5 Aplicação da abordagem parcialmente acoplada e multiescala ao Campo de Namorado – Bacia de Campos

Após a apresentação dos conceitos mais importantes relacionados ao processo de modelagem local, bem como estudos de validação em modelos simplificados, o *workflow* para análises locais e o módulo gerenciador de submodelagem APOLLO foram aplicados a um caso de geometria real. O campo de Namorado foi utilizado nesta etapa como modelo global, tendo sido submetido a análises parcialmente acopladas em uma e duas vias utilizando a implementação ABAQUS-IMEX desenvolvida nesta Tese. O campo e os resultados globais obtidos estão apresentados no primeiro item deste capítulo. Após as simulações globais, foram desenvolvidos dois modelos locais, referentes a um poço vertical e a um poço sub-horizontal, de cujos resultados surge a discussão sobre a importância de se considerar os efeitos do acoplamento fluido-mecânico no escopo local. As referidas análises locais compõem o segundo item deste capítulo.

5.1 Modelagem Global empregando o acoplamento ABAQUS-IMEX

O Campo de Namorado está localizado na porção do Rio de Janeiro da Bacia de Campos, no Brasil, conforme ilustra a Figura 5.1. A Bacia de Campos é a principal portadora de recursos petrolíferos *offshore* no Brasil, localizando-se em ambiente sedimentar ao longo da plataforma continental do país. Mais de 1500 km², até a cota batimétrica de três mil metros, abrigam mais de 15 bacias sedimentares. O Campo de Namorado foi descoberto em 1975, sendo considerado o primeiro gigante da plataforma continental brasileira(Lucchesi, 1998). De acordo com Barboza (2005) a área de extração é de aproximadamente 20 km², situando-se a aproximadamente 80 km da costa, na porção Central/Norte da Bacia de Campos. Sacco et al. (2007) afirmam que o reservatório é essencialmente composto por arenitos turbidíticos, presentes na porção superior da formação Macaé, apresentando fechamento do tipo misto, ou seja, por trapeamento estrutural (falhas geológicas) e estratigráficos (*pinch-outs* decorrentes do processo de deposição).



Figura 5.1. Localização do Campo de Namorado na Bacia de Campos – Rio de Janeiro / Brasil - adaptado de Leite et al. (2008).

Nesta Tese, os desenvolvimentos realizados no código de acoplamento parcial, bem como no gerenciador de análises locais, foram aplicados ao campo de Namorado, utilizando um modelo baseado em dados fornecidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). O objetivo de utilizar este campo foi o de ilustrar o potencial de aplicação do *workflow* de análises locais (apresentado na metodologia desta Tese) em modelos geometricamente realistas, considerando os efeitos geomecânicos ao longo de sua vida produtiva. Os dados fornecidos estão reunidos em um modelo de diferenças finitas desenvolvido no IMEX, dentre eles a geometria do *grid* de simulação, as propriedades dos fluidos presentes no sistema e as distribuições de propriedades dos materiais porosos, como permeabilidade e porosidade. Neste item será apresentado o campo de Namorado pelo ponto de vista geomecânico, as hipóteses adotadas para a condução dos estudos, e os resultados das simulações globais parcialmente acopladas.

5.1.1 Apresentação do caso

Atendendo ao primeiro passo indicado no *workflow* apresentado na metodologia de pesquisa desta Tese (Figura 3.2), a geologia do local deve ser avaliada para identificação das feições presentes no sistema. A Figura 5.2 ilustra o mapa estrutural do topo do reservatório do campo de Namorado, bem como regiões saturadas predominantemente por água e por hidrocarbonetos, conforme

apresentado por Menezes (1990, apud BARBOZA, 2005). Segundo os autores, o reservatório foi dividido em quatro blocos em virtude dos diferentes níveis estruturais originados pela evolução pós-deposicional que, segundo Sacco et al. (2007), são delimitados por falhas normais conforme regime tectônico da região. O modelo de simulação de reservatórios se refere ao setor denominado "Bloco Principal", conforme indicado na Figura 5.2. Por esta razão, tal porção do campo será referida, a partir deste ponto da Tese, como o próprio Campo de Namorado.



Figura 5.2. Mapa estrutural do topo do reservatório do Campo de Namorado – Menezes (1990, apud BARBOZA, 2005).

Idealmente, a partir de levantamentos sísmicos e de poços exploratórios, seria possível construir um modelo geológico detalhado da região, incluindo reservatórios e rochas adjacentes, prosseguindo à referida avaliação das feições geológicas e unidades estratigráficas. Entretanto, dentre os dados fornecidos pela agência, não havia informações acerca das rochas adjacentes ao reservatório. Ainda, as informações referentes ao reservatório se encerram naquelas necessárias à simulação de fluxo, apenas. Por esta razão, houve a necessidade de se atribuir propriedades geomecânicas tanto para o reservatório quanto para as rochas adjacentes, assim como estimar uma geometria para o *overburden*. Não obstante,

a fase de lançamento dos poços, também sugerida no *workflow* de análises locais da Figura 3.2, é estritamente dependente de um detalhado mapeamento geológico, a partir do o qual se possa identificar feições importantes como falhas, planos de acamamento e corpos de sal. No modelo de fluxo utilizado como base para a presente aplicação, havia uma distribuição pré-existente de poços no reservatório, sendo adotada a mesma configuração para os estudos aqui realizados. Uma vez que a concepção geológica e o lançamento dos poços não figuram nos objetivos desta Tese, optou-se por criar um modelo de rochas adjacentes hipotético, porém coerente com um ambiente sedimentar em regime tectônico normal, adotando a distribuição de poços fornecida.

A Figura 5.3(a) ilustra conceitualmente o modelo de elementos finitos desenvolvido, estando destacadas as porções do reservatório e das rochas adjacentes (*overburden*, *sideburden* e *underburden*). A Figura 5.3(b), magnificada verticalmente para melhor apreciação da irregularidade geométrica do modelo, ilustra a profundidade dos limites superior e inferior do reservatório, considerando como cota zero o nível do mar. A figura ilustra ainda a profundidade do contato óleo-água e a posição da pressão de referência empregada na simulação de fluxo. Salienta-se que foi adotada uma lâmina d'água de 1200m, de tal sorte que o leito marinho se encontra a esta profundidade. O valor da pressão de fluido no ponto de referência é igual a 31.6 MPa. Cabe salientar que o reservatório estudado é *blackoil*, sendo as propriedades PVT dos fluidos fornecidas pelo modelo de fluxo estudado. O óleo considerado na análise consiste de um óleo médio, de 27.5° API.

Nos estudos de validação do acoplamento ABAQUS-IMEX, foi demonstrado que o contraste de rigidez entre o reservatório e as rochas ao seu redor evidencia os efeitos geomecânicos decorrentes do desenvolvimento da reserva. Nesta fase da Tese, foi adotado um módulo de elasticidade para a rocha do reservatório inferior ao das rochas adjacentes, visando evidenciar as diferenças de comportamento obtidas com o emprego do acoplamento em uma e duas vias. Os módulos de Young adotados, bem como as demais propriedades empregadas nos modelos de fluxo e tensões, estão apresentados no Quadro 5.1. No quadro também estão indicadas as vazões empregadas em cada um dos poços que compõem o campo. O modelo de fluxo é composto por nove poços produtores e seis poços injetores, conforme apresentado no *grid* de diferenças finitas ilustrado na Figura 5.4(a). A malha de elementos finitos do reservatório, ilustrada na Figura

5.4(b), foi gerada utilizando o *plug-in* GOCAD desenvolvido pelo Grupo de Geomecânica Computacional ATHENA / GTEP – PUC-Rio, o qual é capaz de construir uma malha de elementos finitos hexaédricos utilizando como referência um modelo de diferenças finitas. A descrição completa do *plug-in*, bem como a relação de suas potencialidades, podem ser encontradas em Albuquerque et al. (2013).



