

Influence of well drilling modelling strategies on the mechanical behavior of salt rock

Gilberto L. L. Santos¹, Catarina N. A. Fernandes¹, Ricardo A. Fernandes¹, William W. M. Lira¹

¹Laboratório de Computação Científica e Visualização - LCCV

Centro de Tecnologia - CTEC

Universidade Federal de Alagoas - UFAL

Avenida Lourival Melo Mota, S/N, Tabuleiro do Martins, 57072-970, Maceió/Alagoas, Brasil

gilberto.santos@lccv.ufal.br, catarina@lccv.ufal.br, ricardoaf@lccv.ufal.br, william@lccv.ufal.br

Abstract. This work compares two strategies of computational modelling based on finite element method applied to vertical wells drilling, evaluating their influence on the mechanical behavior of salt rocks, using Abaqus commercial software. Salt rocks properties favor the entrapment of gas and oil on underlying layers. On the other hand, these rocks are subjected to the creep effect, which provoke the hole closure. In this context, predictions are essential to reduce operational risks related to entrapment of drilling column and casing collapses. Currently, as a simplified approach, it is common to consider the drilling process to be performed instantaneously, at the beginning of a numerical analysis, disregarding the rate of penetration (ROP). In this way, there may be an overestimation of the well closure depending on the studied scenario. In this context, this work proposes a strategy considering the ROP in order to perform the salt rock excavation along time and compares the obtained results with the simplified strategy behavior. In this regard, the main contribution of this work is to evaluate the effect of two classical strategies on the mechanical behavior of salt rocks during well drilling.

Keywords: Well drilling, Salt rocks, Finite element method.

1 Introdução

Com a descoberta do pré-sal, pesquisas relacionadas à exploração de petróleo se intensificaram devido ao grande potencial de produção de hidrocarbonetos que as bacias de petróleo apresentam. Segundo a Petrobras [1], um dos desafios para produção de petróleo inclui a perfuração de uma camada de sal com cerca de 2.000 m de espessura. Rochas são perfuradas através de uma broca existente em uma coluna de perfuração e os fragmentos são removidos pela ação de um fluido de perfuração [2]. Segundo Costa et al. [3], a remoção de camadas de sal altera o estado de tensões do maciço, acarretando em problemas como o fechamento do poço, o aprisionamento da broca durante a perfuração, desmoronamentos e o colapso de revestimentos. Esses problemas ocorrem devido ao fenômeno de fluência (creep), que é a evolução da deformação mesmo sob tensão desviatória constante. No entanto, apesar de existirem inúmeras pesquisas relacionadas ao comportamento do sal, prever as consequências do fenômeno de fluência durante a perfuração de um poço não é uma tarefa trivial. Devido à complexidade do problema, o uso de métodos numéricos, tal qual o método dos elementos finitos (MEF), faz-se necessário para avaliar o comportamento mecânico das camadas salinas. Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, simulações numéricas dão suporte para minimizar os riscos envolvidos e aumentar a produtividade na exploração de óleo e gás, contribuindo para um aumento gradativo na produção ao longo do tempo. Segundo os boletins mensais da ANP [4], a produção de petróleo no pré-sal superou a do pós-sal em junho de 2017 e desde então a produção pré-sal manteve-se sempre superior a do pós-sal. Nesse contexto, simulações numéricas de problemas que envolvem a geomecânica do sal são realizadas para elaboração de projetos de perfuração, avaliando o comportamento das camadas a serem perfuradas. Diante disso, o objetivo deste trabalho é comparar duas estratégias de simulação de poços verticais em rochas salinas, considerando: i) a perfuração de uma fase sendo realizada de forma instantânea, expondo todas as camadas de rocha no tempo inicial (esse tipo de estratégia é mais comumente encontrada na literatura); e ii) a perfuração de acordo com a taxa de penetração (ROP), o que implica na modelagem da perfuração por etapas (essa estratégia é mais realista por reproduzir mais fielmente o que ocorre em campo). Adicionalmente, é avaliado também o custo computacional envolvido na obtenção dos resultados de ambas as estratégias.

