

Conclusões e Sugestões

7.1

Conclusões

Foi apresentada uma metodologia para consideração dos efeitos geomecânicos na simulação de reservatório carbonático, sem aumento do custo computacional, através do pseudoacoplamento para a situação de compactação do reservatório. Com isso é possível ao engenheiro de simulação de reservatórios considerar a geomecânica de forma rotineira.

Visando uma melhor representação da rocha, a metodologia tem como principal suporte os ensaios laboratoriais com amostras do próprio campo. A comparação entre o pseudoacoplamento e a simulação convencional de reservatórios mostra que a primeira é capaz de representar melhor as heterogeneidades do reservatório, que podem caracterizar caminhos preferenciais ao fluxo e, por isso, devem ser bem representadas no modelo.

Foi determinada uma relação exponencial entre permeabilidade e porosidade. Tal relação, baseada no comportamento tensão-deformação-permeabilidade da rocha medido em laboratório, tem influência direta na simulação de fluxo em reservatórios ao utilizar o pseudoacoplamento.

Parte importante da metodologia é a escolha das amostras, que devem ser representativas da rocha-reservatório. Para facilitar e otimizar a escolha dos intervalos amostrados, a metodologia propõe uma combinação de informações existentes e disponíveis do campo: perfis de porosidade, de permeabilidade e de produção, corridos à época da testemunhagem; descrição de amostras de calha, modelo de simulação utilizado pelo ativo, ensaios laboratoriais previamente realizados, incluindo petrofísica básica e mecânica de rochas, além do estado de

tensões do campo. Outra importante fonte de informações é o relato daqueles profissionais que trabalham, ou que já trabalharam, com o reservatório em questão. Para a seleção de pedaços de testemunhos a partir dos quais foram feitas as amostras que seriam ensaiadas, era importante que fossem visualmente homogêneas, de forma a representar determinada fácies, além de ter as dimensões necessárias para os ensaios de mecânica de rochas.

A seção litológica utilizada no modelo desenvolvido neste trabalho é resultante de uma combinação de informações obtidas a partir das descrições de amostras de calha e de testemunho. Porém, como nem todas as fácies havia amostras, foi feita uma simplificação da seção litológica, levando em consideração as características de cada fácies, como percentual de grãos e tipo de suporte da rocha. Outra hipótese adotada foi a da fácies packstone que, por falta de uma descrição mais precisa, foi considerada como uma média entre o packstone peloidal oncolítico com bioclastos e o packstone peloidal com bioclastos e microoncolitos.

Uma importante etapa na metodologia foram os ensaios laboratoriais de mecânica de rochas, feitos para cada fácies constante do modelo. Neste trabalho, foram utilizados os resultados de ensaios edométricos, triaxiais e hidrostáticos, além dos de medição da variação da permeabilidade com a deformação.

Os ajustes numéricos do comportamento tensão-deformação observado nos ensaios de mecânica de rochas foram feitos com o *software* ABAQUS. Considerando que este estudo visa modelar os efeitos da compactação, foi utilizado um modelo elasto-plástico de Drucker-Prager com endurecimento no sentido do fechamento da envoltória (ou *cap*). Para isso, os modelos do ABAQUS foram alimentados com os dados obtidos dos ensaios laboratoriais para a posição do *cap* (em termos de tensão média) em função da deformação plástica volumétrica. Para a maioria das fácies, foi obtido um ajuste razoável, muitas vezes bom, ao comparar as curvas porosidade *versus* tensão média do modelo e do laboratório. A exceção foi a fácies *wackestone*, exatamente por ter

apenas ensaios edométricos. Além desta, outra consequência foi a não determinação de sua envoltória de ruptura.

As modelagens com o ABAQUS também foram utilizadas para obtenção de parâmetros mecânicos equivalentes através de experimentos numéricos, considerando a combinação de duas ou mais fácies. Esse procedimento tem como aplicação a caracterização de rochas adjacentes ao reservatório ao se fazer uma simulação com acoplamento em duas vias, cujo custo computacional é muito alto, inviabilizando uma melhor discretização dessas rochas.

