

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação

Entre as regiões afastadas da costa, as Bacias de Campos e de Santos (localizadas no Sudeste do Brasil) vêm recebendo uma considerável atenção pela indústria do petróleo por se destacarem em relação à exploração de hidrocarbonetos.

Na Figura 1-1, visualizam-se as Bacia de Santos, a Bacia de Campos e parte da Bacia do Espírito Santo, onde se têm diversos registros de ocorrência de camadas de evaporitos em elevadas profundidades. A Bacia de Campos se inicia na costa do Espírito Santo, cujos limites vão desde a cidade de Vitória até o município de Arraial do Cabo, no litoral do estado do Rio de Janeiro. A Bacia de Santos se estende desde Arraial do Cabo (passando pelo litoral de São Paulo e pelo Paraná) até Santa Catarina. As bacias foram assim denominadas, Campos e Santos, pelos geólogos, pois são as cidades que estão na mediatriz das respectivas bacias.

A Bacia de Campos é responsável por mais de 80% da produção nacional e a Bacia de Santos possui uma enorme perspectiva de crescimento devido às novas descobertas petrolíferas que têm acontecido com frequência.

Na Bacia de Campos, muitos poços profundos têm sido perfurados através de espessos intervalos de sal. Segundo Costa et al (2005), até a década de 1990, as diversas formas para prever o comportamento do sal a altas temperaturas e altas tensões diferenciais tinham um custo elevado, tendo casos até de perda de poços.

A perspectiva para esta década, conforme destacado por Willson & Fredrich (2005), é que uma significativa quantidade de novos campos de exploração estará em zonas de sal ao redor do mundo, em águas profundas do golfo do México, de Angola, do Brasil, do Norte e Oeste da África.

Um exemplo desses novos campos está na Bacia de Santos, onde a Petrobras confirmou a descoberta de petróleo leve de 30° API no dia 04 de outubro de 2006 pelo teste do poço 1-RJS-628A, encontrando reservatório de

alta produtividade, situado abaixo de uma camada de sal de dois mil metros de espessura (“pré-sal”). A confirmação desta informação foi divulgada em 8 de novembro de 2007 com a conclusão da análise dos testes de formação do segundo poço (1-RJS-646) na área denominada Tupi no bloco BM-S-11, localizado também na Bacia de Santos (Figura 1-1), onde é estimado um volume recuperável de óleo leve de 28° API de 5 a 8 bilhões de barris de petróleo e gás natural.

A Petrobras realizou também 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, se confirmados, elevarão significativamente a quantidade de óleo existente nas bacias brasileiras, colocando o Brasil entre os países com grandes reservas de petróleo e gás do mundo.