Figura 5.3. Geometria do problema analisado: (a) vistas frontal, lateral e superior, (b) indicação das profundidades característica do reservatório: base, topo, pressão de referência e contato óleo-água

| Propriedades | Valores |
|--|-------------|
| Densidade do óleo (Graus API) | 27.5 |
| Módulo de Young (reservatório) | 1.0 GPa |
| Módulo de Young (rochas adjacentes) | 70.0 GPa |
| Coeficiente de Poisson (reservatório) | 0.25 |
| Coeficiente de Poisson (rochas adjacentes) | 0.25 |
| Vazão de produção (cada poço) | 1000 m³/dia |
| Vazão de injeção máxima (cada poço) | 3000 m³/dia |

Quadro 5.1. Propriedades dos modelos de fluxo e tensões do modelo global – Campo de Namorado



Figura 5.4. Vista tridimensional do reservatório Namorado: (a) *grid* de diferenças finitas com o detalhe dos poços no reservatório e (b) malha de elementos finitos do reservatório gerada a partir do plug-in GOCAD

O modelo de reservatório em diferenças finitas apresenta valores de permeabilidade diferentes para cada célula, conforme dados fornecidos no modelo do Campo de Namorado. Todavia, a permeabilidade foi considerada isotrópica nas direções pertencentes ao plano horizontal, e anisotrópica em relação à direção vertical, assumindo valores inferiores nesta direção. O valor médio de permeabilidade nas células ativas do modelo é de 323.29mD na horizontal, e de 28.40mD na vertical. Convém ressaltar que, no presente estudo, a permeabilidade não foi empregada como parâmetro de acoplamento no processo iterativo. Quanto à porosidade, o valor médio nas células ativas do reservatório é de 0.20, sendo os valores mínimo e máximo iguais a 0.12 e 0.29, respectivamente. Na sequência de imagens composta pela Figura 5.5(a), Figura 5.5 (b) e Figura 5.5 (c) podem ser



observadas, respectivamente, as distribuições de permeabilidade horizontal, vertical e porosidade no reservatório.

Figura 5.5. Vista tridimensional do reservatório Namorado: (a) distribuição de permeabilidades na horizontal, (b) distribuição de permeabilidades na vertical e (c) distribuição de porosidades

O modelo global de elementos finitos construído contém 131376 nós e 111869 elementos. As tensões no modelo global foram inicializadas empregando o princípio das tensões virtuais. Neste princípio, uma tensão geostática é aplicada como condição inicial ao modelo de elementos finitos desenvolvido, no entanto, com todos os graus de liberdade de deslocamento completamente restringidos. A partir dos resultados da simulação desta primeira configuração, são coletadas as forças de reação resultantes em todos os nós, as quais serão aplicadas como condições de contorno em conjunto com a condição geostática inicial na simulação global de fato, sem as restrições nos nós. Desta forma, o campo de tensões desejado será gerado sem deslocamentos associados, pois as forças de reação aplicadas aos nós equilibram o sistema com deslocamentos nulos. Para a aplicação das tensões geostáticas foi necessário atribuir um valor de peso específico para as rochas do modelo, sendo adotado o valor de 22,2 kN/m³, conforme explicitado no Capítulo 4. Note-se que, no acoplamento parcial, as variações de pressão obtidas na simulação de fluxo são transferidas em forma de carregamentos nodais ao simulador de tensões, influenciando diretamente na variação das tensões efetivas do modelo de elementos finitos. Por esta razão, as simulações de elementos finitos são conduzidas em tensões efetivas, uma vez que no modelo de elementos finitos não estão sendo utilizados elementos poroelásticos, não sendo possível, portanto, realizar a distinção entre tensões totais e efetivas empregando elementos sem o grau de liberdade de pressão. Desta forma, para que todas as tensões resultantes do processo de acoplamento fossem efetivas, foi empregado na inicialização, de tensões um valor de peso específico para a rocha de 12,2 kN/m³, equivalente a um gradiente de tensões verticais efetivo de 12,2 kPa/m, considerando-se um gradiente de pressão de poros hidrostática de 10 kPa/m em todo o modelo.

Considerando o ambiente sedimentar e o regime normal, tomou-se a tensão vertical como a tensão principal maior, sendo as duas tensões horizontais iguais à metade da vertical, em magnitude. Embora o autor não dispusesse, dentre os dados fornecidos para o desenvolvimento desta Tese, dos dados reais sobre o estado de tensões *in situ* do campo de Namorado, considerou-se que as hipóteses assumidas em termos da inicialização de tensões foram coerentes dos pontos de vista geológico e numérico. Os resultados obtidos na campanha de simulação global, empregando o acoplamento ABAQUS-IMEX em uma e duas vias, estão apresentados no item a seguir.

5.1.2 Resultados das simulações globais

O campo de Namorado foi simulado em duas configurações de acoplamento parcial: em uma e duas vias. O acoplamento ABAQUS-IMEX em uma via indica que as variações do campo de pressões resultantes da simulação de diferenças finitas no IMEX são transferidas para o modelo de elementos finitos no ABAQUS a cada passo de tempo, sem o retorno da influência da simulação mecânica ao modelo de fluxo. O acoplamento ABAQUS-IMEX em duas vias indica que, no mesmo passo de tempo, ocorre o intercâmbio de informação entre simuladores através do processo iterativo implementado no código de acoplamento, até que a variação de pressão atinja o critério de pressão estabelecido para a convergência. Nas simulações globais desenvolvidas nesta Tese, o critério adotado para a convergência da pressão foi igual a 5 psi (0,0345 MPa). As simulações desenvolvidas no modelo global estudado nesta Tese foram realizadas para um período de 6 meses. A duração de uma simulação global, empregando o acoplamento parcial desenvolvido, pode ser bastante longa para um período de produção mais realístico, em função principalmente da simulação de modelos de elementos finitos com refinamentos similares ao estudado nesta Tese. Por esta razão, optou-se por adotar um tempo de produção menor. Todavia, apesar do tempo de produção relativamente pequeno, os efeitos geomecânicos podem ser claramente observados após 6 meses, não sendo este fato, portanto, prejudicial à busca do objetivo principal desta Tese. Novas implementações para aceleração do processo de simulação de elementos finitos estão em progresso no Grupo de Geomecânica Computacional ATHENA/GTEP/PUC-Rio, como a implementação de um programa de elementos finitos *in house*, denominado CHRONOS, o qual emprega conceitos de programação paralela em GPU para solução das matrizes de elementos finitos, bem como para a otimização dos processos inerentes ao acoplamento.

A Figura 5.6 apresenta a comparação tridimensional entre os campos de pressão de poros obtidos com o emprego do acoplamento parcial em uma e duas vias. Observa-se que os dois campos de pressão apresentados são distintos no mesmo período de produção, denotando a ocorrência dos efeitos geomecânicos já nesta fase da simulação. A Figura 5.7 apresenta o gráfico de evolução da pressão média no reservatório para ambas as configurações, corroborando a observação dos campos de pressão.



Figura 5.6. Vista tridimensional do campo de pressões no reservatório Namorado: (a) simulação ABAQUS-IMEX em uma via, (b) simulação ABAQUS-IMEX em duas vias



Figura 5.7. Variação da pressão média ao longo da simulação do Campo de Namorado para os acoplamentos em uma e duas vias

Cada poço produtor do modelo opera com vazão constante de 3000 m³/dia, sendo que os poços injetores apresentam limitação de vazão de 1000 m³/dia ou a manutenção de um valor mínimo de pressão de fundo de poço (BHP). A Figura 5.8 apresenta o gráfico com a variação do volume de óleo produzido (em condições de superfície) ao longo do período de análise, para as simulações em uma e duas vias. Também neste gráfico estão apresentadas as curvas de variação de volume de água injetada para o período analisado, para os acoplamentos em uma e duas vias. No total, foram produzidos 1,68 x 10⁶ m³ de óleo nas simulações em uma e duas vias, tendo sido injetados 1,12 x 10⁶ m³ de água na simulaçõe em uma via e 0,87 x 10⁶ m³ de água na simulação em duas vias. Observa-se que a taxa de acúmulo de volume injetado é variável, uma vez que a vazão se adapta a cada passo de tempo, de forma que a BHP limítrofe estabelecida seja mantida. Em ambas as análises, o volume injetado é inferior ao volume produzido.

