

STUDY OF VISCOELASTIC LAWS APPLIED TO SALT ROCK MODELS

Gleide K. M. Lins

Ricardo A. Fernandes

William W. M. Lira

Eduardo N. Lages

gleidekarolayne.gk@gmail.com

ricardoaf@lccv.ufal.br

william@lccv.ufal.br

enl@ctec.ufal.br

Laboratório de Computação Científica e Visualização, Universidade Federal de Alagoas

Av. Lourival Melo Mota s/n, Cidade Universitária, CEP: 57072-900, Maceió/AL, Brasil

Abstract. This work proposes a preliminary analysis of discrete mechanical models considering viscoelastic laws as an introduction to the study of salt geomechanics. For the oil industry, the presence of salt rocks during exploration significantly increases the probability of finding oil due to its sealing capacity. However, its viscoelastic rheological properties promote a faster closure of the well over time, causing, e.g., pipe stuck issues during drilling procedure. In this context, a discrete numerical model is used as a standard numerical framework to the proposed constitutive investigations. A time-dependent approach is incorporated and a double deformation mechanism is applied to consider the viscous effects on problem. Based on this methodology, creep tests using applied forces as user-defined time functions are simulated. Finally, in the way to model the wellbore closure problem, a simplified axisymmetric analysis is proposed. Case studies are presented in order to verify the obtained numerical results.

Keywords: Viscoelasticity, Discrete Model, Salt Rocks

1 Introdução

Dentro da área de exploração e perfuração de petróleo em ambiente offshore, sobretudo no cenário do pré-sal, um dos principais gargalos operacionais de projetos de poços ocorre ao se perfurar rochas salinas. Essas rochas possuem um comportamento viscoelástico acentuado e são bastante móveis quando o domínio do maciço é modificado durante a perfuração, alterando as condições geostáticas anteriores. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é realizar uma introdução ao estudo da geomecânica do sal, onde, para isso, é utilizada uma metodologia de desenvolvimento baseada em 4 macro etapas: a) breve introdução a modelos físicos discretos, apresentando sua teoria e formulação; b) incorporação de modelos viscoelásticos; c) incorporação do mecanismo duplo de deformação; d) aplicações e verificações.

2 Modelos Discretos Mecânicos

Os modelos discretos mecânicos permitem a análise do comportamento físico e mecânico de um determinado corpo discretizando-o através de um conjunto de pontos, denominados nós, que interagem entre si por meio de seus elementos (Figura 1a). Esses elementos podem ser representados por molas, amortecedores ou elementos de atrito, e carregam consigo propriedades mecânicas e relações constitutivas que compõem as características do material, possibilitando o estudo macroscópico do modelo.

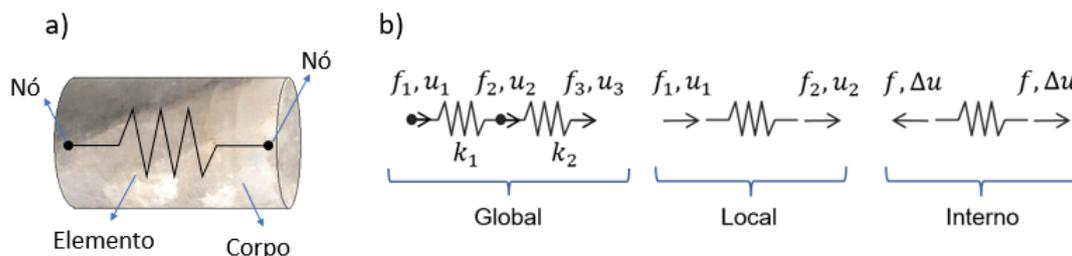


Figura 1. a) Modelo Discreto Mecânico; b) Sistemas de coordenadas global, local e interno

