

# 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



## TÍTULO DO TRABALHO:

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE EVAPORITOS DURANTE A PERFURAÇÃO DE POÇOS VERTICAIS UTILIZANDO UM MODELO SIMPLIFICADO

## AUTORES:

Catarina Nogueira de Araújo, Eduardo Setton Sampaio da Silveira, Eduardo Nobre Lages e Adeildo Soares Ramos Júnior

## INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Computação Científica e Visualização – LCCV  
Centro de Tecnologia – CTEC, Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Campus A. C. Simões – Tabuleiro do Martins – CEP 57.072-970 Maceió – Alagoas – Brasil

*Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.*

## **SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE EVAPORITOS DURANTE A PERFURAÇÃO DE POÇOS VERTICAIS UTILIZANDO UM MODELO SIMPLIFICADO**

### **Abstract**

This work describes the development of a simplified model, based on the displacement formulation of the Finite Element Method, to estimate the closure rate of wells in salt rocks. These materials behave differently than other kind of rocks, since they deform by creep even under moderate temperature and pressure, provoking the well closure. To assist the exploration on the layer known as “pre-salt”, this closure speed is foreseen so the drilling strategy can be established. Thereby, problems like equipments imprisonment and poor cementation, which make the exploration cost even higher, can be avoided. The drilling strategy is defined based on the results of several numerical simulations. The models elaboration is based on the prevision of the occurrences to be drilled. In some cases this prevision is not exact, so it is common to find out during the drilling lithologies and thickness not foreseen. These events can cause the need to redefine the drilling strategy, what derails the execution of new simulation, due to the short term. The importance of having available a simplified model representative of the approached problem is on the need of rapid results, essential on a decision moment. It is developed a computational model in Matlab (Hanselman e Littlefield, 2002) language, chosen due to the proposed models low computational demand. To validate the proposed model, some results and comparisons with more complete and validated models are presented.

### **Introdução**

O sal tem papel importante na acumulação do petróleo porque, depois de sua diagênese, as camadas de sal logo se tornam impermeáveis, condicionando fortemente a migração e acumulação de fluidos como o petróleo (WARREN, 1989). Devido a sua estrutura cristalina, as rochas salinas estão sujeitas ao fenômeno de fluência, deformação lenta sob tensão constante. Segundo Borges (2008), a deformação pode ser suficiente para restringir a passagem da coluna de perfuração e até mesmo prendê-la de forma irreversível. Após o poço ter sido revestido, a fluência do sal pode causar restrições à passagem de ferramentas pelo revestimento ou até mesmo provocar sua ruptura por colapso. Segundo Costa e Poiate (2008), no Brasil, a complexidade de perfurar espessas camadas de evaporitos soma-se ao fato desses poços estarem localizados em lâminas d'água superiores a 2.000 m, tornando os custos de perfuração ainda mais elevados.

Segundo Falcão (2008), a simulação do comportamento de fluência da rocha evaporítica envolve uma modelagem do contínuo com comportamento físico de natureza não linear, exigindo, para tal, a aplicação de algoritmos de integração no tempo incrementais iterativos. Essas simulações exigem grande esforço computacional, pela característica não-linear do modelo e pelo nível de discretização exigido para a correta representação do fenômeno físico do processo de perfuração.

Essas simulações são baseadas em perfis sismológicos da área a ser perfurada, porém, o movimento do sal gera estruturas complexas. Essas estruturas e a estratigrafia são difíceis de serem interpretadas a partir da sísmica (FALCÃO, 2008). Assim, a interpretação desses perfis não é exata, durante a perfuração do poço podem ocorrer intercalações não previstas que podem prejudicar tanto a perfuração como o seu bom funcionamento. Para evitar problemas futuros, por vezes são necessárias decisões rápidas para corrigir o projeto durante a perfuração, decisões baseadas apenas na experiência do responsável, uma vez que a simulação computacional da nova configuração demanda um tempo não disponível. Evidencia-se assim, a necessidade de modelos simplificados que estimem rapidamente

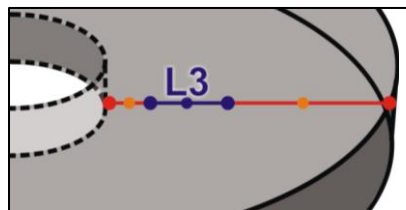
o fechamento de poços, assim o responsável teria dados numéricos para auxílio nessa tomada de decisão.