Na Figura 5.9 estão apresentados os campos de deslocamento vertical (em metros) no reservatório após seis meses de produção do reservatório. Novamente os comportamentos resultantes dos acoplamentos em uma e duas são diferenciados, e estão de acordo com as variações de pressão de poros observadas na mesma perspectiva, sendo maiores na simulação de uma via. À maior queda de pressão, surgiram maiores deslocamentos, uma vez que as variações de pressão do modelo de fluxo são traduzidas na simulação de elementos finitos como variações de força que elevam as tensões efetivas do sistema.



Figura 5.8. Volume acumulado de óleo produzido e água injetada (em condições de superfície) ao longo do período de simulação do campo de Namorado



Figura 5.9. Vista tridimensional do campo de deslocamentos verticais no reservatório Namorado: (a) simulação ABAQUS-IMEX em uma via, (b) simulação ABAQUS-IMEX em duas vias

A Figura 5.10 ilustra, para as simulações parcialmente acopladas em uma e duas vias, as regiões do reservatório que sofreram compactação e expansão, de acordo com a deformação volumétrica. Valores positivos de deformação indicam expansão, enquanto que valores negativos se referem à compactação. Observa-se que ocorre o predomínio da compactação em ambos os casos analisados. Os panoramas ilustrados na figura sugerem que a região de expansão da simulação parcialmente acoplada em duas vias é ligeiramente menor do que na simulação em uma via, indicando mais uma vez que a consideração dos efeitos geomecânicos pode afetar o resultado do modelo global também neste aspecto.



Figura 5.10. Regiões de compactação e expansão do reservatório: (a) simulação ABAQUS-IMEX em uma via, (b) simulação ABAQUS-IMEX em duas vias

Na análise de deformação volumétrica do reservatório, constatou-se que a deformação do reservatório no acoplamento em uma via foi igual a -0,019% (compactação), e no acoplamento em duas vias foi de -0,010% (compactação). Na simulação em duas vias, portanto, a deformação volumétrica observada foi inferior à obtida na simulação em uma via, comportamento este refletido nos menores deslocamentos verticais verificados no reservatório considerando o acoplamento iterativo. Sabendo-se que o parâmetro que rege a variação do volume poroso na simulação acoplada é a compressibilidade da rocha, estes resultados apontam para a diminuição da compressibilidade do meio durante o processo iterativo, em relação ao valor de compressibilidade originalmente atribuído aos modelos.

Cabe salientar que, nesta aplicação ao campo de Namorado, os módulos de Young do reservatório e das rochas adjacentes são de maior magnitude quando comparados aos valores aplicados no caso de validação (modelo box). Ainda, na etapa de validação, o contraste de módulos entre o reservatório e o *overburden* era de 100 vezes, superior ao da presente aplicação, o qual é 70 vezes. Observa-se, logo, que estes dois fatores contribuem expressivamente na variação da compressibilidade da rocha ao longo da simulação: um reservatório com rigidez muito inferior à do *overburden* está mais suscetível aos efeitos de sua sobrecarga, e quanto menor a rigidez do *overburden*, maior o efeito de compactação que será exercido sobre o reservatório em virtude do seu peso sobre ele. Para contrastes de módulo menores, associados a elevados valores de rigidez (como os trabalhados nesta aplicação), observa-se um efeito contrário ao obtido na validação, o qual pode ser explicado pelo efeito de sustentação que o *overburden* proporciona ao sistema. Esta sustentação é efetivada através do efeito de arqueamento de tensões na rocha do *overburden*, conforme ilustra a figura reproduzida de Herwanger & Koutsabeloulis (2011), impedindo que a deformação volumétrica do reservatório se desenvolva livremente.



Figura 5.11. Ilustração do efeito de arqueamento da rocha capeadora em virtude do alívio de tensões efetivas provocado entre o limite do overburden e o reservatório – adaptado de Herwanger & Koutsabeloulis (2011)

Para o Campo de Namorado, o efeito do arqueamento foi avaliado através da comparação dos mapas de tensão vertical na rocha capeadora (imediatamente acima da rocha reservatório) ao final de seis meses de produção com o mapa de tensões inicial, conforme indicado na Figura 5.12. Nesta mesma figura é indicada uma trajetória horizontal na rocha capeadora, a partir da qual foram construídas as curvas de diferencial de tensões apresentadas na Figura 5.13. Observa-se que o efeito de arqueamento de tensões é mais pronunciado na simulação em uma via, uma vez que os contrastes de tensão vertical são maiores. Nesta configuração, as deformações do reservatório não são inibidas pela presença do *overburden*, conforme ocorre no caso iterativo, resultando na maior deformação volumétrica do reservatório e, por sua vez, na maior geração de tensões neste gráfico indica a maior eficiência no efeito de sustentação promovido pelo *overburden*.



Figura 5.12. Avaliação comparativa dos mapas de tensão vertical na rocha capeadora – avaliação no início das simulações e ao final de seis meses de produção considerando acoplamento em uma e duas vias



Figura 5.13. Diferencial de tensões verticais na rocha capeadora do campo de Namorado ao final de seis meses de produção para os acoplamentos em uma e duas vias

Portanto, no caso do campo de Namorado, a consideração das rochas adjacentes apresentou efeito benéfico na simulação, uma vez que a sua elevada rigidez fez com que as deformações volumétricas previstas fossem inferiores àquelas provenientes unicamente da simulação de fluxo. Através dos parâmetros de acoplamento, a queda de pressão foi sendo corrigida na análise de fluxo, assumindo valores menores ao longo do tempo, conforme indicaram as curvas de variação da pressão média na Figura 5.7. Como efeito disso, comportamentos relacionados a controles pré-estabelecidos na simulação de fluxo foram alterados, como por exemplo o volume de água injetado ao longo da simulação, indicadas na

Figura 5.8. No caso da simulação em duas vias, em virtude da menor queda de pressão, uma menor quantidade de água teve de ser injetada para a manutenção da BHP mínima estabelecida como limite em cada poço injetor. Mais uma vez, é comprovada a necessidade da consideração dos fenômenos acoplados na simulação de reservatórios, pois as alterações nos campos de pressão ocasionadas afetam diretamente as variáveis de interesse ao analista de reservatórios.

Na Figura 5.14 é possível observar o campo de deslocamentos nas rochas adjacentes, em virtude do desenvolvimento do reservatório, para ambas as configurações de acoplamento parcial empregadas. Os campos de deslocamento vertical podem ser apreciados em dois cortes no modelo (transversal e longitudinal), magnificados em duas vezes na direção vertical. De forma global, os deslocamentos na simulação em duas vias foram menos expressivos também no *overburden*, seguindo as mesmas tendências demonstrada pelo reservatório.



Figura 5.14. Isovalores de deslocamento vertical nas rochas adjacentes ao reservatório: (a) simulação ABAQUS-IMEX em uma via, (b) simulação ABAQUS-IMEX em duas vias

Deve ser salientado que, a ocorrência de comportamentos distintos em setores diferentes do reservatório (expansão/ compactação) reafirma a necessidade

de se levar em conta a análise de integridade estrutural dos poços presentes no sistema, visto que o estado de tensões decorrente das ações geomecânicas também apresenta heterogeneidade espacial. Após a obtenção dos resultados do modelo global, é possível avançar no *workflow* de análises locais desenvolvido no Capítulo 3 desta Tese. O próximo item apresenta uma breve reflexão acerca dos resultados globais obtidos até o momento.

5.1.3 Discussão

Os resultados da análise global indicaram que o acoplamento ABAQUS-IMEX gerou resultados distintos quando comparadas simulações iterativas ou explícitas. A primeira vista, os resultados obtidos empregando o acoplamento parcial em duas vias foram mais favoráveis à integridade do sistema, de tal sorte que as variações de pressão e deslocamento foram menos expressivas neste caso. Todavia, deve-se ter cuidado ao tomar este resultado como válido para configurações diferentes, visto que o comportamento do sistema pode ser o oposto em alguns casos, como ocorreu na validação ABAQUS-IMEX.