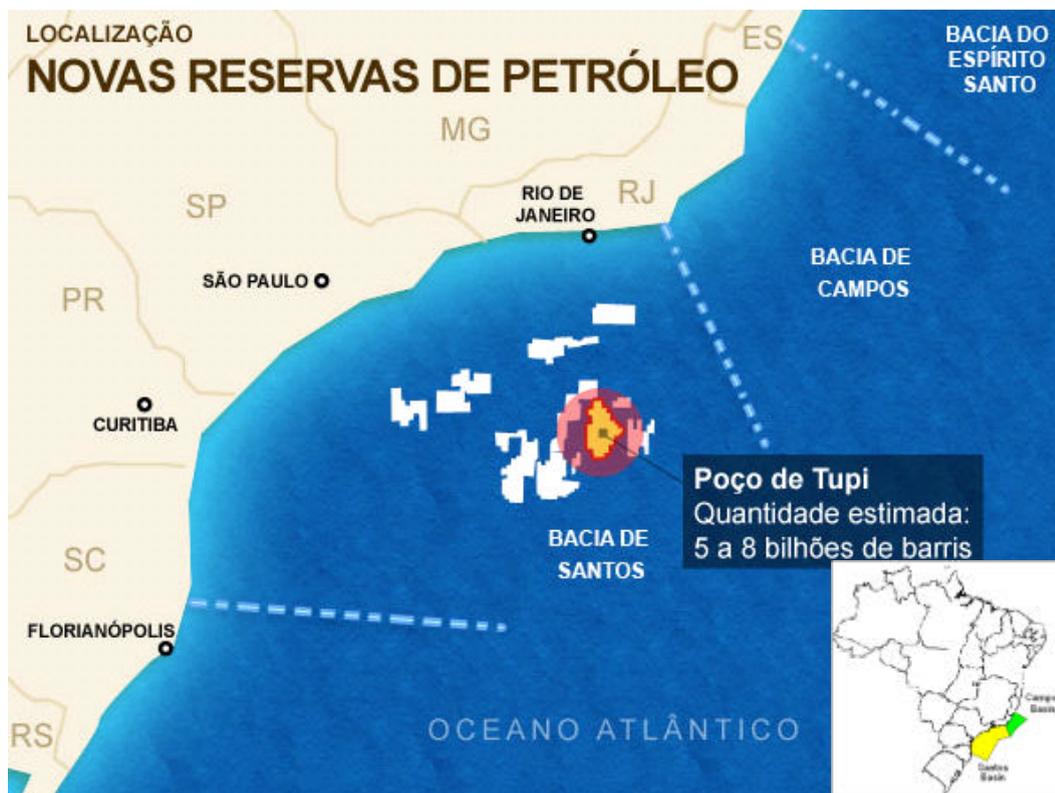


Figura 1-1: Localização das Bacias de Campos e Santos e das novas descobertas ([http://g1.globo.com/Noticias/Economia\\_Negocios/0,,MUL176231-9356,00.html](http://g1.globo.com/Noticias/Economia_Negocios/0,,MUL176231-9356,00.html) - modificado)

Com investimentos de US\$ 1 bilhão, foram perfurados nos últimos 3 anos 15 poços que atingiram as camadas pré-sal, sendo que oito deles foram devidamente testados e avaliados com as melhores técnicas da indústria

petrolífera. Estes poços produziram óleo leve de alto valor comercial (28° API) e grande quantidade de gás natural associado.

Para atingir estas camadas pré-sal (entre 5000 e 7000 metros de profundidade), a Petrobras desenvolveu novos projetos de perfuração, nos quais mais de 2000 metros de sal foram atravessados. O primeiro poço demorou mais de um ano e custou US\$ 240 milhões. No fim de 2007, a Petrobras já havia conseguido perfurar um poço equivalente em 60 dias a um custo de US\$ 60 milhões.

Integrados a um grande esforço de mapeamento, os dados obtidos por esses poços possibilitaram delimitar com elevado grau de segurança que as rochas do pré-sal se estendem por uma área que vai do Estado do Espírito Santo ao Estado de Santa Catarina, ou seja, com 800 km de extensão e 200 km de largura, em lâmina d'água entre 2 e 3 mil metros de profundidade.

A presença de estruturas salinas nestas Bacias forma condições favoráveis para o aprisionamento dos hidrocarbonetos, aumentando a probabilidade de sucesso na prospecção de óleo e gás. Isto porque o evaporito é uma rocha selante de hidrocarbonetos por excelência.

Por outro lado, muitos problemas operacionais (como o aprisionamento de coluna de perfuração e o colapso do poço) têm sido registrados pela indústria do petróleo quando se está perfurando através de espessas camadas de sal. Além disso, a deformação de sedimentos adjacentes do sal, combinada com as tensões de perturbações causadas pela presença do sal, traz normalmente riscos na zona de transição, tais como a instabilidade do poço ou problemas de perda de circulação. Estes contratempos criam grandes desafios e geram oportunidades de evolução da Indústria do Petróleo.

Sendo assim, a complexidade destes corpos salinos e os profundos reservatórios requerem não somente altos custos de desenvolvimento, mas também uma tecnologia inovadora para alcançar os campos de produção, sendo necessária a utilização de procedimentos especiais para perfuração através de evaporitos. Um exemplo desta particularidade foi estudado por Willson & Fredrich em 2005. Os autores apresentaram e mostraram como incertezas perto e através do sal podem ser incluídas no projeto geomecânico do poço e no peso da lama necessário para a perfuração.