2 Metodologia

A metodologia adotada baseia-se em quatro macro etapas, conforme ilustra a Fig. 1. É definido um cenário de referência para aplicação da metodologia em questão. As simulações executadas neste trabalho são realizadas através do software comercial Abaqus [5], que é baseado no MEF e sua interface possibilita a construção de modelos representativos do problema e posteriormente a obtenção das respostas.

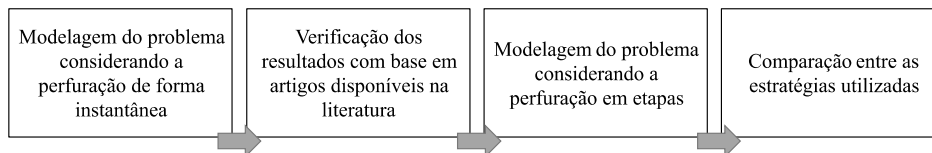


Figura 1. Macro etapas da metodologia.

A primeira etapa envolve o uso da estratégia baseada na perfuração instantânea na modelagem do cenário de referência para reproduzir a perfuração de poços. A modelagem é baseada no MEF e consiste em construir a configuração do problema físico proposto, através da: i) definição do domínio do problema, que neste tipo de estratégia considera a região do poço já perfurada; ii) geração da malha de elementos finitos, onde o domínio do problema é discretizado em elementos finitos e nós; iii) definição das propriedades físicas e viscosas, através de modelos constitutivos representativos dos materiais utilizados; e iv) definição das condições de contorno, onde são descritos os gradientes de tensão geostática e temperatura, peso do fluido de perfuração, como também as restrições de deslocamento. Nesta etapa, também são desenvolvidas rotinas computacionais em Python para automatização na modelagem, simulação e coleta de resultados, acelerando e tornando esses processos menos suscetíveis a erros.

Na segunda etapa, é realizada a simulação da perfuração de forma instantânea e as respostas são utilizadas para geração de gráficos comparativos para verificar os resultados entre a simulação do modelo de referência e os disponíveis na literatura, validando a estratégia utilizada como também a rotina computacional desenvolvida na etapa anterior.

A terceira etapa envolve o uso da estratégia baseada na perfuração em etapas na modelagem do cenário de referência considerando a taxa de penetração. A modelagem é semelhante à utilizada na primeira macro etapa. Entretanto, a reprodução da perfuração em estágios inclui a região do poço no domínio do problema. Essa região é subdividida em estágios de escavação de acordo com a ROP. Desse modo, a simulação é realizada removendo a região de escavação e introduzindo a pressão do fluido de perfuração para cada estágio em particular. Diante disso, ajustes de modelagem nas rotinas computacionais são realizados para que a geração da malha e o período de remoção dos elementos estejam de acordo com a ROP adotada.

A quarta etapa envolve a avaliação da influência da consideração da ROP nos resultados e também o custo computacional associado para obtenção das respostas em cada uma das estratégias adotadas. Nesta etapa, gráficos comparativos são gerados para interpretação e inferências sobre os resultados de interesse.

3 Cenário estudado e modelo numérico associado

O modelo de referência adotado nas avaliações deste trabalho é o poço 6-RJS-457 apresentado por Firme [6] e Firme et al. [7]. Este cenário possui uma camada de espessura de 405 m com intercalações de halita, anidrita e folhelho. A halita é modelada como um material visco-elástico, com seu comportamento de fluência regido pelo mecanismo duplo de deformação [6]. Por outro lado, folhelho e anidrita são considerados como materiais elasto-plásticos, representados pelo modelo de Mohr-Coulomb [6]. Os valores numéricos associados aos parâmetros desses materiais são disponibilizados por Firme [6]. A Fig. 2 apresenta o domínio do problema para as duas estratégias estudadas e a Tab. 1 apresenta os valores dos parâmetros do cenário estudado.