A fim de uma melhor caracterização de força e deslocamento, são definidos três sistemas de coordenadas: global, local e interno (Figura 1b). No sistema interno, define-se uma relação força-deslocamento que pode ser interpretada como uma generalização da relação constitutiva do material. Essa relação é transmitida integralmente para os nós do respectivo elemento, compondo o sistema local. Por sua vez, a contribuição de cada ambiente local é reunida e caracterizada no modelo, constituindo o sistema global. Para um material elástico linear e isotrópico, tem-se

$$f = k(u_j - u_i) \quad (1)$$

em que as grandezas f , k e u representam, respectivamente, força, rigidez e deslocamento. Os índices i e j na variável u referem-se aos nós de extremidade do elemento. Respeitando as leis físicas, as grandezas nodais do elemento no sistema local podem ser relacionadas com as grandezas no sistema interno a partir da seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} f_i \\ f_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

ou seja, para um determinado elemento e seu vetor de forças local \mathbf{f}^e é igual ao produto da sua matriz de rigidez local \mathbf{k}^e pelo seu vetor de deslocamentos local \mathbf{u}^e . Satisfazendo as leis físicas e as relações de

compatibilidade, para um determinado nó m sua força resultante é dada pelo somatório da contribuição de força de cada elemento e conectado ao nó m . Dessa forma, é possível montar o sistema de equações lineares baseado nas coordenadas globais do sistema

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{U} \tag{3}$$

na qual

$$\mathbf{F} = [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_N]^T \tag{4}$$

$$\mathbf{U} = [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_N]^T \tag{5}$$

em que \mathbf{K} é a matriz de rigidez global, montada mediante a acumulação das contribuições da matriz de rigidez local de cada elemento nas posições associadas às conectividades nodais do respectivo elemento, sendo \mathbf{F} e \mathbf{U} , respectivamente, os vetores globais de força e deslocamento.

Para um modelo viscoelástico caracterizado por uma associação em série entre uma mola e um amortecedor, a tensão total (σ) é igual a tensão sofrida na mola (σ_e) e no amortecedor (σ_v), já a deformação total (ε) é equivalente a soma da deformação viscosa (ε_v) com a elástica (ε_e). A lei tensão-deformação elástica é definida por uma relação linear (Lei de Hooke), onde a tensão é igual ao produto da deformação pelo módulo de elasticidade longitudinal E . A relação entre tensão e taxa de deformação viscosa é definida a partir do modelo adotado. Nesse sentido, a seguinte estratégia de solução é empregada:

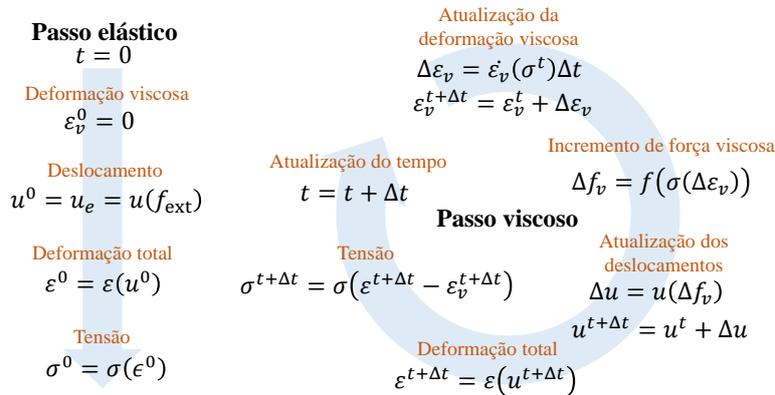


Figura 2. Solução do problema viscoelástico

Desse modo, no instante inicial ($t = 0$), somente a contribuição elástica é verificada, tornando a ser recalculada e incorporada à porção viscosa do modelo nos instantes subsequentes. Essa análise interna é repassada para o ambiente local que, por sua vez, constitui a configuração global.

