7

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

7.1. Conclusões gerais

O desenvolvimento e o emprego de metodologias de análise geomecânica envolvendo rochas salinas foram apresentados. Foi dada a ênfase na aplicação de poços atravessando essas salinas. Modelos constitutivos de fluência para o sal foram investigados por meio de simulações geomecânicas com base no Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa ABAQUS®.

Mecanismos de deformação por fluência predominam em rochas salinas na presença de alívio de tensões, como as que ocorrem na perfuração de poços. Portanto, um forte embasamento teórico e experimental relacionado a esse fenômeno é fundamental.

No Brasil, recentes descobertas de reservatórios do pré-sal motivam estudos visando melhor compreensão desse novo cenário de exploração e produção, que requer a definição de metodologias e práticas de projeto, bem como parâmetros e leis de comportamento dos materiais adequados às condições de campo. Nesse contexto insere-se a presente dissertação.

Três modelos constitutivos de fluência – Lei de Potência, Modelo de Duplo Mecanismo e Modelo de Multi Mecanismo – foram comparados com base em situações de laboratório e de campo. Os dois últimos modelos não são disponibilizados originalmente pelo programa, tendo sido implementados em sub-rotinas. Destaca-se entre os resultados desta dissertação a calibração de um conjunto de parâmetros para utilização do Modelo de Multi Mecanismo para a halita brasileira. Trata-se de um primeiro esforço no sentido de viabilizar o uso desse modelo constitutivo no contexto brasileiro.

Com a finalidade de avaliar a influência dos parâmetros na resposta geomecânica dos problemas de interesse foram realizadas análises probabilísticas utilizando o programa NESSUS®. Detalhes quanto aos arquivos de pós-processamento tiveram de ser customizados, em virtude da especificidade necessária para a interpretação dos resultados.

A descrição do comportamento mecânico de rochas salinas não é trivial, sobretudo no que tange à identificação dos mecanismos de fluência predominantes, a relação da ruptura com a fluência, bem como a fronteira entre regimes visco-elástico e visco-plástico.

7.2. Conclusões relacionadas aos modelos constitutivos para fluência para rochas salinas

A calibração de modelos constitutivos de fluência para rochas salinas pode tornar-se subjetiva diante da escassez de dados experimentais publicados. Entende-se que essa limitação foi compensada em parte pela multiplicidade de exemplos de validação, procurando evitar uma metodologia cíclica, na qual calibração e validação ocorressem somente no mesmo tipo de exemplo.

Três modelos constitutivos de fluência foram avaliados na simulação de situações típicas de geomecânica envolvendo rochas salinas. A validação desses modelos se deu com base em simulações de ensaios de laboratório, convergência vertical de uma galeria de mineração e fechamento de poço.

A Lei de Potência reproduziu adequadamente a fase primária da fluência dos três ensaios triaxiais de fluência e produziu bons resultados na análise de fechamento de poço. Na última simulação, o bom desempenho pode ser atribuído ao curto período considerado (10 horas), já que a fase secundária da fluência não é contemplada pela Lei de Potência. Essa limitação geralmente não é compatível com análises de fechamento e integridade de poços.

Com relação ao Modelo de Duplo Mecanismo, em virtude de sua limitação em estimar a fase primária da fluência, é esperado que seus resultados sejam inferiores aos medidos em campo, devido à inevitável defasagem na fase secundária da curva de fluência. Entretanto, não se trata de uma defasagem marcante e a ordem de grandeza da resposta permanece válida. O critério de validação para esse modelo deve ser a taxa de fluência secundária, ou seja, a inclinação da reta gerada. Bons resultados foram verificados nas modelagens do ensaio triaxial e da galeria da Mina Taquari-Vassouras. Portanto, conclui-se que o modelo foi validado para estimativa da taxa de deformação de fluência (secundária).

O Modelo de Multi Mecanismo com parâmetros de fluência secundária obtidos a partir da interpretação de dados experimentais produziu excelentes resultados em todos os exemplos de validação apresentados, dando-se ênfase ao desempenho nas situações de campo. Seu desempenho no âmbito desta pesquisa foi utilizado como referencial para avaliação dos outros modelos constitutivos considerados. Entretanto, deve-se salientar que a interpretação micromecânica dos mecanismos de fluência da halita brasileira pode ser subjetiva (com base nos dados disponíveis), uma vez que outros fatores não considerados em ensaios de laboratório podem influenciar esse comportamento. Além disso, as energias de ativação relacionadas aos mecanismos de deformação apresentam grande variabilidade conforme o tipo de rocha salina. Dessa forma, entende-se que apesar do excelente desempenho, o conjunto de parâmetros correspondente a essa configuração ainda requer mais testes para validação.