É definido um modelo numérico sólido axissimétrico, aproveitando sua simetria em relação ao eixo central do poço. Adicionalmente, são definidas as cotas de topo e base de cada litologia como também sua discretização na malha de elementos finitos. Para a estratégia de perfuração instantânea, é utilizada uma altura de elemento de 1 m para todas as litologias e uma discretização radial de 80 elementos, gerando uma malha com 98.171 nós e 32.400 elementos do tipo CAX8 (elemento, quadrilateral de oito nós, axissimétrico, com integração completa). Com a utilização da perfuração em etapas, é mantida essa discretização, adicionando 405 elementos de largura igual ao raio do poço na região de perfuração, totalizando 32.805 elementos e 99.388 nós, como exemplifica a Fig. 3.

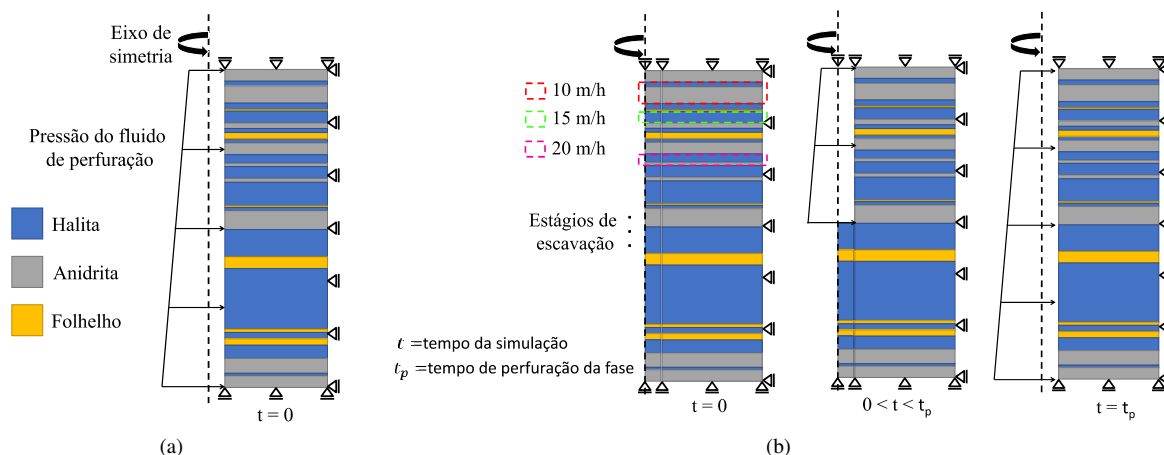


Figura 2. Perfis dos modelos axissimétricos (Adaptado de Firme [6]): (a) Estratégia de perfuração instantânea.; (b) Estratégia de perfuração em etapas.

Tabela 1. Dados do poço simulado.

Parâmetro	Valor
Diâmetro da broca	12,25 in
Peso do fluido de perfuração	14,30 ppg
Tensão geostática no topo do maciço	88,32 MPa
Temperatura no topo do maciço	116,86°C
Gradiente térmico	12°C/km

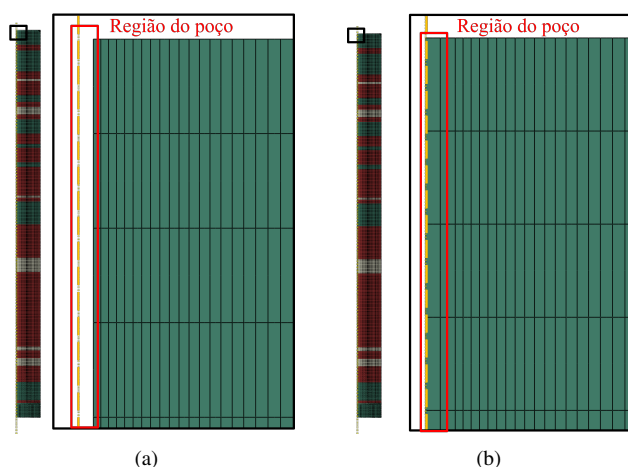


Figura 3. Detalhe da malha de elementos finitos: (a) Estratégia de perfuração instantânea.; (b) Estratégia de perfuração em etapas.