A etapa final da metodologia trata da simulação de reservatórios utilizando o *software* IMEX, visando tanto a previsão do comportamento do reservatório, quanto a prevenção dos efeitos da compactação. Para isso foi adotado um modelo do tipo $1/4$ de *five-spot*, no qual procurou-se manter similaridades do modelo original utilizado pelo Ativo. Essas análises tinham como objetivo comparar o pseudoacoplamento com a simulação convencional de reservatórios, na qual a compressibilidade, que representa apenas o comportamento elástico da rocha, é o único parâmetro geomecânico levado em consideração. As comparações foram feitas com base em quatro modelos que utilizam: (i) uma tabela de pseudoacoplamento para cada camada e (ii) uma única tabela equivalente representando toda a seção litológica; (iii) um valor de compressibilidade para cada camada e (iv) um único valor de compressibilidade para toda a seção. Além destes, também foi incluído, para efeitos de comparação, um modelo homogêneo em que a compressibilidade adotada foi a mesma constante do modelo de simulação do Ativo, cujo valor considera-se que ajusta bem o histórico de produção do campo. Apesar de nestas comparações o modelo do Ativo contar com a mesma malha dos demais, na prática consta de grandes simplificações quanto à discretização vertical, constituído por 49 camadas representando 793 metros de rocha. Diferentemente, o modelo deste estudo constou de cinco diferentes tipos de rocha, dispostos em 26 intervalos verticais, compondo 292 metros de reservatório, de acordo com a seção litológica simplificada.

As tabelas de pseudoacoplamento, que relacionam pressão com variação de porosidade e de permeabilidades horizontal e vertical, foram geradas a partir dos modelos numéricos representativos de cada fácies, incluindo a equivalente à seção litológica. Como nos modelos do ABAQUS a variação desses parâmetros foi calculada em função das tensões efetivas, utilizou-se o Princípio das Tensões Efetivas de Terzaghi para incluir a poropressão, considerando o grão incompressível comparado à formação, uma vez conhecidos o estado de tensões e a poropressão iniciais do reservatório.

As análises comparativas quanto à produção acumulada de óleo, pressão média do reservatório e cortes de água com trajetória de tensões edométrica mostraram que os modelos homogêneos acabaram por ser representativos dos heterogêneos, principalmente para os de compressibilidade. Quanto à comparação entre os dois tipos de acoplamento, os resultados obtidos também foram similares, sendo que o modelo heterogêneo com pseudoacoplamento foi o que mais se aproximou da referência, o do Ativo.

Além de ser o mais próximo ao comportamento representado pelo modelo do Ativo, o heterogêneo com pseudoacoplamento representou as heterogeneidades decorrentes da disposição das camadas, responsáveis pela existência de caminhos preferenciais ao fluxo.

Outra verificação foi quanto à trajetória de tensões utilizada para a obtenção dos parâmetros que representam o comportamento geomecânico, tanto considerando a tabela de pseudoacoplamento quanto a compressibilidade. A trajetória edométrica, cujas curvas se aproximaram mais das geradas a partir do modelo do Ativo, resultou numa melhor representação do reservatório.

Os resultados obtidos sugerem que uma forma mais coerente para o cálculo da compressibilidade da rocha a ser utilizada nas simulações de fluxo convencionais é através da trajetória edométrica. Além disso, no caso da utilização de um único valor desse parâmetro para a representação do comportamento de um conjunto de rochas, *i.e.* compressibilidade equivalente, indica-se a realização de experimentos numéricos.

Quanto ao tempo de simulação, os modelos com pseudoacoplamento apresentaram tempos similares aos obtidos com a simulação convencional. Essa constatação corrobora para a utilização do pseudoacoplamento juntamente com uma melhor discretização litológica dos modelos de simulação, de acordo com a disponibilidade de informações. Para a geração de tabelas representativas do comportamento da rocha, também se justifica a realização de um maior número de ensaios de mecânica de rochas, se possível com medição de permeabilidade.

