

1

Introdução

1.1. Definição do problema

Rochas salinas têm estado presentes no conjunto de atividades exploratórias, de desenvolvimento e comerciais do homem desde os primórdios da civilização. No entorno dos depósitos salinos, essas atividades se concentram – especialmente as de mineração e de energia. No atual contexto brasileiro, a dinâmica entre o sal e a indústria é baseada na exploração do potássio, enxofre, petróleo e gás.

As recentes descobertas de reservatórios de hidrocarbonetos subjacentes a espessas camadas de sal, o pré-sal, são um desafio para a mecânica das rochas aplicada à indústria do petróleo. Essas rochas têm permeabilidade muito baixa, constituindo selos quase perfeitos para acumulações de hidrocarbonetos abaixo delas (Falcão, 2009). A exploração dessas novas e grandes reservas impulsiona o desenvolvimento de técnicas seguras para a perfuração da litologia salina, bem como a manutenção da estabilidade e integridade dos poços perfurados durante a sua vida útil.

O comportamento mecânico das rochas salinas difere consideravelmente das demais rochas sedimentares, tais como arenito e folhelho, de modo que sua exploração exige uma metodologia diferenciada. Seu comportamento é extremamente influenciado pelo fenômeno da fluência.

O dimensionamento de escavações ou perfurações em rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares comuns é feito com base em critérios de ruptura. Já em rochas salinas, o dimensionamento tem como um dos principais critérios a deformação. Para o nível de tensões da engenharia civil, potencialmente não ocorre a ruptura generalizada do maciço rochoso. Nesses casos, é verificada a ocorrência de deformações excessivas – em valor absoluto ou em taxa no tempo –, evitando-se ultrapassar um limite considerado aceitável.

Problemas relacionados à escavação ou perfuração de maciços compostos por rochas salinas são usuais na mineração de potássio – essa, portanto, já dispõe de uma experiência considerável no comportamento dessas rochas, consolidada

em um legado experimental e empírico. Entretanto, na mineração a ruptura controlada do maciço rochoso é um objetivo – e não uma intercorrência ou evento proibitivo. Portanto, a aceitação de baixos fatores de segurança contra a ruptura, bem como de elevadas taxas de deformação são condicionantes a serem administradas, em função da produção de minério, economia e a segurança da operação.

Obras de engenharia civil em rochas salinas também demandam cuidados especiais com as deformações e com a agressividade do meio, uma vez que além de móvel, o sal é solúvel, podendo formar cavidades por dissolução na geometria projetada. Os fatores de segurança, limites de deformação e especificações construtivas são mais restritivos.

Na engenharia do petróleo, a perfuração do maciço rochoso não é a atividade-fim da exploração, mas sim o meio de acessar as rochas reservatório, nas quais os hidrocarbonetos estão armazenados. Deseja-se que o maciço permaneça o mais próximo possível de sua condição anterior a perfuração, de modo que sua integridade e a do poço sejam mantidas.

A exploração do pré-sal requer a perfuração de poços a grandes profundidades (da ordem de quilômetros) atravessando espessas ou esbeltas camadas de rochas salinas, de modo que as incertezas acerca do êxito do empreendimento são grandes. A alta mobilidade dessas rochas pode significar resultar em sérios problemas para a perfuração e a operação de poços, tais como a prisão da coluna de perfuração e o colapso do revestimento metálico devido a deformações excessivas na parede do poço (Costa *et al.*, 2005).

Haja vista a complexidade do problema, bem como a mobilização envolvida – humana, técnica e consequentemente financeira – são necessárias análises de estabilidade e de integridade sofisticadas para o dimensionado mais seguro (e economicamente viável) possível.

Convencionalmente, a avaliação da segurança em obras geotécnicas é feita por meio de análises determinísticas, isto é, hipóteses são definidas, modelos constitutivos são empregados e parâmetros são fixados e processados em métodos de análise de estabilidade para obtenção de um indicador de segurança. Entretanto, diante da complexidade intrínseca à geotecnia, análises determinísticas podem tornar-se pouco representativas. A maioria dos parâmetros varia espacialmente, fazendo com que parte das idealizações de comportamento das

propriedades eventualmente não seja verificada. Com isso, resultados de análises determinísticas representam um referencial de grandeza do que se propõe analisar.