O Modelo de Multi Mecanismo com parâmetros de fluência secundária obtidos a partir do ajuste matemático de curvas produziu excelentes resultados na modelagem dos ensaios triaxiais e do fechamento de poço. Entretanto, não apresentou bom desempenho na modelagem da galeria da Mina Taquari-Vassouras. Deve-se acrescentar que essa configuração, embora válida do ponto de vista numérico, pode não ser representativa da halita brasileira, uma vez que os expoentes de tensão na fluência secundária foram pré-fixados e não determinados a partir de resultados experimentais. O uso de expoentes de tensão dos sais da porção *on-shore* do Golfo do México em halitas brasileiras pode ser inadequado, uma vez que os primeiros, de modo geral, apresentam maior pureza e homogeneidade, e menor mobilidade.

A limitação do Modelo de Multi Mecanismo está associada ao seu custo computacional. De forma garantir a estabilidade da integração numérica no tempo com o método explícito de Euler, incrementos de tempo relativamente pequenos são necessários, sobretudo nas primeiras horas da análise, correspondente ao trecho de endurecimento característico da fase primária da fluência.

7.3. Conclusões relacionadas às análises probabilísticas

Com o objetivo de investigar a influência das incertezas relacionadas aos parâmetros dos modelos constitutivos e do estado de tensão e temperatura sobre

os resultados de fechamento de poço e plastificação de revestimento, foram realizadas análises probabilísticas com base nos métodos de Valor Médio. Nessas análises foram empregados dos modelos constitutivos de fluência de Duplo Mecanismo e Multi Mecanismo, já que a Lei de Potência não é adequada para a representação de eventos de média e longa duração.

Verificou-se que os resultados determinísticos estavam associados a um nível de probabilidade de falha de 40%, para ambos os eventos e modelos analisados. As análises evidenciaram a grande sensibilidade da análise de fluência aos principais parâmetros de entrada, especialmente os relacionados ao estado de tensão, temperatura e à fluência secundária.

Os dois modelos constitutivos considerados, embora tenham conduzido a respostas quantitativamente diferentes, evidenciaram a mesma susceptibilidade às incertezas associadas aos parâmetros do modelo geomecânico. Pode-se afirmar que as respostas e conclusões foram coerentes entre si e com o tipo de problema analisado.

7.4. Sugestões e recomendações para trabalhos futuros

A geomecânica das rochas salinas é um tema inerentemente interdisciplinar que tem conquistado de modo crescente o interesse de pesquisadores e muitos avanços devem ser propostos.

O primeiro deles refere-se à modelagem. Embora nem sempre seja justificável, em virtude da complexidade na modelagem geométrica do inevitável custo computacional, a modelagem 3D pode ser a única alternativa para determinados cenários geomecânicos. Alternativas de contato, como elementos de interface, podem ser empregadas nos limites entre materiais, no caso de poços revestidos e cimentados, cujo modelo engloba sal, cimento e aço.

A seguir, para otimização do processo computacional, sugere-se a implementação de uma rotina implícita para a equação evolutiva de endurecimento do modelo de Multi Mecanismo, em substituição ao método explícito de Euler.

Quanto ao estudo da fluência, é imprescindível a produção e publicação de dados experimentais de sais brasileiros, tanto halita, quanto silvinita, carnalita e taquidrita, uma vez que a disponibilidade limitada de dados pode comprometer a

calibração e validação dos modelos constitutivos. Além disso, sugere-se a realização de ensaios que contemplem a fase terciária da fluência até a ruptura, possibilitando a implementação e a calibração de critérios de fratura, a serem acoplados nos modelos constitutivos usualmente empregados.

Finalmente, com relação ao Modelo de Multi Mecanismo, entende-se que esta pesquisa possibilitou um passo preliminar com intuito de viabilizar a utilização desse modelo em rochas salinas brasileiras. Entretanto, faz-se necessário maior aprofundamento na identificação dos mecanismos micromecânicos que governam a fluência dos sais brasileiros, tanto na halita quanto em sais solúveis como carnalita e taquidrita. Além disso, os demais parâmetros do modelo, que usualmente são mantidos, devem ser verificados quanto à representatividade.