

1 Introdução

A extração de hidrocarbonetos concentra relevante importância social e econômica, em virtude da grande e crescente demanda pelos produtos derivados desta atividade. Diante da denotada importância, é eminente a necessidade de desenvolvimento técnico rápido e de grande qualidade. Os aspectos técnicos das atividades exercidas na indústria do Petróleo estão entremeados em esferas complexas do conhecimento, notadamente mecânica de meios porosos, fluxo e transporte de massa, termodinâmica, computação e matemática aplicadas. Uma das áreas multidisciplinares que tem demonstrado expressivos avanços técnicos na atualidade – aliados ao grande interesse científico no assunto – é a da modelagem numérica do comportamento de reservatórios durante sua vida produtiva.

Sob o ponto de vista geomecânico, a problemática dos poços e dos reservatórios costuma ser abordada distintamente, principalmente em virtude da diferença de escalas existente entre tais entidades. Ainda que o sistema se comporte de forma fisicamente integrada, muitas vezes a associação entre os fenômenos envolvidos em cada análise costuma ser negligenciada. Os poços estão destinados a atravessar formações rochosas até atingir a profundidade referente ao reservatório, com a finalidade de extrair o hidrocarboneto ali presente (no caso de poços produtores) ou mesmo de injetar fluido para armazenamento ou processamento de recuperações secundárias ou terciárias (no caso dos poços injetores). Por natureza os poços são construções lineares, de direção constante ou variável, cujo comportamento geomecânico está intimamente relacionado ao estado de tensões da rocha a qual está atravessando, bem como ao fluido utilizado na estabilização da perfuração e ao revestimento adotado na completação. Diante das atividades exercidas por intermédio dos poços, o reservatório sofre alterações significativas na sua configuração de equilíbrio, pois a produção (ou injeção) de fluido ao meio poroso provoca variações expressivas na sua pressão de poros e, por conseguinte, no seu estado de tensões. Tais alterações se refletem diretamente no comportamento geomecânico da rocha reservatório. Não obstante, as reações do reservatório aos efeitos da produção/ injeção não se concentram somente dentro das suas fronteiras, mas se propagam pelas rochas adjacentes, muitas das

quais atravessadas pelos poços que propulsionam as referidas alterações geomecânicas. Claramente existe o que pode ser chamado de sistema poço-reservatório, uma vez que os comportamentos das entidades envolvidas não são independentes entre si, principalmente em face à morfologia do estado de tensões resultante do desenvolvimento do campo.

Em engenharia de poços, a influência do estado de tensões sobre uma perfuração pode ser tratada no escopo da estabilidade de poços, uma vez que o alívio provocado pela escavação exige a reorganização das tensões ao redor do poço, a qual será função das propriedades do maciço e dos fluidos envolvidos. Neste contexto, rupturas por tração e compressão podem ocorrer nas paredes da escavação, gerando problemas de naturezas diversas como alargamento ou estreitamento do poço, perda de fluido de perfuração para o interior do maciço rochoso, danos no revestimento, defeitos de cimentação na completação, entre outros. Por sua vez, a engenharia de reservatórios aborda a alteração do estado de tensões no escopo da geomecânica de reservatórios, a qual vincula a variação das pressões de fluido no meio poroso com a reorganização das tensões no campo durante sua vida produtiva. Os efeitos da reorganização das tensões sobre as rochas reservatório, bem como o seu reflexo sobre as rochas adjacentes, podem ser distintos, compreendendo possibilidade de reativação de falhas, compactação do reservatório, subsidência do leito marinho, ou mesmo alterações nas condições de estabilidade e integridade dos poços presentes. Em termos fenomenológicos, observam-se diferentes abordagens quando se avalia cada sistema isoladamente em termos da variação do estado de tensões. Todavia, devido ao estado de tensões não variar de forma independente entre as entidades, é imperativa a consideração da conexão entre a resposta geomecânica do reservatório e dos poços durante a vida ativa do campo em desenvolvimento.