3 Mecanismo Duplo de Deformação

Segundo Costa et al. [1], em virtude de sua característica cristalina, as rochas salinas apresentam comportamento dependente do tempo e da temperatura quando submetidas a tensões de cisalhamento que, caso constantes, é observada uma deformação elástica instantânea procedida de um comportamento contínuo de fluência dividido em três estágios: fluência primária (desaceleração da taxa de deformação até atingir uma taxa constante), secundária (taxa de deformação constante) e terciária (aumento da taxa de deformação e consequente ruptura). Um dos modelos clássicos empregados neste tipo de análise é

um mecanismo duplo de deformação. Dessa maneira, seguindo o comportamento viscoelástico, a taxa de deformação por fluência é dada por

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0} \right)^n e^{\left(\frac{Q}{RT_0} - \frac{Q}{RT} \right)}, \quad (6)$$

em que $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação por fluência na condição de regime estacionário, $\dot{\epsilon}_0$ é a taxa de deformação de referência, σ_{ef} é a tensão desviadora atuante, σ_0 é a tensão desviadora de referência, Q é a energia de ativação ($Q = 12$ kcal/mol), R é a constante universal dos gases ($R = 1,9859 \times 10^{-3}$ kcal/mol/K), T_0 é a temperatura de referência [Kelvin], T é o temperatura da rocha [Kelvin] e n é um coeficiente adimensional que contempla a mudança de mecanismo a depender da tensão atuante.

Para a análise numérica realizada neste trabalho, utiliza-se um modelo de apenas um elemento disposto na horizontal, composto por mola e amortecedor em série. O elemento possui área da seção transversal de 1 m^2 e comprimento de 1 m , apresenta-se engastado na extremidade esquerda e modelado com propriedades viscoelásticas (mecanismo duplo encarregado da parcela viscosa e mola da parcela elástica), tendo como base os parâmetros da halita disponíveis em Costa et al. [1]: $\dot{\epsilon}_0 = 1,880 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$; $E = 20,4 \text{ GPa}$; $\sigma_0 = 10 \text{ MPa}$; $T_0 = T = 86^\circ\text{C}$; $n = 3,36$ para $\sigma < \sigma_0$ e $n = 7,55$ para $\sigma \geq \sigma_0$. Desse modo, aplicou-se uma tensão constante de 10 MPa na extremidade livre em um tempo de simulação de 100 h . Essa prática acarretou no resultado mostrado na Figura 3, onde o estágio secundário de fluência do sal é evidenciado.

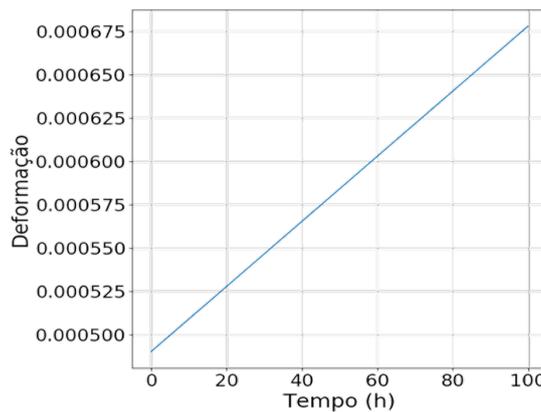


Figura 3. Deformação do elemento ao longo do tempo com tensão constante

4 Aplicação

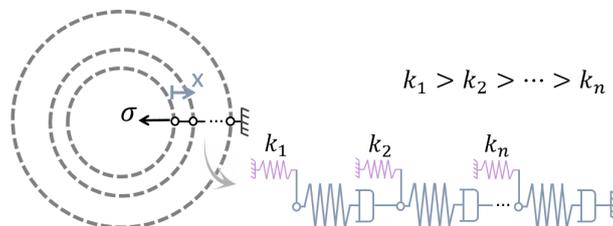


Figura 4. Seção transversal do poço, suas camadas e exemplificação do modelo utilizado

Tendo em vista que o estudo das relações constitutivas de rochas salinas tem sua principal relevância na área de perfuração de poços de petróleo, busca-se, a partir dos modelos discretos utilizados, uma aproximação da modelagem axissimétrica da seção transversal de um poço. Nesse sentido, fez-se uso de 100 elementos viscoelásticos dispostos em série com as mesmas propriedades, representando camadas

homogêneas de sal ao redor do poço, com o último elemento à direita engastado. Ainda, a fim de transmitir as tensões para todo o contorno da seção (anéis), adicionou-se entre cada elemento uma mola acoplada com o meio externo (contribuição de rigidez somente na diagonal principal da matriz de rigidez global), sendo sua rigidez decrescente à medida que se aproxima do engaste, retratando a mudança de rigidez das camadas do poço devido ao aumento de raio. O esquema do modelo está representado na Figura 4.