O presente trabalho propõe um modelo simplificado axissimétrico, baseado na formulação em deslocamentos do Método dos Elementos Finitos, para simular o comportamento viscoso de rochas salinas, com baixo custo computacional, permitindo a possibilidade de uso durante a perfuração para se conhecer aproximadamente a evolução do deslocamento no tempo de uma camada não prevista.

## Metodologia

O modelo proposto considera uma camada axissimétrica isolada de rocha salina com espessura unitária. Dessa forma, a interação no processo de deformação com as camadas vizinhas não é considerada, o que deve levar a deformações superestimadas. Essa simplificação possibilita tratar o problema de tal forma que as variáveis de estado só apresentam variações ao longo da direção radial. Com isso, a discretização do domínio através do Método dos Elementos Finitos pode ser feita com elementos unidimensionais, o que torna o tempo de processamento significativamente reduzido.

A espessura da camada em estudo é unitária, dessa forma, são considerados elementos quadráticos unidimensionais (L3). Como a maior variação de tensão ocorre próxima ao poço, é comum considerar uma maior discretização nessa região. Neste modelo considera-se uma distribuição espacial dos elementos da malha de tal forma que os comprimentos dos elementos crescem em progressão geométrica do mais próximo ao mais afastado da parede do poço (Figura 1).



**Figura 1 - Camada considerada ilustrando discretização do modelo.**

O processo de escavação de um poço provoca uma alteração no estado de tensões original do maciço rochoso. Esse maciço se encontra em equilíbrio num estado de tensões geostáticas até que uma parte de seu material é removida (perfuração) e um novo estado de tensões se apresenta. No modelo proposto considera-se que instantaneamente após o processo de escavação do poço introduz-se uma pressão interna à parede do poço resultante da coluna do fluido de perfuração. Como o domínio de análise é modificado, o vetor de forças externas que provocam o estado geostático certamente muda. Nesse contexto, o maciço se encontra em um novo estado de tensões.

As deformações são medidas em relação à configuração geostática, instantaneamente após a criação do furo. Assim sendo, na relação constitutiva considerada, não há a contribuição de uma deformação inicial, restando apenas a contribuição o estado inicial de tensões.

A partir da definição das condições iniciais, é possível evoluir as equações governantes do problema de valor inicial em pauta. A configuração de referência para a medição das deformações se mantém a mesma, ou seja, a configuração geostática instantaneamente após a criação do furo.

A taxa de variação da deformação viscosa é definida pela função de fluência  $\beta$ . Neste trabalho adota-se a equação constitutiva da fluência estacionária em mecanismo duplo de deformação, dada por

$$\dot{\epsilon}^v = \dot{\epsilon}_0^v \left( \frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0} \right)^n e^{\frac{Q}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \quad (1)$$

Em projetos de poços subsal, utiliza-se dessa lei constitutiva restringindo-se sua aplicação para o intervalo de fluência estacionária, dominante nesses tipos de projetos na prática comum da engenharia (COSTA e POIATE, 2008).