No escopo da simulação numérica aplicada à geomecânica do petróleo, uma das grandes dificuldades de se realizar uma análise global poço-reservatório recai sobre a diferença das escalas entre os problemas mencionados. Uma análise multi-escala, *a priori*, requer a construção de modelos de maior complexidade, os quais sofrem limitações dependendo dos métodos numéricos que se utilizam. Tal complexidade não decorre somente da geometria, mas principalmente da necessidade de compatibilização entre os modelos constitutivos utilizados para a representação dos problemas de fluxo e tensão, bem como da correta atribuição

dos parâmetros de investigação, os quais muitas vezes apresentam excelente detalhamento, porém necessitam passar por processo de *upscaling* devido ao baixo refinamento dos modelos numéricos. Aliado a este cenário, existe ainda o agravante de os efeitos geomecânicos ocorrerem de forma acoplada, contemplando interdependências térmicas, hidráulicas, químicas e mecânicas, tornando a consideração de um único modelo de análise para um sistema poço-reservatório uma tarefa pouco trivial. Em contraponto às dificuldades expostas em termos da simulação numérica, os avanços nas tecnologias de perfuração, completação de poços e exploração de reservas conduzem a novos cenários cuja interação entre poço e reservatório ocorre cada vez mais frequentemente. Como exemplo, pode-se citar o caso da perfuração de poços horizontais em reservatórios, visando aumento nos volumes produzidos de hidrocarbonetos: nestas circunstâncias, o poço estará sujeito não somente à natural variação de tensões característica de poços direcionais, mas também à alteração dos estados de tensão em virtude da resposta geomecânica do reservatório durante a exploração.

Atualmente, esforços vêm sendo empreendidos na consideração do poço como entidade relevante na simulação de reservatórios, principalmente sob o ponto de vista de fluxo. A diferença entre escalas é um problema abordado na literatura em engenharia de petróleo, porém sob o enfoque da adaptação entre escalas de modelos de distribuição de propriedades e modelos numéricos de simulação de comportamento (seja de fluxo ou de tensões). Pouco se tem encontrado na literatura sobre a consideração conjunta de poços e reservatório sob um ponto de vista geomecânico, através de simulações multi-escala que levem em conta os fenômenos de forma acoplada. Levando-se em consideração, portanto, os desafios atuais na extração de hidrocarbonetos e, por sua vez, a necessidade de evolução nos estudos de previsão de comportamento em poços e reservatórios, esta Tese se dedica ao estudo de uma metodologia de análise de tensões que leve em conta as influências geomecânicas do reservatório sobre a integridade dos poços que possam ser afetados, considerando de forma rigorosa o acoplamento fluido-mecânico e a integração multi-escala entre os modelos de poço e reservatório adotados nas análises.

1.1 Justificativa

Os efeitos geomecânicos decorrentes das ações de produção e injeção em um reservatório de hidrocarbonetos causam alterações no estado de tensões do ambiente rochoso, as quais devem se refletir nas rochas adjacentes ao reservatório e nas feições presentes no sistema, notadamente falhas e poços direcionais ou não. Os poços de petróleo são estruturas que devem permanecer íntegras em sua vida útil (20 a 30 anos) durante o desenvolvimento de um reservatório, devendo estar preparadas para absorção dos eventuais efeitos geomecânicos aos quais o sistema está sujeito. As simulações numéricas para previsão do comportamento de poços e reservatórios não costumam considerar a conexão entre tais modelos, seja pela diferença de escalas entre eles, ou pelo desconhecimento de metodologias de transferência de informações geomecânicas entre os modelos. A avaliação geomecânica conjunta destas entidades, aliada a fenômenos de natureza acoplada, é essencial para a previsão do comportamento geomecânico de um sistema poço-reservatório, principalmente diante das complexidades vinculadas aos atuais desafios na extração. Neste contexto, o presente estudo de Tese se justifica, de acordo com os objetivos apresentados no item a seguir.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta Tese consiste em avaliar numericamente a integridade de poços de petróleo diante da alteração no estado de tensões do reservatório e das rochas adjacentes decorrente da variação de pressão de poros provocada pelo desenvolvimento do campo.

Para alcançar o objetivo principal, estabeleceram-se os seguintes objetivos secundários:

- Verificar o atual estado do conhecimento nos tópicos de principal relevância ao escopo desta pesquisa, quais sejam: construção e modelagem dos estados de tensão em sistemas poço-reservatório; comportamento de reservatórios e poços diante dos efeitos geomecânicos de natureza acoplada; e conexão entre modelos numéricos de diferentes escalas através de submodelagem.
- Adaptar código de acoplamento existente (desenvolvido pelo Grupo de Geomecânica Computacional ATHENA/ GTEP/ PUC-Rio) para criação

de um módulo de acoplamento fluido-mecânico entre os softwares escolhidos para a condução desta pesquisa: ABAQUS (análise de tensões) e IMEX (análise de fluxo).

