

Reliability-based analysis of borehole closure on salt rock

Luiz E. da Silva Filho¹, Catarina N. A. Fernandes¹, Eduardo T. de Lima Junior¹, William W. M. Lira¹, Hugo V. F. Azevedo¹

¹*Laboratório de Computação Científica e Visualização, Universidade Federal de Alagoas
Av. Lourival Melo Mota s/n, Cidade Universitária, CEP: 57072-900, Maceió/AL, Brasil
luiz.elias@lccv.ufal.br, catarina@lccv.ufal.br, limajunior@lccv.ufal.br, william@lccv.ufal.br,
hugo.azevedo@lccv.ufal.br*

Abstract. This work proposes an analysis of structural reliability in salt rocks when drilled by vertical wells, in order to assist the evaluation of their mechanical behavior. In general, the computational modeling of geotechnical projects in underground structures has two focuses: a) predict the behavior of soil-structure interaction with good accuracy; and b) evaluate the stability of these structures. The quality of this prediction is strongly associated with the accuracy with which the parameters of the problem are defined, such as the mechanical properties of the materials, the layer dimensions, among others. Considering the complexity of obtaining in situ data for this type of underground problem, there is always a level of uncertainty associated with them. Structural reliability addresses the randomness of the design variables to estimate the safety level associated to a structural problem, regarding pre-established failure criteria. The methodology adopted in this work is based on three main steps: i) Characterization of the salt rock drilled by vertical wells problem; ii) Statistical characterization of the variables of interest; and iii) Use of reliability analysis methods to assess the probability of failure of salt rocks drilled by wells. As the main contribution, it is expected to evaluate the influence of the randomness of the variables involved in the mechanical response of drilled salt formations, providing important statistical information related to the designed structures and indicating probability of failure in these structures.

Keywords: Salt rocks, Well integrity, Structural reliability.

1 Introdução

Nas últimas décadas, tecnologias na fronteira do conhecimento têm sido desenvolvidas visando a otimização do processo de produção de petróleo e gás, principalmente para vencer situações adversas impostas pelas condições operacionais presentes nos campos a serem explorados. Nas bacias offshore do Brasil, por exemplo, reservatórios de hidrocarbonetos sob espessas formações de sal geram desafios na perfuração e manutenção de poços produtores.

Um dos principais problemas associado a presença dessa camada de sal é que, segundo Costa et al. [1], as rochas salinas apresentam um comportamento de fluência, deformação lenta sob tensão constante. Esse fenômeno pode gerar deslocamentos excessivos no sentido do fechamento do poço, comprometendo a integridade estrutural do mesmo. Neste contexto, a fluência é uma variável importante que precisa ser considerada na avaliação do comportamento mecânico de poços utilizados na exploração de petróleo que perfuram rochas salinas, garantindo um bom desempenho na operação.

Por outro lado, segundo Araújo [2], a previsão do comportamento mecânico de rochas salinas é realizada através de simulações numéricas, que demandam um alto custo computacional, por se tratarem de simulações visco-plásticas no domínio do tempo. Além disso, existem incertezas associadas às propriedades do poço que impossibilitam a realização de uma análise estrutural acurada.

Dessa forma, este trabalho apresenta um estudo relativo a análise de confiabilidade estrutural de poços escavados em rochas salinas, visando avaliar o seu comportamento mecânico com maior precisão. Neste estudo, o poço atinge um estado limite ou “falha” quando o deslocamento radial excede o deslocamento máximo permitido. As probabilidades de falha são obtidas por diferentes métodos e os resultados alcançados são comparados e discutidos.

2 Metodologia e procedimentos

Para alcançar o objetivo proposto, a metodologia de desenvolvimento é baseada em três etapas, conforme ilustra a Fig. 1.