A obtenção do incremento de deformações viscosas é dada simplesmente por

$$\Delta \varepsilon^v = \Delta t \dot{\varepsilon}^v \quad (2)$$

## Resultados e Discussão

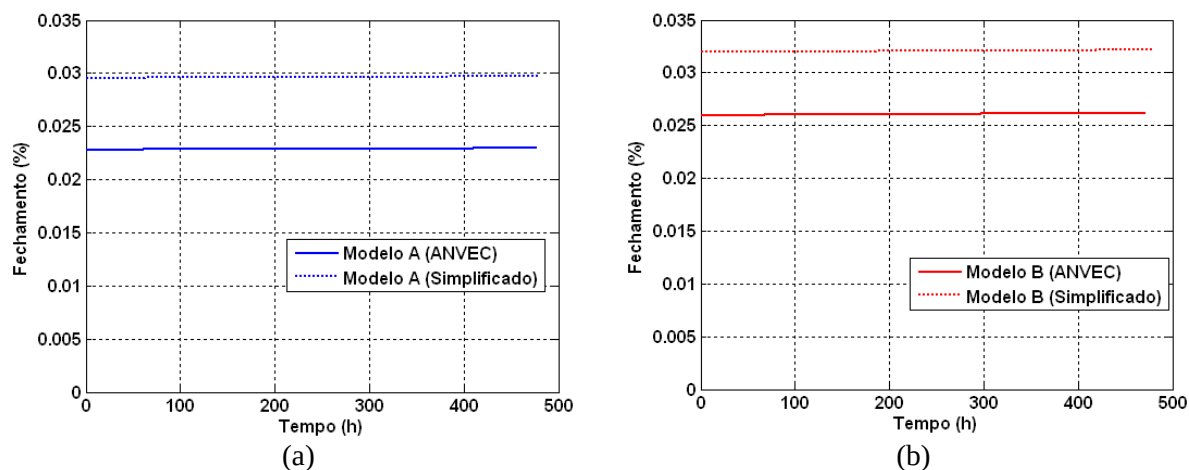
Para analisar a qualidade dos resultados, apresenta-se uma comparação dos resultados obtidos pelo modelo proposto com os resultados obtidos pelo simulador computacional “ANVEC” desenvolvido por Costa (1984), também baseado no Método dos Elementos Finitos, por hora, denominado “modelo completo”. Esse simulador permite a previsão do fechamento por fluência do poço para diferentes tipos de rochas evaporíticas, acompanhando no tempo a evolução da perfuração pela aplicação da técnica de *mesh rezoning* dinâmico (escavação), acoplado ao comportamento fisicamente não linear de viscoplasticidade dos diferentes evaporitos e elastoplástico das intercalações de rochas frágeis não sujeitas ao fenômeno de fluência (COSTA, 1984). Para condições de contorno consideram-se camadas de rocha dura sobre e subjacentes ao intervalo de sal (COSTA e POIATE, 2008). Os resultados apresentados se referem ao comportamento no centro da camada evaporítica na parede do poço.

A Tabela 1 descreve os parâmetros utilizados nos modelos A e B. A rocha considerada nesses modelos é a halita, a rocha mais comum na natureza, que em geral é pouco móvel, mas a depender das condições de temperatura e pressão pode apresentar elevadas taxas de fechamento.

**Tabela 1 – Descrição dos modelos A e B.**

| Modelo        | Lâmina D'água | Soterramento | Litologia | Espessura  | Intercalação | K0  | Diâmetro | Fluido |
|---------------|---------------|--------------|-----------|------------|--------------|-----|----------|--------|
|               | m             | m            |           | m          | m            |     | pol      | lb/Gal |
| <b>Mod. A</b> | 100           | 500          | Halita    | <u>20</u>  | -            | 1,0 | 12,25    | 10     |
| <b>Mod. B</b> | 100           | 500          | Halita    | <u>100</u> | -            | 1,0 | 12,25    | 10     |

Na Figura 2, ilustra-se a evolução ao longo do tempo do percentual de fechamento do poço para o modelo simplificado (pontilhado) e para o completo (linha cheia). Como discutido anteriormente, o modelo completo considera rochas frágeis acima e abaixo da camada evaporítica, essas camadas são muito rígidas, logo, aumentam a rigidez camada salina. Nos gráficos comparativos de deslocamento é evidenciado que os valores obtidos pelo modelo proposto são maiores em módulo, o que era esperado uma vez que não são consideradas camadas vizinhas. Logo, o erro é sempre a favor da segurança.



**Figura 2 – Comparação dos deslocamentos horizontais: (a) Modelo A e (b) Modelo B.**

Espera-se que a influência das camadas vizinhas no deslocamento da camada em estudo seja reduzida conforme a espessura da camada em estudo é maior. O gráfico da Figura 3 comprova esse fato, onde é apresentada a evolução do erro com a espessura de modelos com os mesmos parâmetros dos modelos A e B, mas com a espessura da camada de rocha salina (halita) variando de 10 a 100 metros.

