

9 Conclusões e sugestões

Com o objetivo de desenvolver procedimentos de análise numérica, utilizando elementos finitos, de processos fluido mecânicos acoplados, monofásicos e bifásicos, que levassem em conta a variabilidade espacial de propriedades hidráulicas e mecânicas e a variabilidade das condições iniciais de tensões e pressões, apresentaram-se, na parte inicial desse estudo, as considerações e hipóteses adotadas para definição do modelo físico utilizado para descrição das equações que governam os problemas de acoplamento fluido mecânico. A partir dessas considerações, as equações governantes dos problemas mecânico e de fluxo foram descritas segundo a formulação de elementos finitos. Algumas considerações a respeito da discretização no tempo e sobre análise de problemas não lineares foram apresentadas. Pôde-se, com esses subsídios, passar para a etapa de avaliação dos problemas, considerando-se o comportamento determinístico. Para esse comportamento, apresentaram-se dois procedimentos de solução, o primeiro procedimento totalmente acoplado e o segundo particionado, conhecido como *staggered*.

Após a apresentação da formulação, fez-se a validação do modelo numérico determinístico através de exemplos. Nesse sentido, pode-se dizer que os resultados obtidos numericamente apresentaram boa concordância com os obtidos com soluções analíticas. Os procedimentos sugeridos para a solução dos problemas não lineares, também se mostraram eficientes. A solução do problema elastoplástico com as ferramentas da programação matemática apresentou bons resultados. Com respeito aos métodos de solução dos problemas não lineares globais, o método *L-BFGS* se mostrou como alternativa mais eficiente, sempre que pode ser utilizado.

De maneira geral, os resultados obtidos com os procedimentos, totalmente acoplado e *staggered*, são muito semelhantes, desde que se escolham valores adequados para as tolerâncias no procedimento *staggered*. Verificou-se, nos exemplos analisados, que o procedimento totalmente acoplado apresenta melhor

eficiência computacional para problemas lineares, sendo o oposto geralmente verificado em problemas não lineares, sobretudo nos problemas com não linearidades mais acentuadas e com maior número de equações a serem resolvidas.

Num segundo momento, descreveram-se os problemas utilizando uma formulação não determinística, sendo necessário para isso, a apresentação de alguns conceitos fundamentais da probabilidade e da estatística, bem como de métodos para a obtenção das respostas estatísticas dos problemas de acoplamento. Apresentaram-se métodos de simulação (Monte Carlo e Neumann) e o método de perturbação estatístico linear. Assim como para a análise determinística foram apresentados exemplos, verificando-se com eles as implementações efetuadas e os resultados obtidos com cada método.

As implementações para análises de sensibilidade, requeridas no método estatístico linear, apresentaram resultados satisfatórios. Essa afirmação é válida devido às comparações realizadas pelo método analítico direto, método adjunto e aproximações por diferenças finitas. Em problemas não dependentes da trajetória de tensões o método de diferenciação adjunto mostrou-se como o mais eficiente.

O método estatístico linear geralmente apresenta boas respostas médias em problemas lineares com variáveis aleatórias com pequeno coeficiente de variação. Em problemas não lineares ou para grandes coeficientes de variação as respostas estatísticas obtidas com esse método tendem a diferir das obtidas com o método de Monte Carlo, principalmente as respostas de desvio padrão. Além disso, verificou-se um custo computacional elevado para realização das análises de sensibilidade efetuadas por aproximação por diferenças finitas, uma vez que o número de variáveis aleatórias dos problemas é geralmente elevado. Esse custo para análise de sensibilidade, consequentemente se estende para o custo computacional da análise como um todo. Assim, além de se obter respostas aproximadas com esse método, o custo computacional pode ser mais elevado do que o verificado com métodos que geram respostas mais satisfatórias.

O método de simulação com expansão de Neumann é capaz de gerar bons resultados. Para isso, faz-se necessária a utilização de um número adequado de termos na expansão. Entretanto, a utilização de muitos termos na expansão pode acarretar um maior custo computacional, deixando de ser interessante sua utilização. Nos exemplos analisados nesse estudo, utilizando-se apenas três termos

na expansão de Neumann, o tempo requerido para as análises foi maior que o verificado com o método de Monte Carlo. Além disso, diferenças consideráveis foram verificadas nas respostas estatísticas obtidas.