Os gradientes de pressão, deslocamento e tensão se mostraram sensíveis à consideração dos efeitos geomecânicos no caso estudado, e por esta razão o uso de uma técnica de acoplamento pouco robusta poderia levar à obtenção de resultados globais pouco representativos. Haverá situações em que os resultados do acoplamento em uma ou duas vias poderão apresentar pouca diferença, como nos casos em que se tenham fluidos de elevada compressibilidade em meios porosos muito rígidos. Contudo, o emprego de técnicas acopladas, que levem em conta o efeito do meio poroso sobre a variação das pressões de forma iterativa, contempla um espectro de situações mais abrangente, permitindo ao projetista de reservatórios um maior espectro de hipóteses, e ao mesmo tempo um maior controle sobre as variáveis individualmente.

Portanto, para que seja dado prosseguimento ao *workflow* de análises locais desenvolvido, é imprescindível que os resultados das simulações globais levem em conta os efeitos das rochas adjacentes, pois a elegibilidade de regiões para análise local está intimamente vinculada às solicitações geradas no sistema. No próximo item deste capítulo serão apresentadas as análises locais desenvolvidas para dois poços no campo de Namorado.

5.2 Modelagem Local empregando a técnica de submodelagem

Após a simulação do modelo global, partindo de uma configuração de poços inicialmente atribuída ao sistema, é necessário eleger as regiões de interesse para a análise local. Segundo o *workflow* de análises locais, desenvolvido e apresentado no Capítulo 3 desta Tese, devem ser avaliados os campos de tensão e deslocamentos resultantes da análise global, em busca das regiões com gradientes ou concentrações expressivas das variáveis mencionadas.

As maiores variações de tensão e deslocamento encontradas no modelo global ocorrem na rocha do reservatório, promovidas pelas atividades de injeção e produção. Evidentemente que regiões contidas no volume de rochas adjacentes ao reservatório também sofrem os efeitos do desenvolvimento, devendo ser incluídas na pauta de análises locais. Todavia, no presente estudo foram adotadas apenas duas regiões para análise local de poço dentro do reservatório, uma vez que nos dados disponíveis não havia informações acerca das trajetórias dos poços no *overburden*, limitando o estudo à análise dos poços definidos no modelo de fluxo. Cabe salientar, porém, que metodologia desenvolvida se aplica à análise da integridade de poços em qualquer porção de sua trajetória.

Os poços avaliados foram considerados com revestimento e cimento, visando ilustrar o potencial de análise do *workflow* de análises locais e o módulo APOLLO. Mais uma vez, caso o poço não possuísse revestimento, ou mesmo se não houvesse cimentação na região de análise, seria possível empregar a mesma metodologia apresentada, com algumas alterações em termos da geração de malha local.

5.2.1 Análise de integridade em poço vertical

Para a aplicação do *workflow*, foi escolhido o poço produtor vertical denominado "P-001" para a análise local. Conforme mencionado na validação do módulo APOLLO, um mesmo modelo local pode ser empregado em diversos poços, para diferentes análises, desde que a orientação do poço seja a mesma do submodelo desenvolvido. Para esta aplicação, empregou-se o mesmo modelo local utilizado na fase de validação do módulo APOLLO na análise de um setor do poço vertical "P-001" no campo de Namorado. Salienta-se que, apesar de

hipotético, o modelo de poço utilizado apresenta geometria realística, bem como propriedades constitutivas adequadas aos materiais envolvidos e aos modelos empregados para a representação do cimento e do revestimento.

A região de abrangência do submodelo em relação ao poço completo está destacada na Figura 5.15. O diâmetro da perfuração é equivalente ao de uma broca de 8 ½" (215.9 mm), e o diâmetro externo do revestimento equivale a uma coluna de 6 5/8" (168.3 mm), resultando em um diâmetro externo de 6.05" (153.6 mm) e espessura de 0,288" (7,3 mm) para uma coluna de *grade* J-55, conforme Bourgoyne et al. (1986). A malha de elementos finitos utilizada nesta análise é a mesma apresentada na Figura 4.38, com elementos finitos hexaédricos lineares (C3D8) em toda a malha, totalizando 46617 nós e 44800 elementos finitos do modelo local aumenta na vizinhança do poço, visando a melhor captura dos fenômenos ao redor do revestimento, bem como evitando problemas numéricos relacionados ao índice aspecto dos elementos. As propriedades empregadas no modelo local foram as mesmas empregadas neste modelo na validação, e estão reapresentadas no Quadro 5.2 por conveniência.

| Solicitações | Entradas |
|--|------------------------|
| Nome do poço no modelo global | P-001 |
| Regra de Translação do poço (x, y, z) [m] | (4562, 4505, -2997.25) |
| Módulo de Young da rocha reservatório | 1 GPa |
| Coeficiente de Poisson da rocha reservatório | 0.25 |
| Módulo de Young do cimento sólido | 2.0 GPa |
| Coeficiente de Poisson do cimento sólido | 0.08 |
| Módulo de Young do revestimento | 210 GPa |
| Coeficiente de Poisson do revestimento | 0.28 |
| Tensão de plastificação do revestimento | 275,79 MPa |
| Limite do hardening do revestimento | 551.58 MPa |
| Gradiente de pressão provocado pelo fluido de perfuração | 11748.62 Pa/m |
| Gradiente de pressão provocado pelo cimento líquido | 18561.64 Pa/m |
| Gradiente de tensão efetiva atribuído à rocha | 12324 Pa/m |
| Gradiente de pressão hidrostática (água a 50° C) | 9880 Pa/m |

Quadro 5.2. Propriedades empregadas na modelagem local do poço P-001 do campo de Namorado



Figura 5.15. Localização do submodelo em relação ao modelo global (a) efeitos do desenvolvimento do reservatório observados ao redor do poço no modelo global, (b) seção vertical da região do poço no reservatório indicando posição do submodelo e (c) modelo empregado para análise local do poço P-001 no campo de Namorado

Uma das maiores finalidades de se empregar a análise local, além da verificação da integridade do revestimento e do cimento, consiste na avaliação da influência do poço como entidade estrutural na região de rocha ao seu redor. Por esta razão, na implementação do módulo APOLLO foi introduzida a variável que define o limite interno para aplicação das condições de submodelagem, de acordo com o raio do poço. A fim de verificar se as condições de contorno do submodelo (deslocamentos provenientes do modelo global) foram aplicadas a uma distância adequada em relação ao limite da escavação, foram testados onze modelos com diferentes definições de região de aplicação interna das condições de contorno da submodelagem. O Quadro 5.3 apresenta as configurações testadas, onde os nomes das análises indicam proporção da distância da região considerada em relação à parede da perfuração (Fator n, multiplicativo de R que é o raio da perfuração), variando do raio do poço até o limite externo do submodelo.

| Nome da análise (nR) | Distância da parede da perfuração | Distância ao eixo do poço | |
|----------------------|--------------------------------------|------------------------------|--|
| 1R | 0.000 m | 1.104 m | |
| 2R | 1.104 m | 2.208 m | |
| 3R | 2.208 m | 3.312 m | |
| 4R | 3.312 m | 4.416 m | |
| 5R | 4.416 m | 5.520 m | |
| 10R | 1.212 m | 1.104 m | |
| 20R | 2.350 m | 2.242 m | |
| 40R | 4.278 m | 4.170 m | |
| 90R | 9.948 m | 9.840 m | |
| 460R* | 460R* 50.00 m | | |

Quadro 5.3. Configurações avaliadas para verificação da influência da região de aplicação dos deslocamentos do modelo global no submodelo

*limite do submodelo

A Figura 5.16 apresenta a trajetória adotada para a comparação dos deslocamentos resultantes da variação de região interna de transferência. A trajetória adotada inicia na parede interna do revestimento, se estendendo até a distância de cinco vezes o raio do poço, na direção X (do deslocamento U1). Para estas análises foi empregado o resultado global da simulação em duas vias. Na Figura 5.17 são apresentadas as curvas de evolução dos deslocamentos na trajetória indicada, para os diversos Fatores n testados. Foi observado que cada região de transferência adotada gerou comportamentos distintos, principalmente para valores extremos do Fator n. Para valores intermediários do fator, os comportamentos observados foram muito similares entre si, principalmente na região próxima à completação. A rocha se mostrou mais sensível à variação do Fator n, principalmente nas regiões mais afastadas ao poço. Todavia, as disparidades encontradas nestas regiões de rocha não se refletiram no entorno do cimento e do revestimento para os valores intermediários do Fator n.