Figura 1. Metodologia adotada

A primeira etapa consiste no uso de um modelo mecânico determinístico capaz de simular os deslocamentos radiais das rochas salinas, com esse modelo é possível avaliar o desempenho estrutural do poço. A segunda etapa consiste na implementação de um modelo probabilístico baseado em métodos de análise de confiabilidade estrutural, que deve retornar informações relativas a probabilidade de falha das estruturas analisadas. A terceira etapa consiste no acoplamento entre os modelos mecânico e probabilístico, permitindo o seu uso na realização da análise de confiabilidade estrutural em poços perfurados em rochas salinas. Para validar a metodologia proposta, estuda-se o comportamento de um poço escavado num trecho rochoso encontrado na literatura.

2.1 Modelo mecânico determinístico

O modelo mecânico determinístico adotado neste trabalho foi desenvolvido por Araújo [2] e é capaz de simular o comportamento mecânico de rochas salinas perfuradas por poços verticais. É um modelo axissimétrico de elementos finitos, que prevê o fechamento radial do poço.

O cenário analisado, é adaptado da configuração hipotética proposta por Santos [3] de um poço com 17.5" de diâmetro (0.4445 m). Define-se um trecho menor de sal, visando reduzir o custo computacional de cada cenário, um vez que um número considerável de simulações é realizado. As camadas salinas atravessadas pelo poço são apresentadas na Fig. 2.

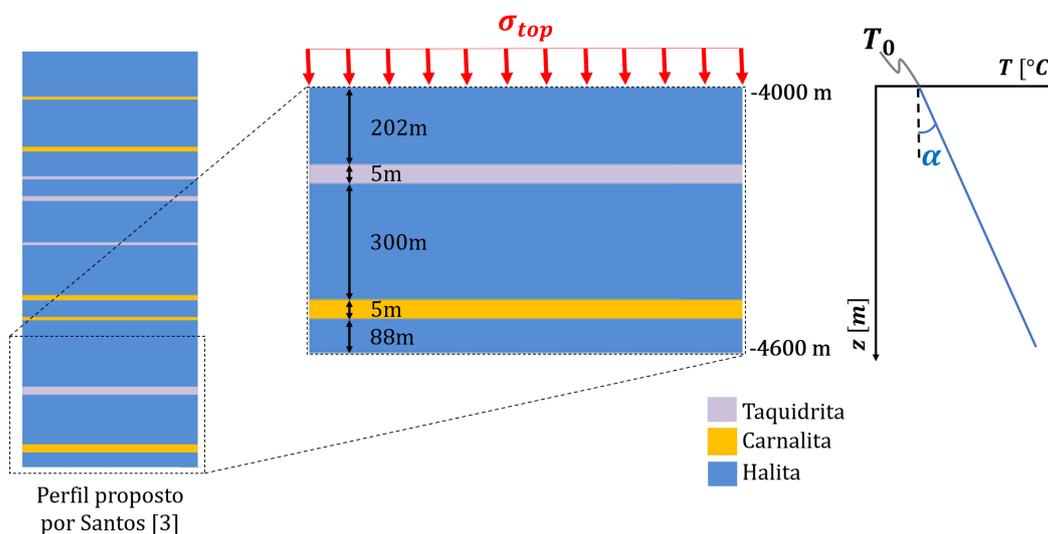


Figura 2. Disposição das camadas rochosas no cenário estudado

Na Fig. 2, σ_{top} e T_0 são, respectivamente, a tensão equivalente e a temperatura no topo do trecho analisado e $tg(\alpha)$ é o gradiente geotérmico.

O parâmetro de resposta do modelo é o perfil de deslocamento na formação. Para a análise de confiabilidade, são monitorados os deslocamentos radiais nas camadas de taquidrita e carnalita por serem, segundo Santos [3], rochas significativamente mais móveis que a halita. Dessa forma, o deslocamento radial é monitorado nas profundidades de -4204.5 m e -4509.5 m, para um tempo de simulação de 20 dias (480 h).