4 Resultados

Em um primeiro momento, é realizada a simulação do cenário estudado utilizando a estratégia de perfuração instantânea, com o objetivo de garantir o correto funcionamento das ferramentas utilizadas e dos parâmetros considerados no modelo. Os resultados de interesse são coletados e apresentados na Fig. 4. Os resultados apresentados por Firme [6] e Firme et al. [7] são coletados diretamente a partir das imagens dos gráficos disponíveis, de forma que são valores aproximados. Apesar disso, observa-se uma boa conformidade entre os resultados fornecidos pelo Abaqus e os fornecidos por Firme [6] e Firme et al. [7]. Dessa forma, verifica-se que a rotina elaborada está correta,

uma vez que a simulação forneceu resultados em conformidade com a literatura.

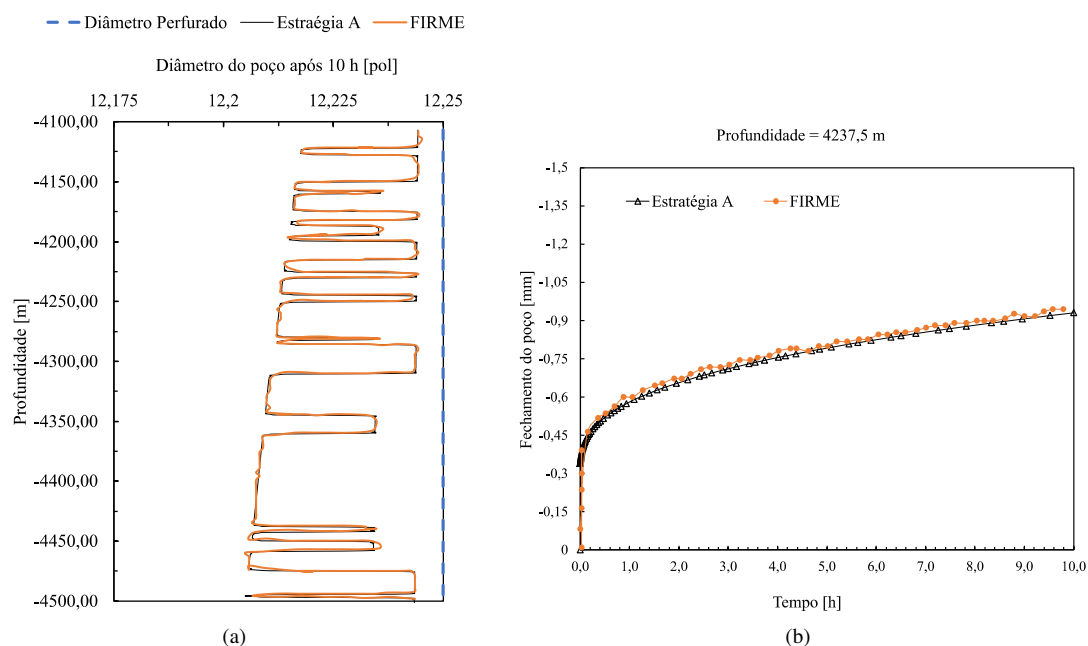


Figura 4. Comparação dos resultados obtidos entre a estratégia (A) e os apresentados por Firme [6]: (a) Perfil da parede do poço após 10 h de perfuração; (b) Evolução do fechamento da parede do poço na profundidade 4237,5 m.

Após a verificação dos resultados obtidos com a estratégia da perfuração instantânea, a ROP é considerada na modelagem do cenário estudado, com o objetivo de simular a perfuração em etapas.

