



AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE REVESTIMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO EM ZONAS DE ALTA PRESSÃO E TEMPERATURA E ÁREAS DE ROCHAS SALINAS

João Paulo Araújo Correia

João Paulo Lima Santos

joaopaulocorreia@live.com

jpls@lccv.ufal.br

Universidade Federal de Alagoas, Laboratório de Computação Científica e Visualização

Campus A.C.Simões, LCCV, 57.072-900, Maceió, Alagoas, Brasil

Abstract. *As atividades de dimensionamento e de instalação das colunas de revestimento de poços de petróleo correspondem a elementos fundamentais para garantir a segurança e operacionalização de campos exploratórios de hidrocarbonetos. Com o desafio de perfuração de poços em áreas geologicamente mais complexas, a exemplo das chamadas reservas do pré-sal e em reservatórios sujeitos à alta pressão e alta temperatura (High Pressure High Temperature - HPHT), novas variáveis em projeto de poços devem ser consideradas para garantir a operação segura do mesmo. O trabalho pretende avaliar o comportamento de modelos constitutivos de fluência em rochas salinas e então determinar modelos empíricos por meio das curvas de fluência. Também no presente trabalho será avaliado os incrementos de esforços advindos do comportamento viscoso das rochas salinas nas colunas de revestimento de poços de petróleo e a respectiva influência no tratamento de projetos para dimensionamento de revestimento de poços a partir dos modelos reológicos empíricos. Emprega-se uma estratégia baseada no método dos elementos finitos para modelar o comportamento de fluência de rochas salinas através de modelos viscoelásticos em função da série de Prony. O processo de dimensionamento das colunas de revestimento é efetuado seguindo as recomendações normativas API5C3 e ISO10400.*

Keywords: *Revestimento de poços de petróleo, Fluência de rochas salinas, HPHT, Projeto de poços de petróleo.*

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais etapas durante o processo de desenvolvimentos de poços de petróleo é a operação de revestimento do poço, que ocorre através da descida de colunas de aço. As colunas de revestimento são geralmente instaladas após o processo de perfuração, garantindo principalmente estabilidade as paredes laterais do poço para prosseguimento da perfuração em fases mais profundas, bem como garantir o isolamento do poço com relação ao meio externo (THOMAS, 2001). Atualmente, com a descoberta de campos em áreas geologicamente mais complexa, como exemplo as reservas do pré-sal e reservatórios sujeitos à alta pressão e alta temperatura (HPHT), novas variáveis em projeto de poço devem ser consideradas no processo de dimensionamento das colunas de revestimento.

A rocha salina *in situ* apresenta comportamento parcialmente viscoso e tende a fluir durante o processo de perfuração podendo ocasionar o fechamento das paredes laterais do poço, gerando estados de solicitações de tensões que devem ser inclusos no cálculo de dimensionamento das colunas de revestimento. O comportamento reológico do sal segue um modelo de fluência clássico constituído basicamente por uma fase transiente, caracterizado por uma elevada taxa de deformação logo após a aplicação de uma carga constante, e por uma fase estacionária, que tende a diminuir a taxa de deformação em função do rearranjo molecular se aproximando de um valor constante; mais novos incrementos de deformação acontecem com aparecimento de microfissuras (FINDLEY, 1976).

A curva de fluência em rochas salinas tem grande dependência da intensidade da tensão aplicada e das condições de temperatura, assim como também dependência da espessura da camada de sal, do gradiente geotérmico, da composição mineralógica, do conteúdo de água, da presença de impurezas e pela extensão na qual as tensões diferenciais são aplicadas ao sal (COSTA, 2005).

A aplicação da simulação da reologia das rochas salinas, em especial durante o processo de perfuração, pode ser obtida por meio do emprego do modelo reológico do sólido viscoelástico padrão. O modelo mais difundido associa um elemento de Maxwell a um elemento elástico conectado em paralelo. Partindo da equação integral do modelo viscoelástico linear, pode-se reescrever a expressão para a parcela desviatória do tensor de tensões (s) em função da deformação desviatória (e) na forma da Eq. (1) (ZIENKIEWICZ, 2005).

$$s(t) = \int_{-\infty}^t 2G(t - \tau) \frac{\partial e}{\partial \tau} \partial \tau \quad (1)$$

Através dessa formulação, é possível particularizar a representação final para um fluido e um sólido viscoelásticos. Partindo da forma integral, obter-se uma função de relaxação ($\bar{G}$), de tal maneira que o modelo do sólido viscoelástico linear é atendido. Uma solução particular é a chamada série de Pronny, conforme mostra-se na Eq. (2), onde μ_o e μ_N são parâmetros adimensionais ajustados com dados experimentais e λ_N é tempo de relaxação.

$$\bar{G}(t) = G_o \left[\mu_o + \sum_{t=1}^N \mu_N e^{\frac{-t}{\lambda_N}} \right] \quad (2)$$

No dimensionamento das colunas de revestimento devem-se considerar as resistências mínimas dos tubos para suportar os esforços solicitantes de tração, pressão interna e colapso. Para estimar tais valores levam-se em conta as condições mais adversas que possam surgir durante a descida, a instalação e a vida útil das colunas, e no caso específico, o esforço adicional

em função da fluência da rocha salina, adicionalmente com o fator de segurança. O procedimento para o cálculo da resistência mecânica do tubo empregado no revestimento do poço de petróleo utilizado nesse trabalho seguem às orientações normativas da norma API 5C3 (Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe, and Line Pipe Properties - API, 1994).