A Figura 5a mostra um deslocamento elástico inicial que vai se prolongando de maneira decrescente até o fim da simulação, implicando também, em coadunação com Poiate Jr [2], em uma desaceleração da deformação inicial devido à reorganização da tensão fornecida. Entende-se que, ao existir esse componente redistribuidor de energia para o contorno restante do poço, a tensão gerada na extremidade não é transmitida integralmente para os outros elementos, acarretando em uma tensão variável durante toda estrutura que, por conseguinte, proporciona uma taxa de deformação variável ao longo dos elementos (Figura 5b) e gera uma taxa de deformação viscosa variável no tempo (Figura 5c).

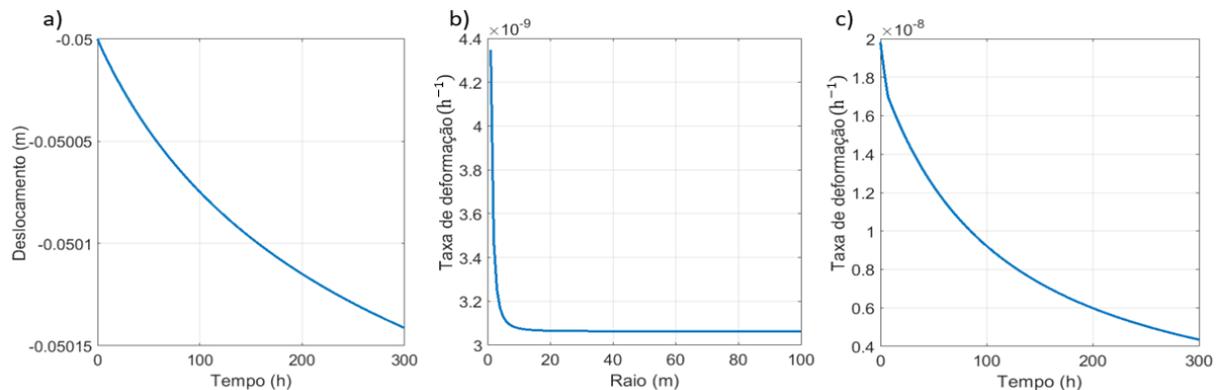


Figura 5. a) Deslocamento radial da parede do poço; b) Taxa de deformação ao longo do raio para $t = 300$ h; c) Taxa de deformação de um ponto (borda interna) ao longo do tempo

5 Considerações Finais

O presente trabalho procurou estabelecer um breve estudo das relações constitutivas, tendo como foco principal os modelos de rochas evaporíticas a fim de servir como inicialização ao estudo da geomecânica do sal. Desse modo, é importante destacar os diferentes estágios de deformação do sal mediante à aplicação de tensões constantes, bem como a possibilidade de manipulação da equação de mecanismo duplo para observá-los. Por último, com a aplicação abordada, foi possível associar os modelos estudados ao contexto da exploração e produção de petróleo no Brasil.

Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem ao CNPq pela concessão da bolsa de pesquisa ao último autor.

References

- [1] Costa, A. M., Poiate, E. J., Amaral, C. S., Pereira, A., Martha, L. F., Gattass, M., & Roeh, D., 2011. *Geomechanics Applied to the Well Design Through Salt Layers in Brazil: A History of Success*. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] Poiate Jr, E., 2012. *Mecânica das rochas e mecânica computacional para projeto de poços de petróleo em zonas de sal*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.