Figura 5.16. Indicação da trajetória escolhida para avaliação dos deslocamentos do modelo local nas diferentes configurações estudadas (variando de 1R à 5R).



Figura 5.17. Comparação gráfica da evolução dos deslocamentos na direção da trajetória definida na região do poço

A Figura 5.18 apresenta o detalhamento dos deslocamentos na direção U1 no revestimento, no cimento e na porção de rocha adjacente às entidades da completação. Os deslocamentos obtidos com Fator n de 1 e 1.5 – ou seja, deslocamentos do modelo global aplicados na parede da escavação e à 1.5R da parede, respectivamente – juntamente com a configuração 460R – limite externo do submodelo – resultaram nas curvas mais distantes do comportamento

apresentado pelos valores intermediários do Fator *n*. Para os valores menores, é possível que a aplicação dos deslocamentos do modelo global tenha sido realizada dentro da região de influência do poço como ente estrutural no sistema, resultando em deslocamentos nodais incoerentes quando comparados com os obtidos com fatores mais elevados. A discrepância observada ao uso do Fator 460 indica a existência de uma limitação também na atribuição de fronteiras muito distantes ao poço, de forma que os efeitos do modelo global sejam amortecidos pela porção de rocha até chegarem ao poço. Adotando-se um ponto na parede da perfuração (ponto de início da trajetória apresentada na Figura 5.16) foram comparados os deslocamentos nas direções X, Y e Z (U1, U2 e U3 respectivamente) em função do Fator *n* adotado na simulação, conforme apresentado no gráfico da Figura 5.19. Optou-se por apresentar o eixo das ordenadas do gráfico em escala logarítmica para a melhor apreciação das variações.



Figura 5.18. Detalhamento dos deslocamentos na região da completação para os vários Fatores *n* testados (valores de *n* entre 1 e 460, junto ao poço e no extremo do modelo, respectivamente)



Figura 5.19. Comparação gráfica da evolução dos deslocamentos (nas direções U1, U2 e U3, e na trajetória definida ao redor do poço.

Os resultados da comparação indicam que, adotando-se valores entre a fronteira 4R até a fronteira 40R, o resultado no revestimento não é afetado pelas variações nos modelos em nenhuma das direções avaliadas. Esta análise indica que a região de influência do poço como ente estrutural no modelo local se encerra no volume de rocha definido pelo raio 4R. Ainda, para valores superiores a 40R, é possível que o grande volume de graus de liberdade entre a fronteira e o poço esteja amortecendo os efeitos provenientes do modelo global. Portanto, pelas razões expostas, os modelos locais simulados para a análise do efeito geomecânico sobre a integridade de poços nesta Tese empregarão a aplicação dos deslocamentos do modelo global nos nós do contorno externo do submodelo em conjunto com os nós pertencentes à faixa de aceitação ao redor da perfuração, definida nesta validação.

Após definida a região de aplicação das condições de contorno de submodelagem, o modelo local adotado foi simulado considerando os acoplamentos em uma e duas vias, conforme as simulações do modelo global. Cabe ser ressaltado que as análises relativas ao comportamento do submodelo levaram em consideração um critério de ruptura para o revestimento, de acordo com a tensão de plastificação indicada no Quadro 5.2. O comportamento dos demais materiais (reservatório e cimento) foi mantido como elástico linear nesta

Tese. Nos modelos avaliados nesta tese, as fases anteriores à aplicação dos efeitos do desenvolvimento do reservatório independem da metodologia de acoplamento empregada, pois estão sendo avaliados poços construídos previamente ao início da vida produtiva do reservatório. Caso a perfuração de um novo poço fosse realizada durante o período de desenvolvimento, os efeitos geomecânicos anteriores à sua construção deveriam ser considerados, de tal sorte que as condições iniciais seriam distintas em modelos simulados em uma e duas vias. A sequência de figuras contida entre a Figura 5.20 e a Figura 5.24 apresenta os comportamentos na região do poço nas fases que antecedem a aplicação dos efeitos geomecânicos. Todos os deslocamentos obervados nestas etapas são coerentes com os valores de pressão e densidade de fluidos presentes no interior da escavação, bem como com o estado de tensões atribuído ao modelo local. Nesta fase, observa-se a simetria dos deslocamentos ao redor do poço vertical, uma vez que sua orientação é paralela à tensão principal máxima do sistema, e as duas tensões atuantes no plano perpendicular ao seu eixo são iguais.



Figura 5.20. Campos de deslocamento ao final da perfuração da rocha – Poço vertical no campo de Namorado (a) corte horizontal central e (b) corte vertical central



Figura 5.21. Campos de deslocamento ao final da aplicação da pressão de fluido na escavação – Poço vertical no campo de Namorado (a) corte horizontal central e (b) corte vertical central



Figura 5.22. Campos de deslocamento ao final da colocação da malha referente ao revestimento – Poço vertical no campo de Namorado (a) corte horizontal central e (b) corte vertical central



Figura 5.23. Campos de deslocamento ao final da aplicação da pressão de cimento em estado líquido – Poço vertical no campo de Namorado (a) corte horizontal central e (b) corte vertical central



Figura 5.24. Campos de deslocamento ao final da colocação da malha referente ao cimento em estado sólido – Poço vertical no campo de Namorado (a) vista superior e (b) corte vertical central

Na Figura 5.25 podem ser observados mapas de contorno com isovalores de tensão ao longo do processo de completação. Assim como no caso de validação, as tensões horizontais apresentam a mesma magnitude, $\sigma_H = \sigma_h = 0.5 * \sigma_V$, e por esta razão a disposição apresentada das tensões S11 se repete em S22, porém

girada de 90°, no plano horizontal perpendicular ao poço vertical. Tal disposição não possuiria esta simetria caso o poço não estivesse alinhado com a direção principal vertical, (neste caso, igual à S11), ou se o poço avaliado estivesse sendo perfurado após o início do desenvolvimento do campo.



Figura 5.25. Campos de tensão ao redor da região de interesse do poço P-001 nas fases de (a) colocação do revestimento, (b) aplicação da pressão de cimento no estado líquido e (c) aplicação da malha do cimento no estado sólido

A partir de agora, o modelo pode receber os efeitos do desenvolvimento do reservatório, provenientes das simulações globais em uma e duas vias. Nesta aplicação, a submodelagem se desenvolverá para o final do sexto mês de produção do reservatório, considerando as variações de pressão de fluido no interior do poço no passo de tempo referente ao final deste período.

A Figura 5.26 e a Figura 5.27 apresentam, respectivamente, as comparações dos campos de deslocamento entre os modelos global e local, em duas vistas distintas (planos médios horizontal e vertical), para as simulações em uma e duas vias. Assim como na validação, esta comparação comprova a qualidade da transferência de informações entre modelos. Ao contrário do observado no caso simplificado, os campos de tensão e deslocamentos gerados ao redor do poço "P-001" não apresentaram qualquer simetria em relação ao poço. Naturalmente, este comportamento era esperado, uma vez que as solicitações sobre a rocha não dependem somente deste poço, mas do conjunto que governa o comportamento como um todo. Aspectos como a geometria irregular do reservatório e a sensibilidade das propriedades dos fluidos ao processo de produção interferem

sobre a resposta do sistema de forma global. O módulo APOLLO, empregando a técnica de submodelagem do ABAQUS, é capaz de transferir tais efeitos ao âmbito local, de forma que a resposta da análise da integridade leve em consideração a tridimensionalidade característica dos efeitos geomecânicos desenvolvidos no reservatório ao longo de sua vida produtiva.