Uma ação mitigadora aos efeitos da geomecânica é baseada na redução da deformação. Para isso, foram testados três modelos em que a injeção de água foi iniciada na mesma data da produção, um com vazão de injeção igual à de produção, outra inferior e a terceira, superior. Essas estratégias de exploração, comparadas à original utilizada pelo Ativo, acabam por ser menos prejudiciais ao reservatório, aumentando a produção, ou mesmo antecipando-a, como no segundo caso. A escolha entre qual estratégia utilizar deve ser tomada considerando o volume de água produzido, a capacidade de tratamento e de injeção da água e com conhecimento do comportamento da rocha ao estado de tensões resultante.

7.2

Sugestões

É importante estar ciente que nem todas as rochas-reservatório podem ser suscetíveis aos efeitos da geomecânica, ou seja, é possível que estes não sejam relevantes o suficiente para influenciar os resultados obtidos através da simulação de reservatórios. Análises preliminares devem ser feitas, idealmente, a partir de ensaios laboratoriais que caracterizam o comportamento tensão-deformação-permeabilidade da rocha.

Visando uma melhor caracterização das fácies a serem representadas em modelos numéricos, sugere-se a realização de um

pacote de ensaios laboratoriais de mecânica de rochas, composto por cinco triaxiais de compressão, para a determinação da envoltória por cisalhamento, um hidrostático, para obtenção do fechamento, e dois edométricos que atinjam o *cap* em posições diferentes, de forma a melhor determinar seu formato. Essa caracterização mecânica completa visa aplicações não só de compactação do reservatório, mas também outras, como análises em regiões próximas ao poço. Sugere-se, também, que os ensaios de medição de permeabilidade sejam sempre feitos com medição de deformação, podendo ser para ensaios edométricos, já que esta é a trajetória mais parecida com o que ocorre no campo. Preferencialmente, que a permeabilidade seja medida nas direções vertical e horizontal.

Ao planejar os ensaios laboratoriais de mecânica de rochas, sugere-se a adoção de procedimentos que evitem a ocorrência do fenômeno de enfraquecimento da rocha, quando este não for o objetivo final do estudo. Para tanto, as amostras devem ficar saturadas por um mesmo período (curto) de tempo, antes de serem ensaiadas.

A relação exponencial entre porosidade e permeabilidade aqui apresentada foi baseada em ensaios em uma única fácies de rocha carbonática. Para melhor entendimento da abrangência dessa relação, sugere-se que seja feito um maior número de ensaios desta natureza.

Quanto aos ajustes numéricos dos ensaios laboratoriais, estes foram feitos no ABAQUS utilizando o modelo de Drucker-Prager com endurecimento no sentido do colapso. Sua adoção se justifica pela simplicidade. Mas, uma vez desenvolvida a metodologia, sugere-se que, em trabalhos futuros, sejam testados outros modelos mais complexos que possam representar melhor o comportamento da rocha, como os de estado crítico.

Uma forma de verificar a representabilidade do modelo heterogêneo com pseudoacoplamento sem a exigência de modelagem de extensas áreas é o ajuste de um teste de formação. Como o teste abrange uma área não muito grande ao redor do poço, seria interessante ajustar a pressão estática medida no campo com a prevista pelo modelo no IMEX.

Na metodologia proposta não foram considerados dados de física de rochas, que é uma importante fonte de conhecimento do comportamento

da rocha. Sugere-se que em trabalhos futuros esse tipo de informação seja incorporado. Uma possível contribuição é quanto à utilização de um modelo que represente o reservatório como um todo, ou uma parte maior, em que a sísmica pode contribuir no povoamento da distribuição das fácies horizontalmente. Outra possibilidade é na estimativa de propriedades mecânicas e elásticas, quando da indisponibilidade de amostras para uma fácies que se deseja incluir no modelo.