

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



## TÍTULO DO TRABALHO:

Implementação de Modelo de Creep para Rocha Salina incluindo as fases transiente e estacionária.

## AUTORES:

Inaldo José Minervino da Silva<sup>I</sup>; Leonardo José do Nascimento Guimarães<sup>II</sup>.

## INSTITUIÇÃO:

(I) UFPE – Universidade Federal de Pernambuco; (II) UFPE – Universidade Federal de Pernambuco.

*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.*

## IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO DE CREEP PARA ROCHA SALINA INCLUINDO AS FASES TRANSIENTE E ESTACIONÁRIA.

### Abstract

This paper presents some results of a finite element modeling of creep in evaporitic rocks. This type of rock is very important in the oil industry due to its sealing properties. In the numerical implementation of constitutive model for creep in salt rock, the linearization of the mathematical model is performed using an implicit integration method. The model implemented considers transient and steady state phases for the time evolution of strains and a consistent tangent matrix was obtained, which guarantees the quadratic convergence of global finite element scheme. A example of application of a vertical well drilling was presented showing the contribution of transient and steady state phases in the process of the cavity deformation as well as the performance of the implemented algorithm.

### Introdução

O estudo de rochas passíveis de deformações por fluência teve início no século XX, tendo como foco central as rochas evaporíticas (JIN & CRITESCU, 1997) pelo fato destas deformarem-se mesmo sob tensões e temperaturas não muito elevadas. Esse interesse mantém-se ativo até hoje devido ao potencial favorável dos evaporitos para o armazenamento de resíduos nucleares em formações salinas profundas, na indústria do petróleo e na lavra subterrânea de sal (BORGES, 2008).

Em ciências dos materiais o conceito de fluência ou *creep* é adotado para descrever a tendência de um material a se deformar ao longo do tempo sob um estado de tensões constante. A evolução das deformações com o tempo pode ser caracterizada por três estágios de comportamento conforme pode ser observado na Figura 1.1. Na fase inicial após a deformação elástica ocorre a fase transiente ou fluência primária. Nesta fase a velocidade de deformação inicial diminui até se atingir um nível de deformação com velocidade constante, sendo este segundo estágio denominado de regime estacionário, permanente ou de fluência secundária. No terceiro estágio, ocorre a aceleração das deformações, gerando a ruptura do material, ou, dependendo do estado de tensões, há uma diminuição da velocidade até não haver mais deformações de creep (atenuação).

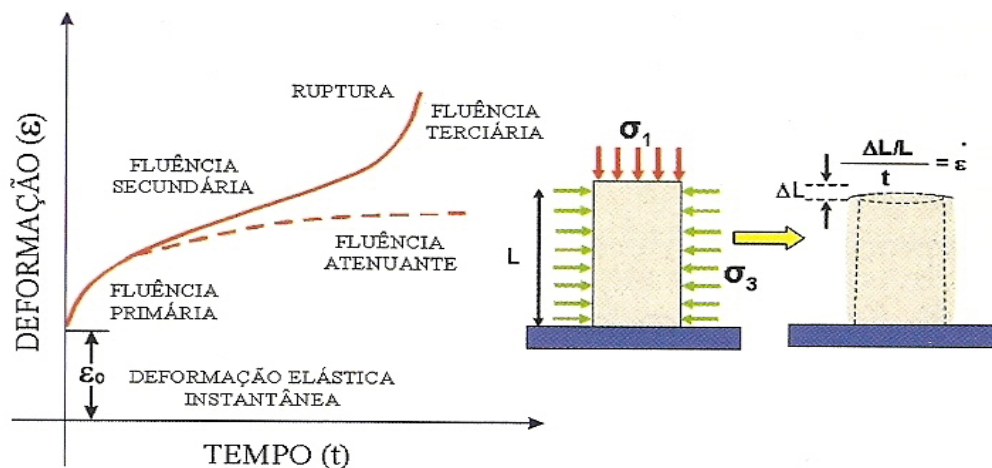


Figura 1.1 Representação esquemática do resultado de um ensaio de fluência, onde o corpo de prova submetido a uma tensão desviadora constante deforma-se em três estágios, ao longo do tempo (Mohriak *et al.*, 2008).