Vista superior: Plano horizontal normal ao eixo Z (Z = 3012.5m)



Vista frontal: Plano vertical normal ao eixo Y (Y = 4505.0m)

Figura 5.26. Comparação entre os campos de deslocamentos obtidos nos modelos global e local ao final da análise local no poço P-001 para o acoplamento em uma via





Vista frontal: Plano vertical normal ao eixo Y (Y = 4505.0m)

Figura 5.27. Comparação entre os campos de deslocamentos obtidos nos modelos global e local ao final da análise local no poço P-001 para o acoplamento em duas vias

Na Figura 5.28, observa-se os campos de deslocamento resultantes dos efeitos do desenvolvimento do reservatório de Namorado. Os deslocamentos experimentados pelo revestimento nas simulações considerando o acoplamento em uma via apresentam uma magnitude maior quando comparados aos resultados em duas vias, fato que corrobora os resultados encontrados nas análises de variação de pressão de poros do modelo global na região de análise (Figura 5.8). Pode ser observado que os deslocamentos apresentam ordens de grandeza similares nas três direções avaliadas, enfatizando a necessidade de projetar o revestimento de forma a levar em consideração o efeito tridimensional das solicitações, as quais podem levar o poço ao colapso não somente por compressão, mas também por mecanismos envolvendo cisalhamento. Além disso, em termos da avaliação das tensões pelo critério de von Mises, os resultados em uma via sugerem uma concentração maior de tensões em relação aos resultados em duas vias. Embora o período analisado seja curto, é possível prever que o colapso do revestimento, provavelmente, ocorrerá antecipadamente na simulação em uma via.



Figura 5.28. Deslocamentos no revestimento do poço P-001 decorrentes dos efeitos de produção do reservatório de Namorado após 6 meses de simulação em uma e duas vias (a) na direção horizontal X (b) na direção horizontal Y e (c) na direção vertical Z



Figura 5.29. Tensões no revestimento do poço P-001 decorrentes dos efeitos de produção do reservatório de Namorado após 6 meses de simulação em uma e duas vias (a) na direção horizontal X (b) na direção horizontal Y e (c) na direção vertical Z

De forma a ilustrar as deformações devido ao desenvolvimento do campo de Namorado, apresenta-se a deformada do revestimento ao final de 6 meses para as simulações acopladas em uma e duas vias na Figura 5.30. Assim como já constatado, a magnitude dos deslocamentos na simulação em uma via resultou em uma concentração de tensões maior no revestimento, alterando de forma mais expressiva a sua estrutura. Vale ser salientado que foi aplicado um fator de magnificação para a deformada (50 vezes) de forma a ilustrar com clareza as diferenças nos resultados. Em ambas as simulações, o revestimento atingiu o começo da plastificação nos extremos do poço, uma vez que o máximo nível de tensões atingido ao final dos seis meses de simulação foi 284,9 MPa, logo acima do valor adotado para o critério de plastificação de 275,8 MPa, conforme se observa nas distribuições de tensões pelo critério de von Mises.



Figura 5.30. Tensões pelo critério de von Mises no revestimento para os acoplamentos em uma e duas vias – deformada do revestimento do poço P-001 devido ao desenvolvimento com campo

O emprego do módulo APOLLO, associado ao uso do acoplamento ABAQUS-IMEX na simulação global, demonstrou-se viável do ponto de vista técnico na análise do poço "P-001" do campo de Namorado. No item a seguir, uma aplicação de caráter mais geral será apresentada, consolidando a aplicabilidade do fluxo de trabalho proposto nesta Tese.

5.2.2 Análise de integridade em poço sub-horizontal

Para ilustrar a aplicabilidade do *workflow* multi-escala e do módulo APOLLO em casos de geometria mais complexa, foi desenvolvido um modelo local de um poço sub-horizontal do modelo de Namorado. Foi escolhido o poço sub-horizontal "P3" do modelo global, localizado na porção superior do reservatório. A Figura 5.31 apresenta o campo de pressões de poros no início da simulação de fluxo, na região do poço escolhido para a análise local. Na figura é apresentado também um grifo da região analisada. Um dos critérios empregados na escolha da região de análise foi o fato de que o valor da queda de pressão neste local, após 180 dias de desenvolvimento do reservatório, fez com que a pressão de poros atingisse valores inferiores ao da pressão de bolha, gerando gás no sistema. Por ser o poço com a maior queda de pressão no modelo, optou-se por avaliar a sua integridade nesta etapa.



Figura 5.31. Campo de pressão de poros inicial ao redor do poço produtor sub-horizontal P3: região do modelo local indicada no detalhe da seção vertical que cruza o poço

Mais uma vez salienta-se que os dados de poço não estavam disponíveis para os modelos avaliados nesta Tese, tendo sido empregados também neste caso valores hipotéticos para as propriedades do poço. Apesar de hipotético, o modelo de poço utilizado apresenta geometria realística, bem como propriedades constitutivas adequadas aos materiais envolvidos e aos modelos empregados para a representação do cimento e do revestimento. O diâmetro da perfuração é equivalente ao de uma broca de 8 $\frac{1}{2}$ " (215.9 mm), e o diâmetro externo do revestimento equivale a uma coluna de 6 5/8" (168.3 mm), resultando em um diâmetro externo de 6.05" (153.6 mm) e espessura de 0,288" (7,3 mm) para uma coluna de *grade* H-40 (Bourgoyne et al., 1986). Optou-se pelo emprego de uma coluna com um *grade* inferior nesta análise para que o revestimento chegasse ao

estado limite do material no período de desenvolvimento avaliado no modelo global, possibilitando a avaliação da plastificação do revestimento.

A malha de elementos finitos utilizada nesta análise está apresentada na Figura 5.32, sendo constituída de elementos finitos hexaédricos lineares (C3D8) em toda a malha, totalizando 693189 nós e 681240 elementos no modelo. O refinamento da malha de elementos finitos aumenta na vizinhança do poço, visando a melhor captura dos fenômenos ao redor do revestimento. As propriedades empregadas neste modelo local, bem como outras variáveis necessárias à execução do módulo APOLLO, estão indicadas no Quadro 5.4. Para a aplicação das condições de contorno ao submodelo, foi adotado o mesmo critério empregado no poço "P-001", utilizando o valor de 10R na definição da porção interna do modelo que receberá a aplicação dos deslocamentos provenientes do modelo global.

Quadro 5.4. Propriedades empregadas na modelagem local do poço P3 do campo de Namorado

| Solicitações | Entradas |
|---|--------------------------|
| Nome do poço no modelo global | P3 |
| Regra de Translação do poço (x, y, z) [m] | (5854.5, 4370, -3002.74) |
| Módulo de Young da rocha reservatório | 68.95 MPa |
| Coeficiente de Poisson da rocha reservatório | 0.25 |
| Módulo de Young do cimento sólido | 2.0 GPa |
| Coeficiente de Poisson do cimento sólido | 0.08 |
| Módulo de Young do revestimento | 210 GPa |
| Coeficiente de Poisson do revestimento | 0.28 |
| Tensão de plastificação do revestimento | 0.276 GPa |
| Limite do hardening do revestimento | 0.552 GPa |
| Gradiente de pressão provocado pelo fluido de perfuração | 11748.62 Pa/m |
| Gradiente de pressão provocado pelo cimento líquido | 18561.64 Pa/m |
| Gradiente de tensão efetiva atribuído à rocha | 12324 Pa/m |
| Gradiente de pressão hidrostática (água a 50° C) | 9880 Pa/m |
| Limite interno de aplicação das condições de submodelagem | 10R |



Figura 5.32. Malha de elementos finitos do modelo local do poço P3: (a) perspectiva do poço produtor sub-horizontal em escala local e (b) detalhe das malhas do cimento e revestimento.

O modelo de poço sub-horizontal foi simulado para verificação dos efeitos geomecânicos à consideração dos acoplamentos em uma e duas vias. O critério de ruptura adotado para o revestimento foi o de von Mises, sendo estabelecida a tensão de plastificação indicada no Quadro 5.4. Para a análise deste poço em particular, optou-se por utilizar um valor de tensão de plastificação relativo ao extremo inferior esperado para o grade utilizado, de forma que o revestimento atingisse o estado plástico no período analisado. O comportamento dos materiais que definem o reservatório e o cimento no modelo local foi mantido como elástico linear nesta análise, assim como no poço vertical. O detalhamento dos isovalores de deslocamento ilustrados entre a Figura 5.33 e a Figura 5.37 representam os comportamentos na região do poço nas fases que antecedem a aplicação dos efeitos geomecânicos, para ambos os modelos avaliados. Salienta-se novamente que os modelos locais avaliados nesta Tese se referem a poços construídos antes do início do desenvolvimento do reservatório, de forma que as fases anteriores à aplicação dos efeitos geomecânicos independem da metodologia de acoplamento empregada.

