria do espaço anular. O método de solução utilizado é um método assintótico, ou seja, ele resolve o problema 2D como um sequência de problemas 1D. Como descrito no trabalho o interesse maior é resolver o problema com baixo custo computacional sem uma preocupação maior com a exatidão da solução.

O trabalho de Pilipenko (14) é focado em fluidos viscoplásticos (Herschel-Bulkley). O método desenvolvido determina as zonas onde a tensão é menor que a tensão de escoamento do fluido e o fluido não escoar. O método é testado para problemas com o deslocamento do fluido em regime permanente no referencial da interface. O método considera excentricidade constante e pequena no anular.

Um segundo trabalho de Pilipenko (16) segue o estudo do primeiro, mas mais preocupado em determinar a estabilidade e a existência da solução

em regime permanente. No trabalho é feita uma comparação com a solução analítica desenvolvida por ele para a posição da interface em regime permanente para poços com excentricidade constante e pequena.

A precisão do resultado apresentados por Bittleston e Pelipenko é limitada pelas aproximações adotadas. As principais são: (i) o efeito de curvatura da seção reta da seção do anular é desprezada e o espaço anular é tratado como uma fenda; (ii) a excentricidade é constante ao longo do poço e pequena, e (iii) o problema bidimensional resultante é resolvido como uma série de problemas unidimensionais.

Pina (8) desenvolveu um modelo utilizando teoria de lubrificação considerando um sistema de coordenadas cilíndricas. O efeito de curvatura da seção reta do anular não foi desprezado. Desta forma, o modelo produz resultados bastante precisos, mesmo com razão de raios R_i/R_0 longe da unidade. Porém, a análise foi limitada ao escoamento de um fluido com comportamento Newtoniano.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo assintótico, baseado na teoria de lubrificação, para estudar o deslocamento de diferentes líquidos através de um espaço anular com excentricidade variável ao longo do poço. O modelo, assim como os trabalhos discutidos anteriormente, despreza o efeito de curvatura do anular e parametriza o espaço anular por um sistema de coordenadas cartesianas. Desta forma, a precisão dos resultados é maior para razão de raios perto da unidade. O modelo considera que a inclinação do poço varia ao longo do comprimento do poço, podendo desta forma descrever configurações reais. O comportamento mecânico do fluido pode ser Newtoniano ou qualquer modelo Newtoniano Generalizado, onde a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento é fornecida pelo usuário. Diferentemente dos trabalhos da literatura, o modelo não é limitado para excentricidades pequenas e obtém-se a solução transiente do problema bi-dimensional resultante.