## Metodologia

A maioria dos modelos constitutivos de *creep* de uso prático na engenharia descreve uma simplificação do comportamento do material. Alguns modelos representam o regime transiente enquanto outros trabalham com o regime estacionário. Um dos modelos mais utilizados em aplicações práticas são as formulações empíricas que consideram a fase estacionária de fluência, sendo um dos mais empregados o modelo de mecanismo duplo de deformação, apresentando bons resultados quando as análises se dão a longos períodos de tempo (COSTA ET AL., 2004; MEDEIROS, 1999). Este modelo encontra-se implementado no CODE\_BRIGHT (GUIMARÃES, 2002) para o estado multiaxial de tensões conforme a equação abaixo:

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{3}{2} \cdot \left[ \dot{\boldsymbol{\epsilon}}_0 \cdot e^{\left( \frac{Q}{R \cdot T_0} - \frac{Q}{R \cdot T} \right)} \cdot \left( \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}} \right)^n \right] \cdot \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \frac{1}{\sigma_v} \quad [1]$$

onde:  $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}(\boldsymbol{\sigma})$  = velocidade de deformação da fluência (1/ano),  $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_0$  = Velocidade de referência (1/ano),  $\sigma_v$  = Tensão desviadora de von Mises (MPa),  $\sigma_{v0}$  = Tensão desviadora de referência (MPa),  $T_0$  = Temperatura de referência (K),  $T$  = Temperatura (K),  $Q$  = Energia de ativação térmica (depende da rocha salina),  $R$  = constante universal dos gases,  $n$  = expoente que varia de acordo com a tensão desviadora ( $n = n_1$ , se  $\sigma_v \leq \sigma_{v0}$  e  $n = n_2$ , se  $\sigma_v > \sigma_{v0}$ ),  $\mathbf{M}$  = operador desviador,  $\boldsymbol{\sigma}$  = tensor de tensões.

Contudo, para análises que consideram um curto espaço de tempo, as deformações primárias ou transientes podem ser importantes. No presente trabalho foi adotada uma formulação que considera a decomposição aditiva das deformações de fluência nas componentes primária e secundária. Este modelo foi proposto por LUX & HEUSERMANN (1983) e é denominado LUBBY2, sendo capaz de conseguir bons ajustes aos resultados experimentais quando há ocorrência da variação de tensões, principalmente em intervalos de tempos curtos (LUX & HEUSERMANN, 1983). Sua equação é dada a seguir:

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{3}{2} \left[ \frac{1}{\bar{\eta}_K(\sigma_v)} \left( 1 - \frac{\epsilon_{pr}^v}{\sigma_v} \bar{G}_K(\sigma_v) \right) + \frac{1}{\bar{\eta}_M(\sigma_v)} \right] \cdot \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad [2]$$

onde:  $\epsilon_{pr}^v$  = deformação de fluência primária,  $\bar{G}_K(\sigma_v)$  = módulo de Kelvin (MPa),  $\bar{\eta}_K(\sigma_v)$  = viscosidade de Kelvin (MPa.d),  $\bar{\eta}_M(\sigma_v)$  = viscosidade de Maxwell (MPa.d).

Assume-se que a dependência desses parâmetros e que pode ser expresso com leis exponenciais em função da tensão desviadora e da temperatura:

$$\bar{\eta}_K = \bar{\eta}_K^* \cdot e^{k_2 \cdot \sigma_v} \quad [3]$$

$$\bar{\eta}_M = \bar{\eta}_M^* \cdot e^{m \cdot \sigma_v} \cdot e^{l_0 \cdot T} \quad [4]$$

$$\bar{G}_K = \bar{G}_K^* \cdot e^{k_1 \cdot \sigma_v} \quad [5]$$

sendo  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $m$ ,  $l_0$  constantes do modelo. Comumente, os parâmetros de fluência do modelo constitutivo LUBBY2 são determinados a partir dos resultados de vários ensaios nas fases de fluência transiente e estacionária em amostras de rochas salinas submetidas a estágios de carga crescente.