Apesar do elevado custo computacional despendido pelo método de Monte Carlo, esse se mostrou como melhor alternativa para solução dos problemas tratados nesse trabalho. Além das considerações referentes às respostas estatísticas obtidas com o método de Monte Carlo, deve-se lembrar que respostas probabilísticas são facilmente obtidas com o emprego desse método.

Com referência a consideração da variabilidade espacial das propriedades mecânicas e hidráulicas e a variabilidade das condições iniciais de tensões e pressão em problemas com fluxo monofásico, verificou-se que essas variabilidades podem afetar consideravelmente o comportamento dos problemas mecânico e de fluxo. Essas influências se mostram principalmente nas regiões próximas ao poço, onde geralmente se localizam os problemas de plastificação, sendo dessa forma as regiões de maior importância dos problemas. Alguns resultados, apresentando as regiões com probabilidade de plastificação, considerando diferentes níveis de variação das variáveis aleatórias, demonstraram que essas regiões podem ser alteradas em decorrências dessas variações.

Para se efetuar a análise de estabilidade de poços foram apresentados procedimentos numéricos tanto para o comportamento determinístico quanto para o comportamento probabilístico, nesse caso apresentando-se alguns itens sobre análise de confiabilidade. Esses procedimentos, descritos como um problema básico de otimização, determinam os valores operacionais para pressão de fluido de perfuração, de acordo com determinados critérios de estabilidade.

Nas análises de estabilidade de poços efetuadas nesse estudo se verificaram diferenças significativas nos valores limites de pressão de fluido de perfuração, quando se compararam esses valores considerando-se os comportamentos determinístico e probabilístico. Limites operacionais encontrados para o comportamento determinístico corresponderam a valores com significativa probabilidade de falha no comportamento probabilístico. Ao se determinar os valores limites para pressão do fluido de perfuração para o comportamento probabilístico e considerando-se diferentes níveis de variação das variáveis aleatórias, respostas mais conservadoras foram obtidas para as condições com maior variabilidade.

Com respeito às respostas obtidas na análise considerando fluxo bifásico destacam-se inicialmente as diferenças verificadas quando comparados os casos monofásico e bifásico. Para a condição de fluxo monofásico, o comportamento transiente é geralmente verificado, para tempos relativamente pequenos, sendo logo alcançada a condição permanente. Com a entrada de fluido molhante no meio, o comportamento transiente é verificado novamente, gerando variações nos campos de pressão, tensões e saturações. Analisando-se o comportamento das tensões no revestimento do poço, verificaram-se alterações nos seus valores devido à frente de saturação de fluido molhante.

A variabilidade espacial das propriedades hidráulicas e mecânicas e a variabilidade das condições iniciais de tensões e pressões geram algumas alterações no comportamento das respostas em relação ao comportamento obtido para o caso determinístico.

Após a descrição das principais observações aferidas nesse estudo algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

- Para o problema de acoplamento com fluxo monofásico, sugere-se a consideração de outros modelos constitutivos para descrição do comportamento do material do meio poroso. Em conjunto a isso, sugere-se a consideração de outros critérios para avaliação da estabilidade do poço.
- Para o problema de acoplamento com fluxo bifásico sugere-se a consideração de efeitos físicos e químicos gerados no material da formação devido à entrada de outro fluido. Considerar os efeitos do fluxo bifásico na produção de areia e seus efeitos na estabilidade e na produção dos poços de petróleo. Indica-se acrescentar à formulação do problema de fluxo bifásico, descrita nesse trabalho, procedimentos numéricos para estabilização de possíveis problemas em problemas com velocidades elevadas.

Acredita-se que o estudo efetuado na realização deste trabalho, ainda que limitado, atendeu os objetivos fundamentais propostos, podendo ser considerado promissor e base para desenvolvimentos futuros.