A estratégia de perfuração em etapas é semelhante a apresentada por Ferreira [8], onde a simulação da perfuração é dividida em estágios de escavação. Dessa forma, inicialmente tem-se a definição do estado geostático, onde são estabelecidas as tensões geostáticas atuantes no maciço salino antes da escavação. Posteriormente, para cada estágio de escavação tem-se uma fase elástica que corresponde a remoção dos elementos da região do poço e introdução da pressão do fluido de perfuração na parede do poço, terminando o estágio com uma etapa viscosa. Nesta etapa, o tempo de simulação depende da espessura da camada e da velocidade de perfuração da broca. Por exemplo, uma camada com 25 m de espessura perfurada a uma taxa de 10 m/h teria 3 estágios de escavação com tempos de simulação de 1 h, 1 h e 0,5 h, onde seriam removidos 10 m, 10 m, e 5 m, respectivamente. Após a remoção de todos os elementos da região do poço, pode haver uma última fase viscosa, onde todas as camadas de rocha já foram expostas e estão livres para se deformar. Geralmente, o período considerado nessa última fase é o tempo que leva para remoção da coluna de perfuração, descida do revestimento e cimentação.

Na modelagem da perfuração em etapas é adotada uma ROP padrão de 30 m/h e 3 regiões com velocidades diferentes da ROP padrão, como destacado na Fig. 2 (b). Existem inúmeros fatores que interferem no valor da ROP, como as propriedades da litologia perfurada, do fluido da perfuração, do tipo da broca e o seu desgaste [9]. Diante disso, os valores utilizados aqui são fictícios, mas possuem ordem de grandeza realista. Em seu estudo, Firme [6] considera apenas 10 h de simulação. Esse tempo não é suficiente para remover toda a região do poço utilizando a estratégia da perfuração em etapas e a ROP adotada. Diante disso, é realizada a simulação do cenário estudado utilizando as duas estratégias, considerando um tempo de simulação de 50 h.

Após a análise numérica das duas estratégias, é gerado o gráfico do perfil do poço no tempo final da simulação e também os gráficos do fechamento do poço ao longo do tempo em duas profundidades, como podem ser vistos na Fig. 5. Observa-se que, para cotas mais profundas a utilização da perfuração em etapas produz deslocamentos menores em relação a estratégia de perfuração instantânea, essa diferença é de aproximadamente 11%. Por outro lado, para cotas mais rasas, a diferença entre as duas alternativas é de aproximadamente 0,65%. Isso ocorre uma vez que o período de exposição da rocha em camadas rasas são próximos em ambas as estratégias. Entretanto, com a adoção da perfuração em etapas, camadas mais profundas só são expostas várias horas depois das camadas rasas.

A análise da estratégia de perfuração em etapas gasta 9 horas para ser concluída, enquanto a estratégia de perfuração instantânea é realizada em 1 hora para o modelo em questão, utilizando um computador com processador Intel Core i7-7500U CPU 2.9 GHz, com memória RAM de 8 GB. Um dos motivos que eleva o custo computacional está relacionado a novos desequilíbrios de tensões que ocorrem à medida em que cada grupo de

elementos é removido, havendo a necessidade de reduzir o incremento de tempo a cada nova etapa.