2. METODOLOGIA

Os parâmetros da função de fluência empregados para o modelo viscoelástico foram calibrados por meio do método dos mínimos quadrados com base em dados de ensaios triaxiais em corpos de prova realizados por D'ELIA (1991). Os parâmetros refletem a fluência estacionária em rocha salina sob alta pressão e alta temperatura, particularmente representadas aos termos associados da série Prony.

A estratégia numérica para representar o estado de deformação da rocha salina em função do tempo é baseada em um esquema recursivo proposto por ZIENKIEWICZ (2005) com base num esquema de marcha no tempo baseado em diferença central. O cenário para aplicação da simulação numérica da perfuração de um poço numa camada de sal está mostrado na Fig. 1. O modelo geológico adotado é caracterizado por apresentar uma lâmina d'água com espessura de 1000m, uma camada de rocha dura com espessura de 500m (e peso específico de 22.56 kN/m³) e uma camada de rocha salina com espessura de 500m (e peso específico de 21.60 kN/m³).

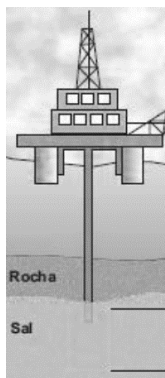


Figura 1: Cenário de Estudo

A estratégia de solução tanto para o modelo elástico linear quanto para o modelo viscoelástico empregada nesse trabalho é baseada no método dos elementos finitos com auxílio do software ABAQUS (2007). Adota-se para implementação das formulações descritas elementos quadriláteros bilineares (Q4). Os procedimentos de cálculo de cargas ambientais resultantes seguem às recomendações normativas, admitindo o estado combinado dos esforços (triaxial), considerando sobretudo a influência dos esforços axiais sobre as resistências ao colapso e pressão interna nos tubos de revestimento. Os procedimentos de cálculo da resistência mecânica dos tubos de revestimento utilizados nesse trabalho seguem as orientações normativas da API5C3.

3. RESULTADOS

O primeiro passo na representação numérica da reologia do sal está relacionado à definição dos parâmetros relacionados à fluência da rocha salina. D'ELIA (1991) mostrou que a avaliação do comportamento de fluência das rochas salinas pode ser feita através dos níveis de

deformação em função do tempo. A figura 2 apresenta os níveis de deformação para a amostra da rocha salina taquidrita (HC-12) do maciço da mina Taquiri-Vassouras de Sergipe aplicadas para uma tensão variável em um período de 100 horas.

A equação empírica, aplicada no ajuste, é uma equação matemática governante do tipo exponencial, que num formato geral está mostrada na Eq. (3). Onde $d(t)$ é a deformação por fluência no tempo; t é o tempo; a , b e c são os parâmetros da equação constitutiva de deformação.

$$d(t) = a(b - e^{-ct}) \quad (3)$$

A tabela 1 apresenta os coeficientes dos parâmetros obtidos no ajuste para a curva de deformação pela tensão aplicada na amostra.

Tabela 1. Coeficientes da equação constitutiva de fluência

Parâmetro Constitutivo	Valor
a	0.01192
b	1.18719
c	0.02828

Para compatibilizar o modelo a ser desenvolvido com os estudos desenvolvidos por D'ELIA (1991), os parâmetros encontrados na tabela 1 foram ajustados para uma função de relaxação baseados nos níveis de deformações da figura 2 para então associá-los aos termos da série de Prony, conforme mostrado na Eq. (2).

Na simulação numérica, considerou-se o fluido de perfuração hidrostático com massa específica de 10.5 lb/gal. A malha de elementos finitos é constituída por 630 elementos quadriláteros lineares (Q4), e não estruturada. Também na Fig. 2 apresenta os níveis de deformação para o modelo viscoelástico em um ponto localizado na parede do poço perfurado na zona de sal, o que induz a um incremento de esforço de colapso de 0.215 MPa no revestimento do poço. Considera-se na simulação a rocha salina com coeficiente de Poisson de 0.36 e a tensão de sobrecarga corresponde ao peso próprio das camadas adjacentes.

