

1 Introdução

A principal dificuldade na perfuração de poços de petróleo em zonas de rocha de sal, ou evaporitos, é o fechamento da abertura ao longo do tempo (Costa, 1984; Oliveira et al., 1985; Fredrich et al., 2003; Willson & Fredrich, 2005; Poiate Jr. et al., 2006).

Somado a isto muitos problemas operacionais como o aprisionamento da coluna de perfuração e o colapso do poço têm sido registrados pela indústria do petróleo nas perfurações de espessas camadas de sal.

Além disso, a deformação de sedimentos adjacentes ao sal, combinada com as tensões de perturbações causadas pela presença do sal normalmente acarretam risco na zona de transição, tal como a instabilidade do poço ou problemas de perda de circulação.

Estes contratempos criam grandes desafios e geram oportunidade de evolução da Indústria de Petróleo.

Estes problemas são resultantes da capacidade mecânica dos evaporitos de redistribuir as tensões no material com o objetivo de equilibrar as tensões desviadoras, provocando assim a deformação do material ao longo do tempo (Jaeger & Cook, 1971; Lama & Vutukuri, 1978; Costa, 1984; Goodman, 1989).

Este comportamento pode ser estudado através do modelo empírico de fluência, também conhecida na literatura como “*creep*”.

Segundo Carter et al. (1993), o mecanismo de deformação desta rocha tem cinco componentes de deformação: deformação elástica, deformação plástica, deformação de fluência primária, secundária e terciária.

Vários autores têm estudado este comportamento da rocha de sal, principalmente, o primeiro e o segundo estágios de fluência (Dawson & Munson,

1983; Munson et al., 1990; Carter et al., 1993; Fossum & Frederich, 2002; Urai & Spiers, 2007), pois são os mais evidentes e importantes em termos de magnitude na deformação de rocha de sal. Nesta tese foi estudado o comportamento elástico e a fluência secundária, por ser esta última considerada a mais relevante e, portanto ter sido adotada a lei de fluência do duplo mecanismo de deformação (Munson & Dawson, 1981; Costa et al., 2005).

Segundo Findley et al. (1976), a maioria das formulações de fluência foram estudadas a partir do comportamento uniaxial de fluência dos metais. Vários autores sugerem que este modelo de fluência é o mais aconselhado para o estudo geomecânico do sal (Munson & Devries, 1991; Medeiros, 1999; Frederich et al., 2003; Costa et al., 2005; Dussealt, 2005).

O método adotado para estudar o comportamento geomecânico na perfuração de poços em zonas de sal foi o da simulação computacional, isto usando como plataforma o programa de elementos finitos ABAQUS e quando necessário, foram inseridas sub-rotinas em FORTRAN. Outros autores têm seguido esta mesma escolha, usando o método dos elementos finitos para simular estes problemas através de programas próprios ou comerciais (Munson 1997; Frederich et al., 2003; Poiate Jr. et al., 2006; Gray et al., 2007), alcançando resultados significativos nessas simulações.

1.1. Motivação e objetivo

1.1.1. Motivação

Atualmente uma parte considerável da exploração e exploração de petróleo vem sendo realizada em bacias dominadas por estruturas salinas. O sal também chamado de evaporito é encontrado em muitas bacias de hidrocarbonetos no mundo. Na Bacia de Santos, uma das bacias mais promissoras do Brasil, foi descoberto petróleo leve de 30^º API em um reservatório de alta produtividade situado abaixo de uma camada de sal de aproximadamente dois mil metros de espessura.

Segundo Botelho (2008), a Petrobras realizou uma avaliação regional do potencial petrolífero do pré-sal que se estende nas bacias do Sul e Sudeste brasileiros. Os volumes recuperáveis estimados de óleo e gás para os

reservatórios do pré-sal, elevarão significativamente a quantidade de óleo explorado nas bacias brasileiras, colocando o Brasil entre os países com grandes reservas de petróleo e gás do mundo.

Um dado importante no avanço da tecnologia no pré-sal é que o primeiro poço demorou mais de um ano e custou cerca de US\$ 240 milhões. Em contrapartida, no fim de 2007, a Petrobras conseguiu perfurar um poço com as mesmas características em 60 dias a um custo de US\$ 60 milhões (Botelho, 2008).

Estes progressos geram grandes oportunidades na evolução da tecnologia e nos projetos de poços no pré-sal motivando assim o desenvolvimento científico do cenário brasileiro de pesquisa e desenvolvimento na indústria de petróleo.

1.1.2. Objetivo

Esta tese tem como objetivo principal analisar o efeito geomecânico da fluência (*creep*) na zona de sal durante e após a perfuração, e na cimentação do poço, através de simulação computacional em um programa comercial numérico de elementos finitos (ABAQUS), usando sub-rotinas de cálculo, em linguagem FORTRAN, para um correto estudo do problema.

Dentro deste objetivo, procura-se analisar diferentes variáveis, como: interação da pressão exercida pelo fluido de perfuração e do cimento, comportamento nas tensões nas fronteiras sal-cimento, cimento-revestimento, entre outros.

Com esta análise pretende-se entender os efeitos geomecânicos para evitar possíveis intervenções em poços que podem acarretar perdas econômicas.

O objetivo secundário deste trabalho é avaliar os quatro elementos que compõem a etapa pós-perfuração: fluidos de perfuração e de cimento, revestimento, cimento e sal, considerando o modelo plástico de von Mises para o revestimento e o ganho de resistência do cimento ao longo do tempo.

1.2. Estrutura da tese

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo essa introdução, que caracteriza o Capítulo 1, uma seção de referências bibliográficas e três apêndices.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica das principais propriedades do evaporito: geologia, mineralogia, propriedades físicas e químicas dos evaporitos e propriedades mecânicas. Também são apresentados casos de problemas de perfuração em zonas de sal e as características gerais de perfuração no Brasil.

O Capítulo 3 trata da formulação teórica e da modelagem numérica de problemas de fluência em evaporitos. Neste capítulo são apresentados os seguintes tópicos: definições do comportamento quase estático do sal, conceitos de elasto/visco-elasticidade, modelos reológicos, leis empíricas de fluência, leis constitutivas para o material sal de diferentes grupos de pesquisa e descrição do método dos elementos finitos aplicado ao problema de fluência.

No Capítulo 4 é apresentada a validação do uso do programa ABAQUS, realizada por meio de simulação numérica. No caso de simulação 2D, é apresentada a validação da resposta elástica de um poço para o caso de deformação plana. No caso 3D é apresentada a validação de tensões *in situ* em corpos salinos. Finalmente a terceira validação visa comparar o resultado analítico e numérico para um poço revestido.

O Capítulo 5 apresenta a simulação da cimentação do poço na zona de sal, correspondendo à modelagem do endurecimento do cimento e a análise das tensões e deslocamentos entre o cimento, a rocha de sal e o revestimento.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste estudo e as sugestões de futuras pesquisas.

Finalmente são apresentados três apêndices que auxiliam no melhor entendimento da parte numérica desta tese.