Na Figura 5.33 observa-se que a perfuração da rocha resulta em deslocamentos mais expressivos na direção sub-vertical, provocados pela maior magnitude das tensões geostáticas na direção da profundidade. À aplicação da pressão de fluido de perfuração, Figura 5.34, os deslocamentos sub-verticais são neutralizados, sendo gerados deslocamentos mais expressivos no plano sub-horizontal paralelo ao eixo do poço. A colocação do revestimento, indicada na Figura 5.35, não afetou as tensões geradas na rocha pela perfuração. A inclusão do cimento no estado líquido, indicada na Figura 5.36, provocou aumento na magnitude dos deslocamentos na rocha adjacente à escavação, uma vez que o peso específico do cimento neste estado é superior ao do fluido de perfuração. Ao endurecimento do cimento, ilustrado na Figura 5.37, o campo de deslocamentos na rocha pela perfunação do líquido. Tal comportamento está de acordo com a hipótese assumida nesta Tese, de que as tensões geradas pelo cimento endurecido na formação se assemelham à pressão exercida na formação rochosa pelo cimento enquanto líquido.



Figura 5.33. Campos de deslocamento ao final da perfuração da rocha – Poço sub-horizontal no campo de Namorado (a) corte normal ao poço e (b) corte ao longo ao poço



Figura 5.34. Campos de deslocamento ao final da aplicação da pressão de fluido na escavação – Poço sub-horizontal no campo de Namorado (a) corte normal ao poço e (b) corte ao longo ao poço



Figura 5.35. Campos de deslocamento ao final da colocação da malha referente ao revestimento – Poço sub-horizontal no campo de Namorado (a) corte normal ao poço e (b) corte ao longo ao poço



Figura 5.36. Campos de deslocamento ao final da aplicação da pressão de cimento em estado líquido – Poço sub-horizontal no campo de Namorado (a) corte normal ao poço e (b) corte ao longo ao poço



Figura 5.37. Campos de deslocamento ao final da colocação da malha referente ao cimento em estado sólido – Poço sub-horizontal no campo de Namorado (a) corte normal ao poço e (b) corte ao longo ao poço

Os mapas de contorno com isovalores de tensão na região do poço podem ser observados na Figura 5.38, visualizados em plano perpendicular à direção da perfuração. A coluna (a) da figura se refere à colocação do revestimento na perfuração preenchida por fluido de perfuração, a coluna (b) se refere à aplicação da pressão da pressão de cimento líquido no espaço anular e a coluna (c) indica o

cimento no estado endurecido. Neste caso, o poço não está orientado segundo as tensões principais, como no caso do poço vertical, não sendo esperado, portanto, que as tensões ao redor do poço se comportassem de forma homogênea nas três direções avaliadas. Observa-se que o efeito da pressão de cimento ocorre tanto no revestimento quanto na formação e, ao endurecimento do cimento, as tensões nas direções principais (S11, S22 e S33) passam a ser também absorvidas pelo material do cimento. As tensões pelo critério de von Mises também indicam a maior solicitação na rocha e no revestimento após a colocação do cimento, bem como a absorção de esforços por parte do cimento no seu estado endurecido.



Figura 5.38. Campos de tensão na região do poço P3 nas fases de (a) colocação do revestimento, (b) aplicação da pressão de cimento no estado líquido e (c) aplicação da malha do cimento no estado sólido

Nota-se que a simulação numérica do processo de perfuração e completação se mostra ainda mais relevante neste cenário de orientação do poço diversa à qualquer das direções principais, uma vez que permite a análise da evolução das tensões ao redor de poço, bem como das entidades que compõem a completação, honrando a distribuição de tensões existente no campo. O último passo da simulação, também executado automaticamente pelo Módulo APOLLO, consiste na aplicação dos efeitos geomecânicos obtidos na simulação global, para os acoplados em uma e duas vias. Conforme realizado no poço vertical, o passo da submodelagem se desenvolverá para o final do sexto mês de produção do reservatório, considerando as variações de pressão de fluido no interior do poço no passo de tempo referente ao final deste período, provenientes da simulação de fluxo.

A Figura 5.39 e a Figura 5.40 apresentam, respectivamente, as comparações dos campos de deslocamento entre os modelos global e local, para os acoplamentos em uma e duas vias nos planos paralelo e perpendicular ao eixo do poço. Em tais figuras, devido ao elevado grau de refinamento deste modelo, a malha do modelo local foi omitida para a melhor apreciação da comparação, estando indicadas as posições do poço nos cortes avaliados. Mais uma vez, os campos de deslocamentos gerados ao redor do poço P3 não apresentam qualquer simetria em relação ao poço. Naturalmente, este comportamento era novamente esperado, não somente pela orientação do poço em relação às direções principais das tensões no campo, mas principalmente pela diversidade de fatores influentes no comportamento do campo como um todo, como a gama de variáveis dependentes do espaço (como a distribuição assimétrica dos poços) e do tempo (como as vazões de injeção) presentes nos modelos globais de fluxo e tensões.

Observa-se a reprodutibilidade dos deslocamentos globais no modelo local, indicando mais uma vez o sucesso da transferência de deslocamentos pela técnica de submodelagem do ABAQUS. Deve ser ressaltado que a porção superior do submodelo desenvolvido ao redor do poço P3 consiste do *overburden*, justificando o comportamento altamente heterogêneo em termos dos deslocamentos transmitidos ao modelo local. É possível que a rigidez da rocha capeadora tenha afetado no comportamento geomecânico observado ao redor do poço avaliado na simulação em duas vias, provocando menores deslocamentos verticais pelo enrijecimento do sistema.



Figura 5.39. Comparação entre os campos de deslocamentos obtidos nos modelos global e local ao final da análise local no poço P3 para o acoplamento em uma via



Figura 5.40. Comparação entre os campos de deslocamentos obtidos nos modelos global e local ao final da análise local no poço P3 para o acoplamento em duas vias

U, U3

U, U3

Na Figura 5.41, observa-se os campos de deslocamento no revestimento, resultantes dos efeitos do desenvolvimento do reservatório de Namorado sobre o poço sub-horizontal P3, nas direções X, Y e Z (U1, U2 e U3, respectivamente). Neste caso, observou-se novamente que os deslocamentos totais experimentados pelo revestimento nas simulações considerando o acoplamento em uma via apresentaram maior magnitude quando comparados aos resultados em duas vias. No entanto, cabe salientar que parte dos deslocamentos observados em ambas as simulações se refere a uma translação do modelo como um todo, devido ao desenvolvimento do campo. Avaliando-se particularmente a diferença entre o maior e o menor deslocamento experimentado pelo revestimento em cada análise, pode ser observado que os deslocamentos relativos foram muito similares para as simulações em uma e duas vias, porém se apresentando superiores no caso iterativo. No Quadro 5.5 podem ser observados os valores diferenciais nos deslocamentos das três direções principais e, à exceção do deslocamento vertical U3, os demais deslocamentos relativos (U1 e U2) apresentam-se superiores na simulação em duas vias. Mais uma vez, denota-se a ocorrência de modos de deformação particularizados para cada poço do modelo, de forma que os comportamentos esperados nem sempre podem ser balizados por um comportamento médio, assumido por hipótese, para determinada região do reservatório.