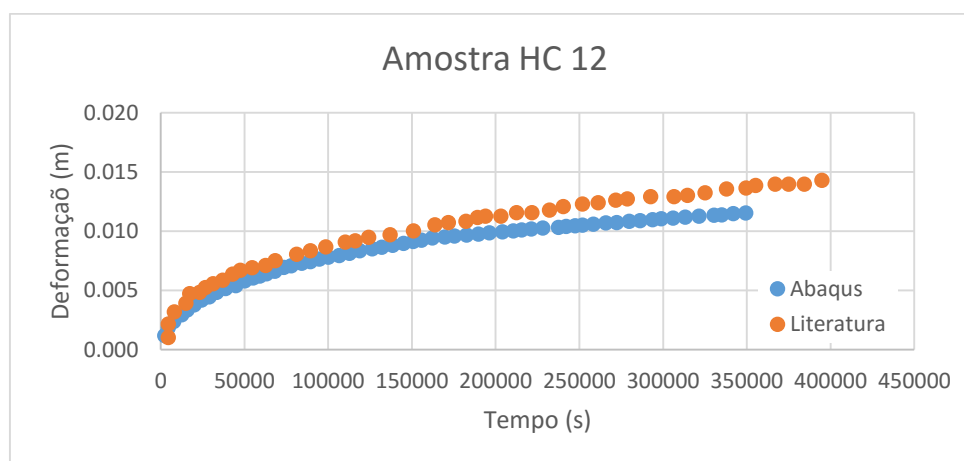


Figura 2: Evolução Temporal das Deformações

Pela Fig. 2 podemos notar que os resultados das curvas de deformação obtidos indicam boa coerência do modelo clássico de deformação, ou seja, uma elevada deformação nos instantes iniciais e uma tendência a ser constante nos tempos posteriores tanto no modelo descrito pela literatura de D'ELIA (1991) quanto pela modelagem viscoelástica no ABAQUS. O nível de tensão adicional provado pelo efeito da reologia do sal será transmitido ao revestimento do poço, devendo então o mesmo ser dimensionado para suportar esses efeitos adicionais.

Para análise de resistência mecânica do revestimento são empregadas as recomendações normativas da API5C3, com auxílio do software CWELL (2015), em desenvolvimento na Universidade Federal de Alagoas. A estratégia permite a avaliação integrada da resistência ao colapso, pressão interna e esforço axial. A Fig. 3 mostra a envoltória triaxial baseando no método de von Misses, para o tubo de revestimento classe H40, com diâmetro externo de 9.35” e peso linear 40 lb/ft.

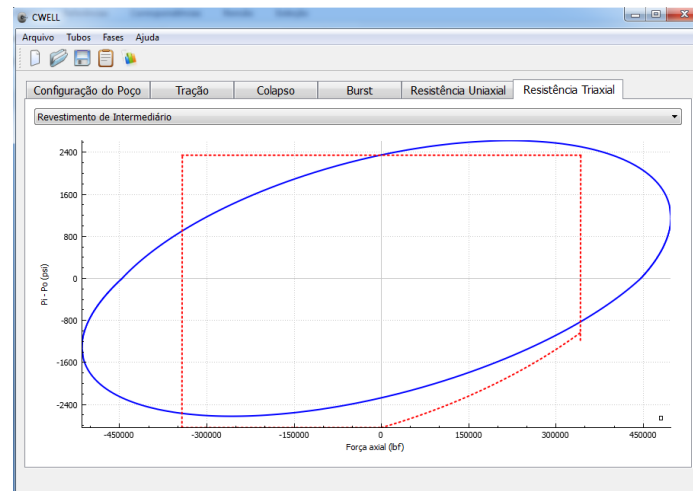


Figura 3: Envoltória de resistência para o tubo H40

O efeito de fluência induzida pela rocha salina propaga tensões adicionais de colapso no revestimento do poço que devem ser avaliadas. No caso em estudo, as estratégias numéricas adotadas se mostram coerentes para análise desses efeitos adicionais, garantindo, portanto, a integridade estrutural dos poços.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAQUS, Manual. Version 6.7 Student Version (2007), Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- CWELL. Software de dimensionamento de revestimento de poço, Universidade Federal de Alagoas, 2015.
- COSTA, A., et al. *Triaxial creep test in salt applied in drilling through thick salt layers in campos basin*. In: Paper Spe 92629, Presented At The Spe Drilling Conference, Amsterdam - The Netherlands, fev. 2005.
- D'ELIA, P. C. *Análise e Retro análise do comportamento de Fluência em Escavações Subterrâneas pelo Método dos Elementos Finitos*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1991.
- FINDLEY, W. *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials with an introduction to linear viscoelasticity*. Amsterdam, North-Holland, 1976.
- SANTOS, J. P. L. *Estratégias Adaptativas para Formulações Mista em Elementos Finitos Aplicadas a Modelos Reológicos Viscoelásticos e Modelos Lineares Incompressíveis*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência, p.70 74. Rio de Janeiro/RJ, 2001.
- ZIENKIEWICZ, O., TAYLOR, R. *Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 6 ed. Londres, Published Elsevier, 2005.