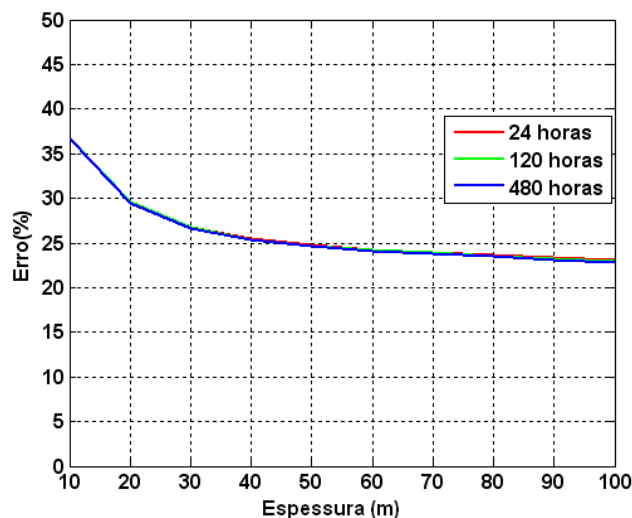


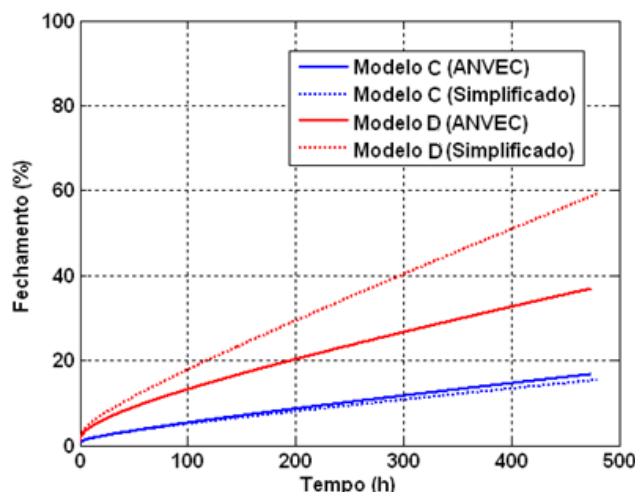
Figura 3 - Variação do erro percentual em função da espessura da camada salina.

Os modelos seguintes são montados com base em informações encontradas na imprensa (REVISTA ÉPOCA, 2009) acerca do contexto em que se encontram os reservatórios na camada pré-sal na costa sudeste brasileira. Assim, os modelos C e D são desenvolvidos com o intuito de analisar resultados de modelos mais próximos das situações encontradas em campo. Os parâmetros dos modelos C e D são apresentados na Tabela 2. Percebe-se que as tensões desse modelo são mais elevadas que nos anteriores, onde a profundidade total não ultrapassa mil metros.

Tabela 2 - Descrição dos modelos C e D.

| Modelo | Lâmina d'água | Soterramento | Litologia | Espessura | Intercalação | K0         | Diâmetro | Fluido |
|--------|---------------|--------------|-----------|-----------|--------------|------------|----------|--------|
|        | M             | m            |           | m         |              |            | pol      | lb/Gal |
| Mod. C | 1500          | 2500         | Halita    | 100       | Taq. (20 m)  | <u>1,0</u> | 14,75    | 12     |
| Mod. D | 1500          | 2500         | Halita    | 100       | Taq.(20 m)   | <u>1,1</u> | 14,75    | 12     |

Observa-se que no modelo D considera-se o coeficiente de empuxo horizontal de 1,1 (tensão horizontal 10% maior que a tensão vertical), assim as tensões desviadoras serão ainda mais elevadas. A Figura 4 mostra a comparação do fechamento percentual obtido pelo modelo completo e pelo simplificado para os modelos C e D.



**Figura 4 - Comparação dos fechamentos percentuais do poço (modelos C e D).**

Observa-se que, diferente dos demais modelos apresentados, a partir de 100 horas de simulação o fechamento percentual estimado do modelo C foi menor que o calculado pelo ANVEC, fornecendo resultados contra a segurança. Sugere-se como trabalho futuro uma análise mais detalhada desse caso. O traçado mais curvo da evolução dos deslocamentos do modelo D evidencia que a característica não linear desse modelo é mais acentuada quando comparada a todos os outros modelos, isso ocorre devido às elevadas tensões desviadoras.

Observa-se na Figura 4 que os erros do modelo D foram bem maiores. Esse pode ser mais um resultado da elevada tensão desviadora, a não linearidade do modelo fica mais acentuada, sendo necessário o uso de modelos mais completos para descrever bem esse comportamento.

Por fim, apresenta-se na Tabela 3 o tempo de processamento da simulação de cada modelo envolvido nesta validação, sendo que o modelo completo, desenvolvido em Fortran, foi executado em uma máquina com sistema operacional Linux, processador Intel® Core™ 2 com 1.86GHz. Como discutido anteriormente, o modelo simplificado foi desenvolvido em linguagem Matlab (Hanselman e Littlefield, 2002) e executado em uma máquina com sistema operacional Windows XP 32 bits, processador Intel® Core 2 Duo com 2.1 GHz.

