

6 Considerações finais

Ao final da extensa campanha de implementações e análises realizada na presente Tese, conclusões importantes acerca do comportamento geomecânico do sistema poço-reservatório puderam ser tomadas a partir dos resultados obtidos. Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões resultantes deste estudo, seguidas de sugestões para a continuidade desta pesquisa.

6.1 Conclusões

Baseado nos resultados obtidos a partir das implementações desenvolvidas, bem como nas discussões realizadas ao longo de todo este estudo, conclusões acerca do comportamento geomecânico de sistemas poço-reservatório puderam ser tomadas. As conclusões serão expostas setorialmente, em concordância com os objetivos estabelecidos no Capítulo 1 da presente Tese.

- Estado do conhecimento

As tensões em um meio poroso são grandemente afetadas pelas variações de pressão decorrentes do desenvolvimento de uma reserva. Ainda, ocorre que a variação de pressão também é sensível às mudanças no estado de tensões, caracterizando o problema de natureza acoplada. As magnitudes e orientações destas variações dependem da proximidade de feições estruturais como falhas e poços, além das propriedades constitutivas do meio poroso. Aliado a uma representação geométrica fiel, a consideração de um estado de tensões inicial consistente é imperativa em análises acopladas, impedindo que a qualidade dos resultados geomecânicos seja distorcida pela sua negligência.

A respeito do acoplamento hidromecânico, pouco se tem relatado na literatura sobre o uso de técnicas de acoplamento na análise de sistemas poço-reservatório. Individualmente, no entanto, a literatura é ostensiva ao afirmar que a resposta do reservatório, em termos da análise de fluxo, é fortemente afetada pela consideração dos efeitos geomecânicos, presentes no reservatório e nas adjacências. O uso de metodologias de acoplamento parcial se mostra factível no

aspecto prático, desde que sejam empregados parâmetros de acoplamento robustos sob o ponto de vista teórico. Acerca da suscetibilidade dos poços aos efeitos do desenvolvimento, relatos de colapso de poços e de revestimentos reais indicam que a parcela geomecânica em tais ocorrências pode ser expressiva. Contudo, fenômenos desta natureza ainda são pouco compreendidos, principalmente em virtude das diferenças de escala entre os problemas de reservatório e de poço.

A abordagem multi-escala tem figurado mais recentemente na pauta da geomecânica de sistemas poço-reservatório. O grande motivador de estudos desta natureza são as incertezas sobre o caráter dos agentes que levam os poços ao seu estado limite. Devido à extrema dependência do comportamento dos poços em relação às deformações impostas pelo sistema, em virtude da produção, torna-se praticamente impossível estabelecer um padrão de comportamento hipotético baseado em modelos que não levem em conta a tridimensionalidade destes efeitos. Pesquisas que tratam da otimização de trajetórias de poços, bem como de previsões de colapso de revestimentos, apontam essencialmente para a necessidade de uma abordagem multi-escala consistente, aliada ao uso de uma metodologia de acoplamento que capture os efeitos geomecânicos do sistema.

- Implementação do acoplamento ABAQUS-IMEX

O acoplamento fluido-mecânico foi introduzido nos modelos de reservatório avaliados nesta Tese. Baseado em uma configuração de acoplamento parcial iterativo, desenvolvida no Grupo de Geomecânica Computacional – ATHENA / GTEP / PUC-Rio, foi implementado o acoplamento entre o programa de análise de tensões ABAQUS e o programa de simulação de reservatórios IMEX. O acoplamento ABAQUS-IMEX empregou como parâmetros de acoplamento a porosidade e pseudo-compressibilidade, visando a aproximação das respostas totalmente acopladas obtidas através de análises poroelásticas.

A inclusão do IMEX no fluxo de trabalho do código de acoplamento foi realizada empregando a linguagem de programação C++. As implementações foram balizadas por uma extensa campanha de simulações para validação, empregando modelos simplificados baseados na literatura. Os resultados parcialmente acoplados em duas vias, empregando a configuração ABAQUS-IMEX, foram plenamente satisfatórios em termos de variação de pressão, compactação e subsidência, principalmente quando comparados a simulações

totalmente acopladas de modelos equivalentes. Os resultados do acoplamento em uma via se apresentaram muito distintos das análises iterativas, corroborando a importância do uso de técnicas de acoplamento robustas nas análises de geomecânica de reservatórios.

Ainda, simulações simplificadas em cenário *blackoil* revelaram a importância extrema da consideração dos efeitos geomecânicos na simulação de fenômenos corriqueiros do ponto de vista de fluxo, como geração de gás no sistema. A negligência dos efeitos geomecânicos nas simulações numéricas pode acarretar em previsões errôneas de volumes de gás e hidrocarbonetos produzidos, bem como em campos de tensão e deslocamentos inconsistentes com as atividades de desenvolvimento realizadas no campo.

- Construção de modelos globais simplificados e complexos

Os modelos simplificados construídos para as análises de validação global foram satisfatórios, uma vez que reproduziram resultados da literatura e serviram aos propósitos de validação ABAQUS-IMEX. Em termos da análise fluido-mecânica, observou-se que o emprego de um processo iterativo no acoplamento parcial resultou em uma queda de pressão mais expressiva, quando comparada ao caso onde o efeito geomecânico não foi considerado. O contraste de rigidez entre o reservatório e as rochas adjacentes proporcionou expressivo reflexo nos resultados obtidos, indicando que a deformação volumétrica do reservatório é dependente do comportamento geomecânico das rochas circundantes. Ainda nesta etapa, foram atribuídas propriedades de fluxo realísticas aos modelos simplificados, possibilitando avaliações acerca da influência do acoplamento em cenário *blackoil*. Os últimos resultados denotaram que os períodos de geração de gás, bem como a evolução dos volumes formados, são estritamente dependentes do comportamento integrado reservatório-adjacências.

O modelo de geometria complexa, baseado no Campo de Namorado, foi construído com o objetivo de aplicar o acoplamento ABAQUS-IMEX em um cenário mais realístico. Os resultados indicaram novamente a influência dos efeitos geomecânicos sobre o comportamento do sistema, considerando desta vez poços injetores e produtores atuando em conjunto. Para o caso avaliado, a consideração do acoplamento iterativo fez com que os efeitos combinados da injeção e da produção, em conjunto com as propriedades materiais atribuídas à

rocha, levassem a uma previsão de queda de pressão média inferior ao caso acoplado em uma via. Acredita-se que, no período avaliado, a depleção ocasionada pela produção tenha sido amortecida pelo efeito de arqueamento de tensões do *overburden* na simulação em duas vias, provocando efeitos em parâmetros da simulação de fluxo, como os volumes injetados.

Observou-se que os efeitos do acoplamento devem ser cautelosamente avaliados em cada caso de aplicação. Os resultados das simulações acopladas iterativas podem ser mais ou menos expressivos no que se refere às previsões realizadas através dos modelos estudados, quando comparados com estimativas geomecânicas baseadas na simulação de fluxo, apenas. Tais diferenças dependem do contraste de rigidez existente entre a rocha reservatório e as adjacências, bem como da configuração de poços existente.

- Desenvolvimento do fluxo de trabalho para análise multi-escala

O *workflow* desenvolvido para a abordagem multi-escala do problema de integridade de poços se mostrou adequado e viável sob o ponto de vista técnico, uma vez que inclui no seu fluxo de análises as principais condicionantes influenciadoras do comportamento de sistemas poço-reservatório. A natureza das atividades listadas no fluxo de trabalho multi-escala é vinculada à avaliação dos aspectos geológicos, à orientação dos poços, à modelagem geomecânica em escala de reservatório, à análise de regiões de interesse para análise detalhada no modelo global, à análise local propriamente dita, ao estudo da integridade do revestimento e ao estudo de cenários em caso de colapso. Todas as atividades podem ser encaixadas no fluxo de trabalho de qualquer modelo mecânico terrestre que englobe análises geomecânicas.

O foco principal desta Tese, dentro do fluxo de trabalho apresentado, foi a conexão entre os modelos global e local, honrando no âmbito local os efeitos decorrentes das previsões realizadas em escala de reservatório. Neste sentido, o esquema de acoplamento fluido-mecânico desenvolvido, aliado ao fluxo de trabalho apresentado, representa uma metodologia robusta para aplicação em análises de integridade de poços.

- Idealização e implementação do gerenciador de simulações locais

Foi demonstrado que técnica de submodelagem e o acoplamento fluido-mecânico associados compõem um esquema robusto para realização de análises multi-escala no âmbito da geomecânica de reservatórios. Foram definidos os principais processos referentes ao uso de tais técnicas de forma conjunta.

O desenvolvimento do gerenciador de modelagem local APOLLO configura importante avanço no *workflow* de análise de poços empregando submodelagem, uma vez que proporciona um processo de modelagem mais otimizado e realístico devido a inclusão dos processos de perfuração e completação no início da análise. O processo de validação foi considerado satisfatório, indicando a correta manipulação e geração de arquivos pelo módulo, acelerando assim o processo de modelagem como um todo, diminuindo a incidência de erros relacionados à manipulação manual. No exemplo de aplicação do módulo APOLLO a um poço sub-horizontal no Campo de Namorado, observou-se a importância do detalhamento dos processos prévios à modelagem local na avaliação da integridade do revestimento ao final de um período de produção do reservatório.

- Desenvolvimento de modelos locais simplificados e complexos

O modelo local de poço vertical foi considerado satisfatório, tanto no seu emprego na análise local simplificada – validação do módulo APOLLO – quanto no seu uso na aplicação ao caso geometricamente complexo. O uso da inicialização de tensões no modelo local conduziu à um estado inicial coerente com o modelo global, proporcionando a obtenção de resultados conectados à real progressão de tensões na região analisada. Na fase de validação, observou-se que o comportamento do modelo durante o processo de perfuração e completação foi coerente em termos das tensões e deslocamentos esperados para cada fase do processo. Na fase de aplicação dos efeitos geomecânicos, a resposta do modelo local à aplicação dos deslocamentos provenientes do modelo global de tensões, bem como da pressão de fluido no interior do poço proveniente do modelo global de fluxo, foi considerada satisfatória.

O modelo local sub-horizontal, construído e simulado para a comprovação da aplicabilidade das ferramentas desenvolvidas nesta Tese em casos de geometria mais complexa, foi considerado satisfatório nas análises de integridade. Assim como no modelo local de poço vertical, observou-se a que a transferência multi-

escala gerou campos de tensão e deslocamentos assimétricos ao redor do poço, salientando a tridimensionalidade do problema de integridade de poços, e a necessidade de análises como as realizadas nesta Tese.

- Análise de integridade de poços

A região de influência do poço como entidade estrutural foi identificada para o caso de referência (poço vertical), possibilitando a definição da região limítrofe para a transferência dos deslocamentos globais como quatro vezes o raio do poço. O limite externo para a definição dos nós para a transferência dos deslocamentos do modelo global para o modelo local, obtido para o mesmo modelo de referência, foi de quarenta vezes o raio do poço. Portanto, observou-se que os modelos locais podem ser construídos de forma otimizada em termos do refinamento, com fronteiras externas entre quatro e quarenta vezes o raio do poço, sem prejuízo da transmissão de efeitos ao modelo local, e sem imposição de efeitos incoerentes às entidades estruturais da completação.

As análises de integridade realizadas no campo de Namorado, tanto no poço vertical quanto no poço sub-horizontal, indicaram que a consideração dos efeitos geomecânicos em escala global afeta significativamente a resposta do revestimento em termos da sua integridade. Para os casos avaliados, o uso do acoplamento em duas vias resultou em campos de deslocamentos distintos em comparação à simulação em uma via, indicando a possibilidade de maior vida útil do revestimento para o caso do poço vertical, e menor para o caso do poço sub-horizontal. Os efeitos geomecânicos decorrentes da consideração das rochas adjacentes no modelo podem, portanto, se refletir de maneiras distintas sobre poços diferentes dentro de um mesmo modelo.

O emprego de um processo sistematizado de análise, de acordo com o *workflow* multi-escala proposto, bem como a introdução de etapas automatizadas para o gerenciamento do processo de modelagem local, tornou viável a introdução das condicionantes geomecânicas na avaliação da integridade de poços. Honrando todas as etapas identificadas como influentes na análise de integridade, iniciando na definição dos modelos de reservatório para a análise acoplada e culminando na verificação do comportamento completo das entidades que compõem o poço, conclui-se que a presente Tese de doutorado atingiu seu objetivo principal. Através das ferramentas idealizadas e desenvolvidas neste estudo, tornou-se

possível avaliar numericamente a integridade de poços de petróleo segundo os efeitos geomecânicos decorrentes do desenvolvimento do reservatório.

6.2 Sugestões para sequenciamento da pesquisa

Um dos efeitos geomecânicos mais importantes durante o desenvolvimento de um campo de petróleo consiste na reativação de falhas geológicas, podendo acarretar na perda de estanqueidade do reservatório. Neste sentido, sugere-se estender o fluxo de trabalho desenvolvido nesta Tese para análises detalhadas de zonas de falha em regiões de possível reativação. O emprego da técnica de submodelagem em avaliações locais, utilizando resultados de simulações parcialmente acopladas, deve conduzir os analistas de reservatórios a um novo e detalhado ponto de vista dos mecanismos envolvidos na reativação de falhas em casos reais.

A problemática do cruzamento ou desvio de poços em corpos salinos, visando o desenvolvimento de campos pré-sal, tem papel importante no cenário das pesquisas brasileiras da atualidade. Com pequenos ajustes, tanto o *workflow* desenvolvido como o módulo gerenciador de análises locais podem ser aplicados em análises com dependência no tempo, como é o caso de poços atravessando zonas de sal.

A inicialização de tensões é um tema amplamente discutido na comunidade científica, ligada à modelagem de meios geológicos. É um assunto relevante, pois a adoção equivocada de um estado inicial de tensões pode condenar toda a análise geomecânica. Por certo este tema merece um particular estudo de Tese, podendo contribuir expressivamente à fiabilidade dos resultados obtidos em análises como as desenvolvidas neste estudo.

Pesquisas envolvendo ajuste histórico também constam no menu dos sequenciamentos clássicos de pesquisas científicas. Neste estudo não poderia ser diferente, uma vez que as informações provenientes do campo enriqueceriam a análise, fazendo o analista atentar para outros fenômenos que porventura não estivessem sendo captados pela análise geomecânica dos poços no sistema. Embora exista uma dificuldade embutida na obtenção de dados de poço que possam contribuir com estudos como o realizado nesta Tese, salienta-se que

pesquisas neste tema são necessárias para que se possa avançar na compreensão geomecânica em tempo real. O uso de monitoramento associado a modelagem numérica de campos reais pode auxiliar no delineamento das variáveis de possível interesse neste tipo de análise, possibilitando ao analista de reservatórios dar mais um passo rumo a identificação das novas fronteiras geomecânicas da atualidade.

O emprego da metodologia desenvolvida em poços verdadeiros é uma possibilidade real, e pode configurar em estudos de otimização de trajetórias de poços. A realização de simulações de integridade no âmbito do *overburden* pode levar a uma análise detalhada das razões de colapso em muitos casos reais. Para avaliações desta natureza, no entanto, é imprescindível o acesso a dados reais, tanto de poços, quanto em termos de estruturas geológicas em todo o sistema.

Estudos paramétricos para a avaliação da sensibilidade dos modelos ao grande espectro de propriedades que compõem os problemas acoplados são de grande interesse prático e acadêmico. Análises desta natureza podem fornecer aos analistas de reservatórios maior familiaridade com os parâmetros envolvidos nos processos geomecânicos, aumentando a sua segurança quanto ao julgamento dos resultados obtidos.