2.2 Modelo Probabilístico

Segundo Sagrilo [4], a confiabilidade estrutural é baseada na existência de uma função de estado limite $G(\vec{X})$, onde \vec{X} é o vetor de variáveis randômicas do problema. Essa função é definida para que os pontos onde $G(\vec{X}) \leq 0$ indiquem a falha da estrutura e $G(\vec{X}) > 0$ apontem sua sobrevivência. A função de estado limite adotada neste trabalho é baseada na resposta do modelo determinístico, isto é, no deslocamento radial máximo do poço. Conforme apresentado por Santos e Ramos Jr [5], uma função de falha para poços escavados em rochas salinas, baseada no deslocamento retornado pelo modelo numérico, é apresentada na eq. (1).

$$G(\vec{X}) = \delta_{max} - Z(\vec{X}), \quad (1)$$

onde δ_{max} é o deslocamento radial máximo permitido e $Z(\vec{X})$ é a função que retorna o deslocamento radial do modelo mecânico. Para esse trabalho, adota-se um valor de $\delta_{max} = 0.875''$ (≈ 0.0222 m), valor considerado como limite para o deslocamento radial de um poço com diâmetro de 17.5", segundo Poiate et al. [6].

Neste trabalho, são adotadas três variáveis aleatórias: a temperatura no topo do trecho analisado (T_0), o gradiente geotérmico ($tg(\alpha)$) e a tensão equivalente no topo do trecho analisado (σ_{top}). As variáveis relativas à temperatura foram caracterizadas com distribuição normal, conforme apresentado por Fossum e Fredrich [7]. Já a tensão no topo do trecho rochoso é adotada seguindo o uma distribuição lognormal, fundamentado por Li et al. [8] em seu trabalho sobre confiabilidade estrutural em cavernas subterrâneas. Os valores adotados para média e desvio padrão foram arbitrados pelos autores, esclarecendo-se que para análises mais realísticas, dados estatísticos mais apurados devem ser levantados. As informações estatísticas utilizadas são resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização estatística das variáveis aleatórias

Variável	Unidade	Média (μ)	Coefficiente de Variação	Distribuição
σ_{top}	MPa	68.702	0.05	Log-Normal
T_0	$^{\circ}C$	54	0.10	Normal
$tg(\alpha)$	$^{\circ}C/km$	10	0.10	Normal

Os métodos confiabilísticos adotados compreendem a Simulação de Monte Carlo (MCS) e o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM), aproveitando a precisão do método de simulação e a agilidade do método analítico, respectivamente.

Segundo Sagrilo [4], a MCS consiste na geração de N cenários randômicos, respeitando a distribuição de probabilidade de cada variável. Estes cenários são avaliados na função de falha $G(\vec{X})$ e os eventos com valores nulos ou negativos são contabilizados como falha (N_f). A probabilidade de falha (P_f) é estimada pela razão entre o número de falhas e o número de cenários avaliados. Os resultados alcançados com a MCS são bastantes precisos, mas essa acurácia está diretamente relacionada ao número de cenários utilizados. Problemas com probabilidade de falha muito baixa exigem a realização de um grande número de simulações, implicando em um alto custo computacional.

A metodologia do FORM consiste em transformar as variáveis aleatórias (v.a.) não normais em variáveis aleatórias normais padrão não correlacionadas e linearizar a função de falha do problema no ponto de falha mais provável, conhecido como ponto de projeto. Esse método se destaca devido ao seu baixo custo computacional e a capacidade de fornecer os fatores de sensibilidade de cada variável. Mais detalhes sobre a metodologia FORM adotada neste trabalho podem ser vistos em Melchers e Beck [9].

2.3 Acoplamento entre os modelos mecânico e confiabilístico

Quando a função de falha é numérica, como nesta análise, o tempo e os recursos necessários para realização da análise de confiabilidade podem ser altamente proibitivos. Nesses casos, segundo Beck [10], uma alternativa é a utilização do método das superfícies de resposta (RSM). Esse método consiste em ajustar uma função $\bar{G}(\vec{X})$ mais simples, aproximando-a adequadamente bem a função de falha original. De posse dessa função aproximada, qualquer um dos métodos de confiabilidade estrutural pode ser aplicado. Portanto, o RSM permite acoplar o modelo mecânico determinístico ao modelo confiabilístico.

Para geração dessa superfície de resposta é necessário um conjunto de pontos previamente simulados, os quais foram escolhidos segundo um plano de experimento fatorial completo, formado pela combinação dos valores da Tabela 2, totalizando 27 cenários.

Tabela 2. Valores assumidos pelas variáveis

Variável	Unidade	Valores Assumidos
σ_{top}	MPa	[58.40, 68.70, 79.00]
T_0	$^{\circ}C$	[37.80, 54.00, 70.20]
$tg(\alpha)$	$^{\circ}C/km$	[7.00, 10.00, 13.00]

Com a simulação desses 27 cenários, a superfície de resposta é construída seguindo a metodologia proposta por Santos et al. [11], sendo um polinômio quadrático em cada variável. Esse polinômio é utilizado para estimar o deslocamento radial do poço e para extrair os gradientes da função de falha, em substituição à função numérica.

3 Aplicação

O cenário analisado é composto por um poço escavado em rocha salina, descrito na Seção 2, com os parâmetros estatísticos estabelecidos na Tabela 1. As simulações dos cenários apresentados na Tabela 2 são realizadas por um software *in-house* desenvolvido segundo formulação apresentada por Araújo [2] e seus resultados utilizados na construção das superfícies de resposta, a partir da metodologia de Santos et al. [11]. Os métodos FORM e MCS são implementados na linguagem Python, com o auxílio do pacote de aplicações estatísticas SciPy, apresentado por Virtanen et al. [12], com suporte às superfícies de resposta ajustadas.

Para esses valores, a Tabela 3 apresenta as probabilidades de falha e tempo de execução obtidos via FORM e MCS. Destaca-se a proximidade entre os valores obtidos pelos dois diferentes métodos, demonstrando uma boa aproximação do método FORM em estimar a probabilidade de falha, com custo computacional e velocidade de execução substancialmente menores.

Tabela 3. Probabilidades de falha e tempo de execução para FORM e MCS

Probabilidade de falha (P_f) [%]		Tempo de execução [s]	
FORM	MCS	FORM	MCS
16.469	16.465	1.04	594.96

Portanto, para o cenário utilizado, a probabilidade de ocorrência de fechamento do poço é da ordem de 16%, sendo um valor bastante elevado, caracterizando um baixo nível de segurança da estrutura quanto ao critério estabelecido por Poiate et al. [6].

Além dessas informações, o FORM é capaz de fornecer os fatores de importância das variáveis, que quantificam a influência da aleatoriedade de cada parâmetro no processo de obtenção da probabilidade de falha da estrutura. Esses fatores são calculados a partir dos cossenos diretores do vetor normal à função de falha no ponto de projeto no espaço normal padrão e são apresentados na Fig. 3.

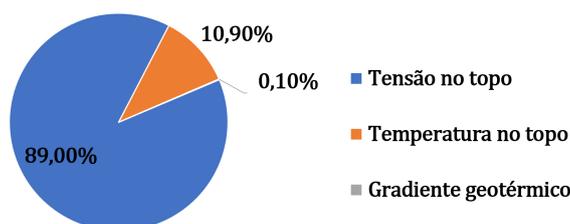


Figura 3. Fator de importância das variáveis calculada pelo FORM

De forma geral, é possível notar que, para o cenário estudado, a tensão no topo é a variável aleatória dominante na determinação da probabilidade de falha, com cerca de 89% de influência, seguida pela temperatura no topo com 10.9% de influência. Em contrapartida, o gradiente geotérmico mostrou-se pouco influente na probabilidade de falha da estrutura, representando apenas 0.1% de importância. Ainda que a tensão no topo tenha a menor dispersão dentre as 3 v.a. analisadas, a assimetria de sua distribuição Lognormal contribui para seu alto valor de fator de importância.

4 Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise de confiabilidade estrutural em um poço escavado em rochas salinas usado como referência para o estudo, demonstrando a aplicabilidade de uma análise estatística incorporando as incertezas e variabilidades intrínsecas a esse tipo de estrutura. Para os parâmetros considerados, a probabilidade de falha da estrutura analisada é da ordem de 16%, caracterizando um baixo nível de segurança quanto ao critério estabelecido. O método de confiabilidade de primeira ordem (FORM) se mostrou uma ferramenta eficiente para estimar a probabilidade de falha dessas estruturas, alcançando resultados muito próximos da simulação de Monte Carlo, com tempo de execução e custo computacional substancialmente menores. O FORM ainda possibilitou analisar os fatores de importância de cada variável, mostrando que as variáveis determinantes na avaliação da probabilidade de falha são a tensão e a temperatura no topo da caverna que juntas correspondem por mais de 99% de importância. Em trabalhos futuros, a metodologia apresentada neste trabalho pode ser expandida a partir de modelagens mais complexas e com dados estatísticos mais apurados, permitindo avaliações ainda mais realísticas.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material que foi incluído aqui como parte do presente artigo é de propriedade (e autoria) dos autores ou tem a permissão dos proprietários para serem incluídos aqui.

Referências

- [1] Costa, A., Poiate, E., Falcao, J. L., & Coelho, L. F. M., 2005. Triaxial creep tests in salt applied in drilling through thick salt layers in campos basin-brazil. *Society of Petroleum Engineers*, vol. .
- [2] Araújo, C., 2014. Desenvolvimento de um elemento finito para modelagem do comportamento de poços verticais em rochas salinas. Master's thesis, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Maceió.
- [3] Santos, B., 2019. Modelos equivalentes do fechamento de poços verticais em rochas salinas. Monografia (Bacharel em Engenharia de petróleo), UFAL (Universidade Federal de Alagoas), Maceió, Brasil.
- [4] Sagrilo, L., 1994. *Análise de Confiabilidade Estrutural Utilizando os Métodos Analíticos FORM e SORM*. PhD thesis, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [5] Santos, K. R. M. & Ramos Jr, A. S., 2012. Reliability analysis of vertical wellbore drilling in salt rocks. *International Journal of Modeling and Simulation for the Petroleum Industry*, vol. 6, pp. 59–70.
- [6] Poiate, E., Costa, A., & Falcao, J. L., 2006. Well design for drilling through thick evaporite layers. *Society of Petroleum Engineers*, vol. .
- [7] Fossum, A. & Fredrich, J., 2007. Probabilistic analysis of borehole closure for through-salt well design. *Acta Geotech*, vol. 2, pp. 41–51.
- [8] Li, D., Jiang, S., Chen, Y., & Zhou, C., 2014. Reliability analysis of serviceability performance for an underground cavern using a non-intrusive stochastic method. *Environ Earth Sci*, vol. 71, pp. 1169–1182.
- [9] Melchers, R.-E. & Beck, A., 2018. *Structural reliability analysis and prediction*. John Wiley & Sons.
- [10] Beck, A., 2014. *Curso de confiabilidade estrutural: Notas de aula*. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos.
- [11] Santos, B., Araújo, C., Fernandes, R., & Lira, W., 2017. A customizable computational strategy for evaluation of engineering problems using multivariable interpolation techniques. In *XXXVIII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, Florianópolis - SC, Brasil.
- [12] Virtanen, P., Gommers, R., & et. al, S. . ., 2020. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, vol. 17, pp. 261–272.