Na engenharia de perfuração no ambiente do pré-sal, à vista dos problemas operacionais inerentes à exploração, observa-se que as incertezas omitidas em análises determinísticas podem representar custos financeiros e ambientais severos. Dessa forma, a complexidade e a dualidade entre risco e benefício fazem com que seja altamente recomendável considerar as incertezas relacionadas aos parâmetros geomecânicos por meio de análises probabilísticas de fluência, empregando-se métodos de confiabilidade. Com a identificação dos parâmetros de maior importância na mobilidade do sal e o aprimoramento das metodologias para determinação desses, as análises de estabilidade em perfurações em rochas salinas tornar-se-ão mais representativas, aumentando a possibilidade de êxito na exploração.

1.2. Grupo de Geomecânica Computacional – Instituto Tecgraf

Esta dissertação está inserida em um contexto maior de cooperação científica e tecnológica entre a Petrobras¹ e o Instituto Tecgraf², desde 1987. O Grupo de Geomecânica Computacional do Tecgraf atua desde 1990 na modelagem e simulação de problemas geomecânicos associados à exploração e produção de hidrocarbonetos para a indústria do petróleo, com destaque para as atividades recentes de simulação de estabilidade e integridade de poços atravessando rochas salinas, para acesso aos reservatórios do pré-sal brasileiro³.

Nesse contexto de cooperação científica, materiais, metodologias e treinamento para a abordagem desses problemas geomecânicos são disponibilizados pela Petrobras. Artigos, dissertações e teses desenvolvidos por pesquisadores associados ao Tecgraf retroalimentam esse processo, aferindo, validando e aperfeiçoando essas metodologias e tecnologias.

¹ Petróleo Brasileiro S.A.

² Instituto Tecgraf de Desenvolvimento de Software Técnico-Científico da PUC-Rio.

³ <http://www.tecgraf.puc-rio.br/areas-de-pesquisa/geomecanica>

1.3. Objetivos da pesquisa

Esta pesquisa tem como objetivos a compreensão do fenômeno da fluência em rochas salinas e a avaliação do seu efeito a partir da aplicação de metodologias para análises geomecânicas em poços de petróleo no cenário característico do pré-sal.

Partindo da compreensão do fenômeno da fluência em escala microscópica e macroscópica e da formulação numérica dos principais mecanismos por meio de modelos constitutivos, modelos geomecânicos são desenvolvidos e a fluência é simulada através do Método dos Elementos Finitos.

A seguir, é empregada uma metodologia de análise probabilística para obtenção de superfícies de resposta e avaliação do efeito das incertezas associadas à determinados parâmetros nos fenômenos estudados. Ao término, pretende-se avaliar o nível de confiança nas respostas obtidas pelas metodologias tradicionais, determinísticas.

1.4. Organização da dissertação

Esta dissertação foi dividida em 7 capítulos, dispostos conforme segue.

O presente capítulo, 1, tem como objetivo apresentar a visão geral sobre a engenharia envolvendo rochas salinas, buscando expressar a relevância dessa área de pesquisa.

O capítulo 2 apresenta os fundamentos da geomecânica das rochas salinas, que compreendem princípios e propriedades básicas sobre essas rochas, bem como uma aprofundada revisão bibliográfica sobre o fenômeno da fluência.

O capítulo 3 trata da modelagem da fluência por meio de modelos constitutivos que relacionam o estado de tensões, temperatura e tempo com as deformações do material. Após a apresentação dos modelos, é feita a calibração para rochas salinas brasileiras, visando à utilização desses nas simulações numéricas.

O capítulo 4 apresenta a modelagem geomecânica de ensaios triaxiais de fluência e de poços revestidos e não revestidos adotando o programa comercial de elementos finitos ABAQUS® como ferramenta de estudo. Procura-se esclarecer as etapas e as particularidades de cada grupo de cenários simuláveis por modelos

bidimensionais. Sub-rotinas para utilização dos modelos constitutivos de fluência no ABAQUS® foram aferidas.

O capítulo 5 apresenta a validação dos modelos constitutivos de fluência para rochas salinas brasileiras no contexto da pesquisa, comparando as soluções numéricas com resultados experimentais de três aplicações de engenharia.

O capítulo 6 apresenta um modelo sintético de poço revestido atravessando litologia salina, representativo do pré-sal brasileiro, com base no qual foram realizadas análises determinísticas e probabilísticas de fechamento do sal e de plastificação do revestimento, buscando-se as superfícies de resposta desses fenômenos e a avaliação da sensibilidade desses as variáveis consideradas aleatórias.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões para estudos futuros no tema.

Por fim, no Apêndice, são mostradas a generalização de tensões e deformações para o estado multiaxial, a solução analítica elástica para tensões ao redor de uma perfuração em um meio contínuo e a metodologia matemática e probabilística dos métodos de confiabilidade empregados nesta dissertação.