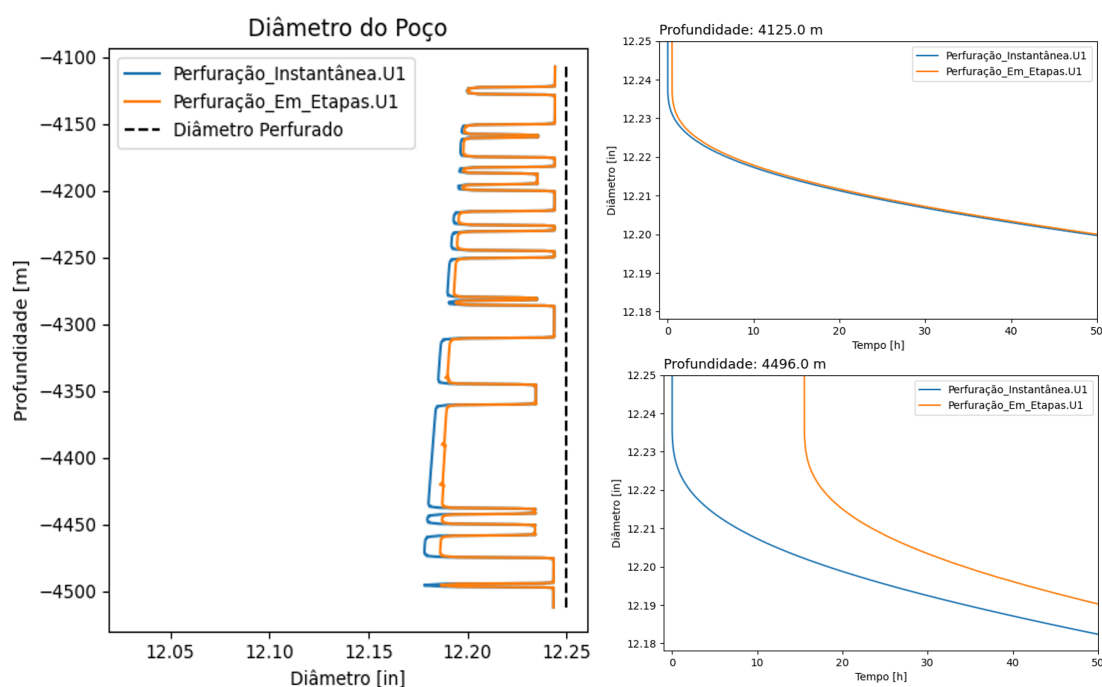


Figura 5. Comparação entre os resultados da perfuração utilizando as duas estratégias.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou uma comparação entre duas estratégias de simulação computacional baseadas no método dos elementos finitos, aplicadas na perfuração de poços verticais. A estratégia de perfuração instantânea tende a sobrestimar o fechamento do poço. Por exemplo, no cenário estudado, a diferença entre os deslocamentos obtidos chegou a 11% (1,05 mm), com um custo computacional relativamente baixo. Por outro lado, a estratégia de perfuração em etapas tende a gerar resultados mais realistas, com um custo computacional mais elevado. Em situações onde o custo computacional é relevante é recomendável a utilização da estratégia de perfuração instantânea. Embora represente uma metodologia mais conservadora para estimativa do fechamento, ela está a favor da segurança. Caso a precisão dos resultados seja mais relevante do que o custo computacional utilizado para alcançá-los é aconselhável utilizar a estratégia da perfuração em etapas, sendo possível trabalhar com valores de fechamento do poço mais realistas e inferiores aos estimados utilizando a estratégia de perfuração instantânea.

Referências

- [1] Petrobras, 2020. Tecnologias pioneiras do pré-sal.
- [2] Thomas, J. E., 2001. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Interciência.
- [3] Costa, A. M., POIATE JR, E., Falcão, J. L., & Coelho, L. F. M., 2005. Triaxial creep tests in salt applied in drilling through thick salt layers in campos basin - brazil. *ISRM News Journal*, vol. 9, n. 1, pp. 14–24.
- [4] ANP, 2020. Boletim mensal da produção de petróleo e gás natural.
- [5] Abaqus, 2014. Abaqus scripting user's guide.
- [6] Firme, P. A. L. P., 2013. *Modelagem Constitutiva e Análise Probabilística Aplicadas a Poços em Zonas de Sal*. PhD thesis, MSc. Dissertation, Department of Civil Engineering—Pontifical.
- [7] Firme, P. A., Brandao, N. B., Roehl, D., & Romanel, C., 2018. Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks. *Acta Geotechnica*, vol. 13, n. 6, pp. 1329–1340.
- [8] Ferreira, Y. A., 2014. *Análise numérica da perfuração e cimentação de poços de petróleo em evaporitos*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- [9] Hapnes, M., 2014. Drilling in salt formations and rate of penetration modelling. Master's thesis, Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk.