

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTIMAÇÃO BAYESIANA DO TEMPO DE VIDA DE FLUIDOS MINERAIS SALGADOS DE BENTONITA PARA ABANDONO DE POÇOS

AUTORES:

Palloma Alves Albuquerque¹, Michelli Barros¹, Tiago Almeida de Oliveira², Luciana Viana Amorim³, Waleska Rodrigues Pontes da Costa³, Karine Castro Nóbrega³, Anna Carolina Amorim Costa³, Elessandre Alves de Souza⁴

INSTITUIÇÃO:

¹Unidade Acadêmica de Estatística, Universidade Federal de Campina Grande, ²Departamento de Estatística, Universidade Estadual da Paraíba, ³Unidade Acadêmica de Petróleo, Laboratório de Pesquisa em Fluidos de Perfuração (Peflab), Universidade Federal de Campina Grande, ⁴CENPES - PETROBRAS

ESTIMAÇÃO BAYESIANA DO TEMPO DE VIDA DE FLUIDOS MINERAIS SALGADOS DE BENTONITA PARA ABANDONO DE POÇOS

Resumo

A operação de abandono de poços é uma etapa crítica na indústria de petróleo e gás, envolvendo uma série de procedimentos para garantir a segurança ambiental e operacional. Durante essa operação, os elementos de barreira desempenham um papel fundamental, uma vez que garantem a integridade do poço a longo prazo, evitando vazamentos de fluidos do reservatório para a superfície. Embora o cimento seja tradicionalmente utilizado como elemento de barreira no abandono de poços de petróleo, a crescente demanda de operações de abandono tem motivado a busca por materiais alternativos, afim reduzir custos e garantir maior segurança ambiental e operacional. Uma possibilidade de substituição ao uso do cimento, consiste na utilização de fluidos aquosos, constituindo barreiras líquidas no interior do poço. No entanto, esse tipo de barreira precisa passar por uma rigorosa qualificação para garantir sua eficácia e durabilidade diante das condições extremas encontradas nos reservatórios de petróleo. Nessa perspectiva, este estudo tem como objetivo estimar o tempo médio de vida do fluido mineral salgado de bentonita, utilizado como barreira líquida durante o abandono temporário de poços, por meio de testes de vida acelerados. O fluido foi exposto a diferentes temperaturas (95°C, 110°C, 140°C e 150°C) por períodos de tempo variando de 1 a 10 dias. A análise utilizou a distribuição Weibull para os tempos de vida, onde o parâmetro de escala é modelado em função da temperatura. Os dados foram categorizados como falha ou não-falha, resultando em dados binários. A metodologia bayesiana foi adotada para a análise dos dados, com uma distribuição a priori Laplace. Para a estimação dos parâmetros, foi utilizado o Método de Monte Carlo via Cadeia de Markov (MCMC), implementado com uma cadeia de 100.000.001 iterações. Após um período de descarte inicial de 10.000 iterações (*burn-in*), amostras foram coletadas a cada 4.000 iterações (*thinning*). O critério de Raftery-Lewis foi aplicado para determinar o número adequado de iterações necessárias para obter estimativas precisas e confiáveis. Os resultados indicam que o tempo médio de vida do fluido mineral salgado de bentonita, para uma temperatura de 80°C, foi de aproximadamente 3,8 anos, com um intervalo de credibilidade de 95% variando de 3,47 a 4,14 anos.

Palavras-chave: estatística bayesiana, teste de vida acelerado, barreiras líquidas, abandono de poços.

Abstract

The well abandonment operation is a critical phase in the oil and gas industry, involving a series of procedures to ensure environmental and operational safety. During this operation, barrier elements play a fundamental role as they ensure the long-term integrity of the well, preventing reservoir fluid leaks to the surface. Although cement is traditionally used as a barrier element in the abandonment of oil wells, the growing demand for abandonment operations has motivated the search for alternative materials to reduce costs and ensure greater environmental and operational safety. One possibility for replacing cement is the use of aqueous fluids, forming liquid barriers within the well. However, such barriers need to undergo rigorous qualification to ensure their effectiveness and durability under the extreme conditions found in oil reservoirs. This study aims to estimate the average lifespan of saline mineral fluids of bentonite used as liquid barriers during the temporary abandonment of wells through

accelerated life tests. The fluids were exposed to different temperatures (95°C, 110°C, 140°C, and 150°C) for periods ranging from 1 to 10 days. The analysis used the Weibull distribution for lifetimes, where the scale parameter is modeled as a function of temperature. The data were categorized as failure or non-failure, resulting in binary data. A Bayesian methodology was adopted for data analysis, with a Laplace prior distribution. The Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method was used for parameter estimation, implemented with a chain of 100,000,001 iterations. After an initial discard period of 10,000 iterations (burn-in), samples were collected every 4,000 iterations (thinning). The Raftery-Lewis criterion was applied to determine the appropriate number of iterations needed to obtain accurate and reliable estimates. The results indicate that the average lifespan of saline mineral fluids of bentonite was approximately 3.8 years, for a temperature of 80°C, with a 95% credibility interval ranging from 3.47 to 4.14 years.

Keywords: bayesian statistics, accelerated life testing, liquid barriers, well abandonment.

Introdução

A operação de abandono de poços é uma etapa crítica na indústria de petróleo, principalmente no que diz respeito à segurança operacional e à proteção ao meio ambiente (IBP, 2017). Durante essa operação, barreiras de segurança são implementadas visando assegurar a integridade do poço a longo prazo, evitando vazamentos de fluidos do reservatório para a superfície. O cimento é o material mais utilizado como elemento de barreira, porém, fluidos aquosos, material alternativo ao cimento, vêm sendo utilizados como barreiras líquidas no interior do poço, com a proposta de garantir a segurança operacional, minimizar os impactos ambientais e reduzir custos. No entanto, esse tipo de barreira precisa passar por uma rigorosa qualificação para garantir sua eficácia e durabilidade diante das condições extremas encontradas nos reservatórios de petróleo. Nessa perspectiva, este estudo tem como objetivo estimar o tempo médio de vida do fluido mineral salgado de bentonita utilizados como barreira líquida durante o abandono temporário de poços, por meio de testes de vida acelerados (Aslani, 2022).

Nos testes de vida acelerados, os equipamentos são submetidos a altos níveis de estresse acelerando o seu processo de degradação. A partir desses experimentos, os dados são analisados e extrapolados para condições normais de uso, o resultado é a economia de tempo e recursos. Durante esses ensaios, as unidades são submetidas a alguma variável de aceleração como: sobrecarga, taxa de utilização elevada, temperatura, umidade e voltagem (Nelson, 2009). A aceleração é aplicada sob algum tipo de estresse podendo ser do tipo: constante, escalonado ou progressivo. No estresse constante, o mais utilizado, as unidades são submetidas a mesma carga de estresse durante um tempo predeterminado. Para os ensaios com estresse escalonado, o estresse é gradualmente aumentado em intervalos de tempos. Por fim, no ensaio com estresse progressivo, aplica-se um estresse que aumenta de forma contínua ao longo do tempo.

Nos testes de vida acelerados, os experimentos ocorrem em tempos de inspeção predeterminados, quando se tem a informação exata dos tempos de falha dos equipamentos, esses dados são chamados de completos. Na prática, o que ocorre é que o experimento pode terminar antes de que todas as observações falhem. Quando existem informações incompletas acerca dos tempos de falha, essas observações são chamadas de dados censurados, como descrito em Nelson (2009), Kalbfleisch e Prentice (2011). Existem três tipos de censuras. A censura do tipo I ocorre quando o estudo é finalizado após um tempo predeterminado. No tipo II, o experimento é encerrado após a ocorrência de um número

específico de falhas. Por fim, a censura aleatória ocorre quando o dispositivo falha por outras causas não relacionadas ao estudo. Ademais, a censura presente nos dados ainda pode ser classificada como à esquerda, à direita e intervalar. A esquerda ocorre quando o evento falha acontece antes da inspeção. A direita ocorre quando ao terminar o tempo de inspeção o dispositivo ainda não falhou. E a censura intervalar é quando ocorre a falha entre inspeções (Colosimo e Giolo, 2006).

Nos testes de vida acelerados envolvendo o fluido mineral salgado de bentonita não se observa o tempo de vida útil real dos dispositivos, de modo que em tempos de inspeção pré-estabelecidos observa-se apenas se a unidade realizou sua função de forma satisfatória (sucesso) ou de forma insatisfatória (fracasso). Sendo assim, não se obtém o tempo exato de vida até que a falha ocorra. Consequentemente, todos os tempos de vida, nesse caso, são censurados à esquerda e à direita. Os experimentos com o fluido minerais salgado de bentonita se enquadram em experimentos *one-shot*, pois após os ensaios com as amostras do fluido, essas amostras são destruídas, não podendo ser reutilizadas. Dispositivos *one-shot* são todos aqueles que após sua primeira utilização a unidade não pode ser reutilizada, seja porque ela é destruída ou porque torna-se impossível de funcionar adequadamente (Balakrishnan, Ling e So, 2021). Alguns exemplos são: munições, *airbags* e extintores de incêndio.

Diante desse contexto, a inferência Bayesiana torna-se uma poderosa ferramenta, pois a incorporação de informações prévias cria métodos inferenciais mais robustos e eficientes principalmente para pequenas amostras. Essa abordagem se mostra promissora para a estimação do tempo de vida do fluido mineral salgado de bentonita através dos testes de vida acelerados sob estresse constante (CSALTs), considerando o modelo Weibull, função de aceleração Arrhenius e priori Laplace.

Nessa perspectiva, este estudo tem como objetivo estimar o tempo médio de vida do fluido mineral salgado de bentonita, utilizado como barreira líquida durante o abandono temporário de poços, por meio de testes de vida acelerados.

Metodologia

A formulação do fluido utilizada neste trabalho utiliza um sistema aquoso com bentonita sódica e um agente polimérico para ajustar as propriedades reológicas e controlar a filtração. Na formulação é adicionada salmoura de cloreto de sódio como agente adensante. A escolha dos aditivos e suas dosagens ocorre de acordo com os requisitos operacionais, que foram verificados por meio de ensaios baseados em normas técnicas da indústria. Após o preparo do fluido, cada alíquota foi colocada em células de aço inoxidável revestidas com Teflon. Essas células foram pressurizadas a 100psi e depois expostas a temperaturas de 95°C, 110°C, 140°C e 150°C em estufas com circulação de ar, por tempos de exposição que variaram de 1 a 10 dias.

Após a exposição à temperatura, as alíquotas de fluido foram ensaiadas para obtenção do volume de filtrado em condições de alta pressão e alta temperatura (HPHT). Foi utilizado um filtro prensa HPHT da marca FANN, série 387, para realizar o ensaio a 150°F (65,6°C) e sob uma pressão de 300 psi. Os procedimentos seguiram as especificações do Instituto Americano de Petróleo (API), conforme a norma ISO 10414-1: 2008. A partir da realização desse ensaio, considerou-se que o fluido apresentou falha quando o volume de filtrado (VF) da alíquota foi superior a 11,5mL.

Após a realização dos ensaios, foi necessário analisar os dados obtidos para estimar o tempo de vida útil do fluido. Na estatística Bayesiana, três funções são necessárias para obter as estimativas do modelo (Paulino *et al.* 2018): a distribuição a priori; a função de verossimilhança e a distribuição a

posteriori. A distribuição a priori possui toda a informação prévia acerca do parâmetro θ , é representada por $f(\theta)$. A função de verossimilhança carrega toda a informação da amostra, pode ser representada por $f(x|\theta)$. A distribuição a posteriori, $f(\theta|x)$, é a distribuição de probabilidade resultante da incorporação das informações prévias e dos dados observados.

A distribuição Weibull é uma das mais utilizadas na análise de confiabilidade devido à sua flexibilidade para modelar diferentes padrões de falha, possui dois parâmetros: um de forma η e um de escala β . No experimento acelerado utilizado no estudo, foi assumido uma variável $T \sim \text{Weibull}(\eta, \beta)$. O modelo de AFT (*Accelerated Failure Time*) é frequentemente usado para analisar dados de falha, onde a distribuição do tempo de falha é acelerada ou desacelerada em função de variáveis explicativas. Para relacionar a temperatura com a taxa de falha, utilizamos o modelo de Arrhenius, que descreve como a taxa de uma reação química (ou falha) depende da temperatura, cujo parâmetro de escala β foi acelerado a partir da temperatura como $\beta_{w_j} = \exp \{\alpha_0 + \alpha_1/w_j\}$, onde w_j são os referentes níveis de temperatura (95°C, 110°C, 140°C e 150°C).

Para cada temperatura w_j , K_i fluidos foram testados e inspecionados para ver se houve falhas ou não nos tempos de inspeção τ_i , variando de 1 a 10 dias. A vida útil exata do fluido é desconhecida, apenas registramos se houve falha ou não do mesmo. Assim denotamos $X_{ijk} = 1$, se o k -ésimo fluido testado sob a temperatura w_j falhou no tempo τ_i , e 0 se não falhou. Considere o seguinte vetor de informações $\mathbf{z} = \{\tau_i, K_i, w_j, X_{ijk}, n_i, i = 1, 2, \dots, I\}$ em que n_i é o número de falhas observadas. Assim, a função de verossimilhança conjunta condicional é dada por:

$$L(\theta|\mathbf{z}) \propto \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^J \left[\exp \left\{ - \left(\frac{\tau_i}{\exp \{\alpha_0 + \alpha_1/w_j\}} \right)^r \right\} \right]^{\sum_{k=1}^{K_i} x_{ijk}} \left[1 - \left(\exp \left\{ - \left(\frac{\tau_i}{\exp \{\alpha_0 + \alpha_1/w_j\}} \right)^r \right\} \right) \right]^{K - \sum_{k=1}^{K_i} x_{ijk}}$$

Assumindo a priori Laplace, temos que a densidade conjunta a posteriori pode ser descrita como:

$$\pi_i(\alpha_0, \alpha_1 | x, t, w) \propto \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^J \left[\exp \left\{ - \left(\frac{\tau_i}{\exp \{\alpha_0 + \alpha_1/w_j\}} \right)^r \right\} \right]^{\sum_{k=1}^{K_i} x_{ijk}} \times \\ \left[1 - \left(\exp \left\{ - \left(\frac{\tau_i}{\exp \{\alpha_0 + \alpha_1/w_j\}} \right)^r \right\} \right) \right]^{K - \sum_{k=1}^{K_i} x_{ijk}} \times \exp \left\{ - \sum_{g=1}^3 \left(\left| \frac{\theta_g}{\theta_g^h} \right| \right) \right\},$$

em que $r = \ln(\eta)$, θ_g o vetor de parâmetros e θ_g^h o vetor de hiper parâmetros para $g = 1, 2, 3$.

Como descrito por Balakrishnan, Ling e So (2021), a amostragem de Monte Carlo via cadeia de Markov (MCMC), através do algoritmo de Metropolis-Hastings (Storopoli 2021, Pérez 2022), gera amostras de uma distribuição a posteriori, onde as primeiras são descartadas como (*burn-in*), e um pulo é definido visando diminuir a autocorrelação. As médias amostrais marginais podem ser utilizadas como estimativas pontuais bayesiana aproximadas dos parâmetros. Os estimadores passam a ser:

$$\hat{\alpha}_0 = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \alpha_0^{(l)} \quad \hat{\alpha}_1 = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \alpha_1^{(l)} \quad e \quad \hat{r} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N r^{(l)}$$

Como as características de vida são funções que envolvem α_0 , α_1 e r então, as estimativas bayesianas geradas a partir do MCMC estão descritas a seguir, onde $\widehat{R}_{ij}$ é a confiabilidade estimada e $\widehat{T}_{w_j}$ é a estimativa do tempo de vida médio do fluido na temperatura w_j .

$$\widehat{R}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\exp\{\alpha_0^{(l)} + \alpha_1^{(l)}/w_j\}} \right)^{\exp(r^{(l)})} \right\} \quad e \quad \widehat{T}_{w_j} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \exp\{\alpha_0^{(l)} + \alpha_1^{(l)}/w_j\} \Gamma \left(1 + \frac{1}{\exp(r^{(l)})} \right).$$

Resultados e Discussão

A metodologia bayesiana foi adotada para a análise dos dados, utilizando uma distribuição a priori de Laplace. Para a estimação dos parâmetros, do tempo médio de vida do fluido e do intervalo de credibilidade, foram inicialmente fornecidas ao programa as seguintes entradas: temperaturas (Temp), tempos de inspeção (τ), número de amostras (K), número de falhas (n), estimativa da temperatura inicial (x_0) e três estimativas de tempos iniciais (365, 730 e 1095 dias). O Método de Monte Carlo via Cadeia de Markov (MCMC) foi implementado com uma cadeia de 10.000.001 iterações. Após um período inicial de descarte de 10.000 iterações (burn-in), as amostras foram coletadas a cada 4.000 iterações (thinning). O critério de Raftery-Lewis foi aplicado para determinar o número adequado de iterações necessárias para obter estimativas precisas e confiáveis, gerando ao final um tamanho de cadeia de 3.975 amostras.

Com base nessas informações, foram estimados os parâmetros do modelo de vida acelerado, resultando na estimativa do tempo médio de vida, em dias, para uma dada temperatura, e nas confiabilidades para os três tempos iniciais. Como resultado, para uma temperatura de 80°C, a estimativa do tempo médio de vida para o fluido mineral salgado de bentonita foi de aproximadamente 3,8 anos, com um intervalo de credibilidade de 95% variando de 3,47 a 4,14 anos. Ademais, para os três tempos iniciais (1, 2 e 3 anos), a confiabilidade estimada foi, respectivamente, de 0,9991, 0,9785 e 0,8393.

Essas estimativas atestam a que a aplicação do fluido mineral no abandono temporário de poços na temperatura considerada, é uma alternativa altamente promissora, de modo que o tempo médio de vida estimado aponta para a manutenção das propriedades do fluido com relação aos requisitos estabelecidos por um período de tempo superior ao tempo máximo permitido na legislação brasileira para o abandono temporário de poços sem monitoramento.

Conclusões

Neste trabalho, a inferência Bayesiana foi utilizada para estimar o tempo médio de vida e o intervalo de credibilidade do fluido mineral salgado de bentonita. Empregando métodos inferenciais robustos, aplicamos a técnica de testes de vida acelerados sob estresse constante (CSALT) para analisar a durabilidade do fluido. O modelo Weibull foi selecionado para descrever a distribuição dos tempos de

vida, e uma distribuição a priori de Laplace foi utilizada para incorporar o conhecimento prévio sobre os parâmetros.

Os testes de vida acelerados sob estresse constante (CSALT) permitiram simular condições de uso intensificadas, reduzindo o tempo necessário para observar falhas e, assim, estimar com maior precisão a vida útil do fluido. A metodologia Bayesiana possibilitou a combinação de dados observacionais com informações prévias, fornecendo estimativas mais confiáveis e intervalos de credibilidade que refletem a incerteza associada aos parâmetros do modelo.

A partir dos dados coletados e da implementação do Método de Monte Carlo via Cadeia de Markov (MCMC), foi possível obter uma cadeia de amostras que convergiu para a distribuição posterior dos parâmetros do modelo Weibull. Esse processo permitiu estimar o tempo médio de vida do fluido e calcular intervalos de credibilidade que indicam a confiabilidade dessas estimativas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a PETROBRAS, pelo apoio financeiro à pesquisa, por meio do projeto TC N° 0050.0120134.21.9.

Referências Bibliográficas

ASLANI, Farhad et al. **Additive and alternative materials to cement for well plugging and abandonment: A state-of-the-art review**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 215, p. 110728, 2022.

BALAKRISHNAN, N.; LING, M. H.; SO, H. Y. **Accelerated life testing of one-shot devices: Data collection and analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2021.

COLOSIMO, E. A.; GIOLO, S. R. **Análise de sobrevivência aplicada**. [S.l.]: Editora Blucher, 2006.

FAN, T.-H.; BALAKRISHNAN, N.; CHANG, C.-C. **The Bayesian approach for highly reliable electro-explosive devices using one-shot device testing**. Journal of Statistical Computation and Simulation, Taylor & Francis, v. 79, n. 9, p. 1143-1154, 2009.

IBP. **Diretrizes para a construção, operação e manutenção de poços terrestres (CBP-EP)**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2017. Disponível em: https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2017/09/IBP_Job249_CBP_EP_Diretrizes_Poco_WEB_5.pdf. Acesso em: 10 jul. 2024.

KALBFLEISCH, John D.; PRENTICE, Ross L. **The statistical analysis of failure time data**. John Wiley & Sons, 2011.

NELSON, W. B. **Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

PAULINO, C. D. et al. **Estatística Bayesiana**. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2018.

PÉREZ, F. L. **Estatística Bayesiana e MCMC**. 2022. Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~lucambio/CM/MCMC.html>. Acesso em: 14 dez. 2023.

PLUMMER, M., BEST, N., COWLES, K., & VINES, K.. **CODA: Convergence Diagnosis and Output Analysis for MCMC**. R News, 6(1), 7-11. 2006.

STOROPOLI, J. **Markov Chain Monte Carlo – MCMC**. 2021. Disponível em: <https://storopoli.io/Estatistica-Bayesiana/5-MCMC.html>. Acesso em: 14 dez. 2023.