Figura 5.41. Deslocamentos no revestimento do poço P3 decorrentes dos efeitos de produção do reservatório de Namorado após 6 meses de simulação em uma e duas vias (a) na direção horizontal X (b) na direção horizontal Y e (c) na direção vertical Z

Avaliando-se as tensões S11, S22 e S33 no revestimento, ilustradas na Figura 5.42 e orientadas segundo as direções principais definidas para as tensões geostáticas, verifica-se a ocorrência de valores mais expressivos nas direções horizontais também para a simulação em duas vias. As diferenças de magnitude das tensões nas três direções mencionadas, bem como pelo critério de von Mises, podem ser observadas no Quadro 5.5 para os dois acoplamentos empregados nesta análise. Quanto à avaliação das tensões pelo critério de von Mises, os resultados apresentados na Figura 5.43 indicam que o revestimento atingiu a fase de plastificação em ambos os casos simulados, ultrapassando o valor de 0.276 GPa estabelecido como limite do critério. No caso da simulação em uma via, para o tempo avaliado, as tensões de Von Mises encontram-se praticamente sobre o critério (início da plastificação), enquanto que para a simulação em duas vias, o critério limite já foi atingido, de tal modo que a progressão das tensões ocorre de acordo com a lei de hardening estabelecida para o material do revestimento. Natualmente, tal comportamento era esperado, uma vez que o revestimento experimentou maiores deslocamentos relativos na simulação de duas vias.







Figura 5.42. Tensões no revestimento do poço P3 decorrentes dos efeitos de produção do reservatório de Namorado após 6 meses de simulação em uma e duas vias (a) na direção horizontal X (b) na direção horizontal Y e (c) na direção vertical Z



Figura 5.43. Tensões pelo critério de von Mises no revestimento do poço P3 decorrentes dos efeitos de produção do reservatório de Namorado após 6 meses de simulação (a) acoplamento em uma via e (b) acoplamento em duas vias

| Variável | T insides | Tipo de A | coplamento | Maior Diferença |
|------------|---------------------------|-----------------|------------|-----------------|
| | Limites | One way | Two-way | Observada |
| U1 (m) | Máx: | 1.08E-02 | 8.85E-03 | Two-way |
| | Mín: | 5.02E-03 | -4.96E-04 | |
| | $\Delta_{\rm U1}$ | 5.80E-03 | 9.34E-03 | |
| _ | Máx: | 7.30E-03 | 5.34E-03 | Two-way |
| U2 (m) | Mín: | 2.19E-03 | -8.90E-04 | |
| | $\Delta_{\rm U2}$ | 5.12E-03 | 6.23E-03 | |
| | Máx: | -3.99E-02 | -1.62E-02 | One-way |
| U3 (m) | Mín: | -5.57E-02 | -3.04E-02 | |
| | $\Delta_{\rm U3}$ | 1.58E-02 | 1.42E-02 | |
| _ | Máx: | -4.99E+07 | -4.67E+07 | Two-way |
| S11 (Pa) | Mín: | -3.21E+08 | -3.36E+08 | |
| | Δ_{S11} | 2.71E+08 | 2.89E+08 | |
| S22 (Pa) | Máx: | -1.28E+08 | -1.29E+08 | Two-way |
| | Mín: | -2.40E+08 | -2.50E+08 | |
| | $\Delta_{ m S22}$ | 1.12E+08 | 1.20E+08 | |
| S33 (Pa) | Máx: | -1.81E+07 | -1.90E+07 | |
| | Mín: | -3.59E+08 | -3.68E+08 | Two-way |
| | Δ_{S33} | 3.40E+08 | 3.49E+08 | |
| Mises (Pa) | Máx: | 2.77E+08 | 2.95E+08 | |
| | Mín: | 2.76E+08 | 2.81E+08 | Two-way |
| | Δ_{Mises} | 1.58E+06 | 1.32E+07 | |

Quadro 5.5. Identificação dos maiores diferenciais de deslocamentos e tensões no revestimento do poço P3 em relação à metodologia de acoplamento empregada.

O comportamento à plastificação em ambas as análises pode ser também observado na Figura 5.44, a qual ilustra as regiões de ocorrência de deformações plásticas, após o material ultrapassar o valor definido para o critério de Von Mises, nas superfícies externa e interna do revestimento. Em virtude dos maiores deslocamentos relativos resultantes da simulação em duas vias, evidencia-se o fato de que o colapso ocorrerá mais cedo para esta configuração, fato este corroborado pelos níveis mais elevados de deformação plástica desenvolvidos na simulação iterativa. Cabe salientar novamente que, sem prejuízo à natureza das análises conduzidas, as propriedades de revestimento empregadas na avaliação do poço sub-horizontal representam o limite inferior para o *grade* adotado, tendo sido este próprio empregado nas simulações com caráter hipotético.



Figura 5.44. Deformações plásticas equivalentes no revestimento do poço P3 em decorrência dos efeitos de produção do reservatório de Namorado após 6 meses de simulação (a) acoplamento em uma via e (b) acoplamento em duas vias

Na Figura 5.45 podem ser apreciadas as configurações deformadas do revestimento para ambas as simulações, em resposta à ação tridimensional decorrente do desenvolvimento do campo de Namorado. Foi aplicado um fator de magnificação para a deformada de 10 vezes, de forma a ilustrar com clareza as diferenças nos resultados. Observa-se que o comportamento dos dois modelos é distinto, ressaltando a necessidade de avaliações tridimensionais quando se tratam de efeitos geomecânicos sobre a integridade de pocos. Ao contrário do observado na análise do poço vertical, o poço sub-horizontal atinge a plastificação mais cedo na simulação em duas vias, dado que os valores de deformação plástica atingidos pelo revestimento neste caso são superiores aos obtidos na simulação em uma via. Este fato ilustra que, mesmo dentro de um mesmo modelo, diferentes poços poderão apresentar diferentes comportamentos em termos da análise de colapso, uma vez que os esforços decorrentes dos efeitos geomecânicos são suscetíveis a fatores como propriedades do meio (as quais podem ser variáveis no espaço), configuração de poços e proximidade ou distância das rochas adjacentes ao reservatório.



Figura 5.45. Deformações plásticas equivalentes no revestimento do poço P3 para os acoplamentos em uma e duas vias – deformada do revestimento devido ao desenvolvimento com campo

Assim como observado para o poço vertical, o emprego do módulo gerenciador de modelagem local, associado ao uso do acoplamento ABAQUS-IMEX na simulação global, demonstrou-se viável do ponto de vista técnico na análise do poço sub-horizontal P3 do campo de Namorado.

Finalmente, a partir dos resultados obtidos nos cenários de aplicação estudados, é notável que o projeto de revestimentos de poços não deve ser baseado somente em hipóteses teóricas sobre a evolução dos esforços e deformações em determinada região rochosa, mas também em uma configuração de tensões e deslocamentos realistas, resultante de uma análise geomecânica detalhada.

5.2.3 Discussão

A partir das análises apresentadas e discutidas anteriormente, tornam-se evidentes os principais passos que devem ser considerados quando se busca analisar problemas multi-escala, como o sistema poço-reservatório. Para tanto, verificou-se que a aplicação do *workflow* desenvolvido, aliada à robusta metodologia de acoplamento utilizada e ao módulo gerenciador de análises locais, se mostrou viável nas análises fluido-mecânicas do sistema.

Conforme salientado ao longo desta Tese, o resultado de simulações parcialmente acopladas em duas vias consiste da melhor aproximação para o comportamento de um reservatório. Nos modelos de aplicação avaliados neste capítulo, os efeitos produzidos pela simulação em uma via se mostraram mais agressivos sobre a região do poço vertical, indicando a possibilidade de um dimensionamento excessivo do revestimento. Por outro lado, na avaliação do poço sub-horizontal, a natureza dos deslocamentos sobre o revestimento provocou uma previsão de colapso mais recente na simulação em duas vias, reforçando a necessidade de uma análise particularizada de cada poço considerado crítico no reservatório. Deve ser ressaltado que os esforços produzidos sobre o revestimento foram de natureza essencialmente triaxial em todos os casos avaliados. Não obstante, tomar por hipótese um comportamento pré-definido para o revestimento, com base apenas no comportamento que se espera para a região de rocha em que se encontra no reservatório, pode levar a previsões de colapso excessivamente simplificadas, sem qualquer possibilidade de controle sobre a sua fiabilidade.

As constatações apresentadas neste capítulo, as quais somente podem ser obtidas através de análises numéricas como as desenvolvidas nesta Tese, proporcionam ao projetista a possibilidade de uma análise mais detalhada e qualificada acerca dos esforços que serão impostos ao revestimento ao longo de sua vida produtiva do reservatório.