Existem grandes perspectivas de que significativas quantidades de novos campos de exploração estarão em zonas de sal ao redor do mundo, em águas profundas, em especial na costa brasileira. As formações de sal nestes casos

promovem boas oportunidades e desafios para o projeto e a construção de complexos poços a serem perfurados nestas regiões.

## **1.2. Objetivo**

Desta forma, o objetivo deste estudo é propor o comportamento mecânico do sal em poços de petróleo. Analisaram-se os deslocamentos, deformações e tensões na parede do poço e em sua vizinhança para diversos pesos de fluido de perfuração por meio do método dos elementos finitos.

Foram realizadas modelagens computacionais mediante a utilização de um programa comercial de elementos finitos: o Abaqus. Através de análises de deformação plana e de análises axissimétricas, as simulações numéricas puderam prever o comportamento elástico e, principalmente, o provocado pela fluência do sal.

## **1.3. Escopo**

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

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos evaporitos, desde os conceitos básicos até uma extensa pesquisa acerca da geologia, da gênese e da litologia do sal. Está abordada também neste capítulo a característica selante do evaporito, assim como as estruturas complexas formadas pelo diapirismo (processo de ascensão do corpo salino). Por fim, apresenta-se um pequeno histórico dos problemas de perfuração de poços de petróleo em estratos salinos.

O Capítulo 3 se destina à revisão conceitual e histórica dos modelos constitutivos de fluência da literatura (empíricos, físicos e reológicos), em que são citados os principais trabalhos e linhas de pesquisas. A fluência sob tensão variável com o tempo também é tema tratado neste capítulo. Ainda, destaca-se a Teoria de Endurecimento por Tempo Transcorrido e a Teoria de Endurecimento por Deformação. Ambas teorias são discutidas a partir de uma breve revisão bibliográfica e da dedução das equações utilizadas pelo Abaqus para um estado multiaxial de tensões.

No Capítulo 4 são realizadas as modelagens computacionais no Abaqus com a utilização da análise de deformação plana para prever o comportamento

elástico e, sobretudo, o de fluência do sal. No início do capítulo estão explicados os pontos relevantes para a criação da malha e do modelo propriamente dito, com a abordagem, por exemplo, das condições de contorno e dos parâmetros utilizados nas formulações. É feita também uma validação do programa Abaqus com o emprego das equações elásticas de Kirsch e Bradley. Finalmente, estão apresentados e discutidos os resultados das simulações numéricas, em que se analisam os deslocamentos, deformações e tensões na parede do poço e na sua vizinhança, utilizando a Teoria de Endurecimento por Tempo Transcorrido e uma comparação com a Teoria de Endurecimento por Deformação.

No Capítulo 5 são realizadas as modelagens computacionais no Abaqus sendo utilizada a análise axissimétrica com o objetivo de prever o comportamento elástico e, especialmente, o provocado pela fluência do sal. No início do capítulo estão explicados os pontos relevantes para a criação da malha e do modelo propriamente dito, fazendo um detalhado esclarecimento dos estágios de escavação. Além disso, os resultados das simulações numéricas são apresentados e discutidos, em que se analisam os deslocamentos, deformações e tensões na parede do poço e na sua vizinhança, utilizando a Teoria de Endurecimento por Tempo Transcorrido e uma comparação com a Teoria de Endurecimento por Deformação. Simultaneamente a estes resultados, também é estudado o impacto dos estágios de escavação no comportamento do sal.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros. Após esse capítulo são listadas as referências bibliográficas citadas no trabalho e em seguida são apresentados três apêndices.

O Apêndice A consiste no mapa dos mecanismos de deformação do sal de Munson. O Apêndice B apresenta os resultados obtidos da modelagem numérica da análise de deformação plana no Abaqus, como descrito no Capítulo 4 para a versão “*time hardening*” e simulando um peso de fluido de perfuração de 11ppg. O Apêndice C versa sobre os resultados obtidos da modelagem numérica da análise axissimétrica no Abaqus, conforme explicado no Capítulo 5, para a versão “*time hardening*” e simulando um peso de fluido de perfuração de 11ppg.