**Tabela 3 - Tempos de simulação.**

|                            | <b>Modelo A</b> | <b>Modelo B</b> | <b>Modelo C</b> | <b>Modelo D</b> |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Modelo Simplificado</b> | 1,27 min        | 1,25 min        | 0,39 min        | 0,66 min        |
| <b>Modelo Completo</b>     | 36,38 min       | 358,00 min      | 122,00 min      | 242,00 min      |

## Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um modelo simplificado axissimétrico para previsão do fechamento de poços em rochas salinas, com base no Método dos Elementos Finitos.

A previsão da taxa de fechamento de poços em rochas salinas em tempos reduzidos (como os apresentados na Tabela 3) permite a utilização do modelo durante a execução desses poços. É observado que nos modelos A, B e C o erro no cálculo do deslocamento elástico, que ocorre instantaneamente após a escavação, é preponderante. Esse resultado era o esperado pois, como discutido anteriormente, a camada de rocha foi considerada isolada, o que reduz sensivelmente a rigidez do modelo. Desta forma, como se trata de um problema estático, sugere-se a construção de um modelo um pouco mais refinado, inclusive considerando as camadas vizinhas, apenas para a definição do deslocamento inicial sem que o tempo de simulação aumente significativamente.

Os resultados obtidos com o modelo C foram bastante promissores, com erros abaixo de 10%, mostrando que em situações reais o modelo pode auxiliar em uma emergência. A partir do resultado no modelo D, foi verificado que o modelo proposto não faz boas previsões do fechamento de poços em maciços submetidos a grandes tensões desviadoras. Para alcançar bons resultados com coeficientes de empuxo maiores que 1,0 o modelo proposto precisa ser mais refinado. Apenas a diminuição do erro na estimativa da deformação inicial automaticamente deverá reduzir os erros obtidos ao longo de toda a análise, uma vez que nesse tipo de simulação os erros são progressivos (maiores deformações iniciais provocam maiores deformações viscosas).

Um importante produto deste trabalho foi o conhecimento desenvolvido acerca do comportamento viscoso de rochas salinas, devido à necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias e de mão-de-obra com conhecimento acerca do comportamento anômalo desse tipo de material. Esse conhecimento ainda deverá ser aprofundado com a continuidade do desenvolvimento deste trabalho.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte técnico e financeiro do CENPES/Petrobras através da participação nos projetos de pesquisa das Redes PetroDEM e Galileu.

Os autores agradecem ainda o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP e do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT.

### Referências Bibliográficas

BORGES, R. G., *Avaliação Numérica de Perturbações de Tensões Associadas a Estruturas Salíferas e suas Influências na Estabilidade de Poços*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. Dissertação de mestrado.

COSTA, A. M. *Uma Aplicação de Métodos Computacionais e Princípios de Mecânica das Rochas no Projeto e Análise de escavações subterrâneas destinadas à mineração subterrânea*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1984. Tese (Doutorado).

COSTA, A. M.; POIATE JUNIOR, E. *Rocha Salina na Indústria do Petróleo: aspectos relacionados à reologia e à perfuração de rochas salinas*. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S. M. C. SAL: Geologia e Tectônica. São Paulo: Editora Beca. 2008. cap. XVII.

FALCÃO, J. L. *Perfuração em Formações Salíferas*. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S. M. C. SAL: Geologia e Tectônica. São Paulo: Editora Beca. 2008. cap. XVIII.

HANSELMAN, D. e LITTLEFIELD, B. *MATLAB 6 - Curso Completo*, Prentice Hall (Pearson), São Paulo, Brasil. 2002.

MOHRIAK, W., SZATMARI, P. *Introdução às Propriedades Físicas e Químicas dos Evaporitos*. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S. M. C. SAL: Geologia e Tectônica. São Paulo: Editora Beca. 2008. cap. I.

REVISTA ÉPOCA. Reportagem: *Os poços de votos*. Rio de Janeiro. Setembro de 2009.

WARREN, J. K. *Evaporite Sedimentology: importance in hydrocarbon*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1989. 285 p. (Prentice Hall Advanced References Series).