- Construir modelos numéricos de reservatórios e rochas adjacentes, denominados *modelos globais*: modelo com geometria simplificada para validação da implementação ABAQUS-IMEX; modelo com geometria complexa para ilustrar a aplicação da metodologia em um caso real.
- Desenvolver um fluxo de trabalho para a modelagem e análise integrada do sistema poço-reservatório que possa ser conectado às demais atividades inerentes à modelagem e análise geomecânica de campos de petróleo.
- Desenvolver uma rotina computacional capaz de gerenciar simulações multi-escala em sistemas poço-reservatório levando em consideração o acoplamento fluido-mecânico.
- Construir modelos numéricos de poços, denominados *modelos locais*: modelo com geometria simplificada, para validação do fluxo de trabalho proposto e validação da implementação do gerenciador de submodelagem; modelo de geometria complexa, para ilustrar a aplicação da técnica em um caso real.
- Avaliar a integridade do revestimento dos poços simulados no cenário real, indicando os efeitos da escolha da metodologia de acoplamento sobre a resposta do poço ao longo da vida produtiva do reservatório.

1.3

Organização da tese

A presente Tese de Doutorado está organizada em sete capítulos, cuja estrutura e conteúdo podem ser brevemente apreciados nos itens elencados na sequência.

- **Capítulo 1 - Introdução:** este capítulo apresenta a contextualização do presente estudo no escopo da engenharia de petróleo, acompanhado da sua justificativa e relevância no contexto apresentado. Ainda, neste capítulo é apresentado o objetivo principal da Tese, seguido dos objetivos secundários.
- **Capítulo 2 - Revisão bibliográfica:** este capítulo apresenta uma revisão da literatura acerca de três tópicos principais, relacionados ao tema desta Tese. O primeiro tópico, denominado "Panorama sobre a construção e modelagem de estados de tensões", versa sobre as diferentes abordagens para determinação e construção de estados de tensão em ambientes de poço e reservatório, tanto em condições iniciais quanto durante a vida produtiva do sistema. O segundo tópico denominado "Simulação geomecânica de reservatórios" aborda o comportamento de poços e reservatórios em função do acoplamento hidromecânico, durante a vida produtiva de uma reserva, principalmente em termos da morfologia de

tensões neste cenário. O terceiro tópico intitulado "Integração entre modelos de diferentes escalas" aborda o problema de escala presente na modelagem conjunta poço-reservatório, trazendo problemas de integridade de poço relatados na literatura na contextualização. Ao final da abordagem de cada um dos três tópicos relacionados, consta o item "Discussão", o qual pretende elucidar a relevância dos temas abordados no desenvolvimento da metodologia da presente pesquisa, apresentada subsequentemente.

- **Capítulo 3 - Metodologia de pesquisa:** este capítulo apresenta a metodologia de pesquisa a ser utilizada na presente Tese de Doutorado. Tal metodologia está balizada pelo panorama exposto na revisão da literatura, e trata da abordagem adotada para o ataque do problema multi-escala, típico de um sistema poço-reservatório. Neste item apresenta-se o fluxo de trabalho desenvolvido, bem como a descrição dos procedimentos que serão adotados para que sejam alcançados os objetivos do presente estudo.
- **Capítulo 4 – Abordagem parcialmente acoplada e multi-escala em modelos simplificados:** este capítulo apresenta aspectos da implementação do acoplamento ABAQUS-IMEX e do gerenciador de simulações em escala local APOLLO. Neste capítulo também são apresentados resultados de simulações em modelos simplificados de forma a validar as implementações realizadas.
- **Capítulo 5 - Aplicação da abordagem parcialmente acoplada e multi-escala ao Campo de Namorado – Bacia de Campos:** neste item a metodologia proposta e implementada é empregada na análise geomecânica de um caso real. Modelos de fluxo e de tensões do campo de Namorado são simulados de maneira acoplada em escala global, gerando resultados que alimentam as simulações locais. As análises de integridade de poço são realizadas para cenários com poços vertical e sub-horizontal. Dois itens para a discussão dos resultados dos modelos globais e locais são apresentados neste capítulo.
- **Capítulo 6 – Considerações finais:** este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas nesta Tese, de acordo com os objetivos estabelecidos, sendo enfatizada a aplicabilidade do fluxo de trabalho desenvolvido para casos reais, ao longo da vida produtiva de um campo de petróleo. Sugestões para prosseguimento da linha de pesquisa também são apresentadas neste capítulo.
- **Capítulo 7 – Referências Bibliográficas:** este capítulo apresenta a listagem das referências consultadas, tanto para a confecção da revisão bibliográfica, quanto para o desenvolvimento das demais etapas da Tese.