## Resultados e Discussão

Pela crescente importância dos estudos relacionados à perfuração de poços a grandes profundidades, atravessando espessas camadas de evaporitos, este trabalho objetivou a análise de deformação plana (2D) de uma seção de poço posicionada a 4000m de profundidade, abaixo do fundo do mar e considerando uma lâmina d'água de 2000m. Condições similares as encontradas no pre-sal brasileiro. Destaca-se que, na operação de uma perfuração através de camadas de rochas, o poço deve ficar sem revestimento por um curto período de tempo, em geral não superior a 30dias (BOTELHO, 2008).

Destaca-se também que como a análise levou em conta um curto intervalo de tempo, e esta envolve uma grande variação do estado de tensão no entorno do poço, foi utilizado o modelo LUBBY2 que possui uma formulação que inclui a fase transiente de fluência, como já discutido anteriormente.

Para considerar as tensões atuantes nesta profundidade admitiu-se que o coeficiente de empuxo no repouso do evaporito seria igual a 1 (estado hidrostático). E que o perfil até a profundidade de estudo possuiria três grandes regiões. A primeira seria a lâmina de água, com uma profundidade de 2000m, adotando para o cálculo deste intervalo o peso específico de 1018,52kgf/m<sup>3</sup> (BOTELHO, 2008).

A segunda região, no sentido crescente com a profundidade seria da coluna de rochas não salinas consideradas com um peso específico médio de 2306,66kgf/m<sup>3</sup> (Botelho, 2008), com 2000m de espessura. Por último, o intervalo do material salino possuiria 2000m de espessura com um peso específico de 2160kgf/m<sup>3</sup> (MACKAY *et al.*, 2007).

Tabela 1.1 Descrição das tensões no perfil considerado

| Tipo de material | Profundidade    | Peso Específico           | Tensão    |
|------------------|-----------------|---------------------------|-----------|
| Lâmina de água   | 0m a -2000m     | 1018,52kgf/m <sup>3</sup> | 19,98MPa  |
| Outros estratos  | -2000m a -4000m | 2306,66kgf/m <sup>3</sup> | 45,24MPa  |
| Estrato do Sal   | -4000m a -6000m | 2160kgf/m <sup>3</sup>    | 425,36MPa |
|                  |                 | <b>Tensão Total</b>       | 107,58MPa |

A malha em elementos finitos foi composta de elementos quadriláteros lineares com 1255 nós e 1276 elementos. Devido à simetria do problema, só foi necessário discretizar  $\frac{1}{4}$  da geometria (Figura 1.2 b). O raio do poço adotado para análise é de 0.127m.

Com a finalidade de analisar a influência da parcela transiente nos resultados numéricos utilizou-se o modelo constitutivo LUBBY2 que descreve a fase transiente e estacionária e o modelo mecanismo de duplo deformação (m.d.d.), conhecido também como Lei de Norton com ativação térmica, que descreve somente a fase estacionária. Nas tabelas 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5 sumarizam propriedades e parâmetros que foram obtidos pelo ensaio de fluência e validados no trabalho de SILVA (2010).

Na figura 1.3 apresenta-se o resultado da simulação do deslocamento pelo tempo. Observa-se que a variação do deslocamento que o LUBBY2 descreve, que é a parcela transiente, é de aproximadamente 75% maior do que o valor descrito pelo m.d.c. quando decorridos 8 dias de duração da simulação. Para uma duração de 10 anos a variação de deslocamentos é da ordem de 12%.

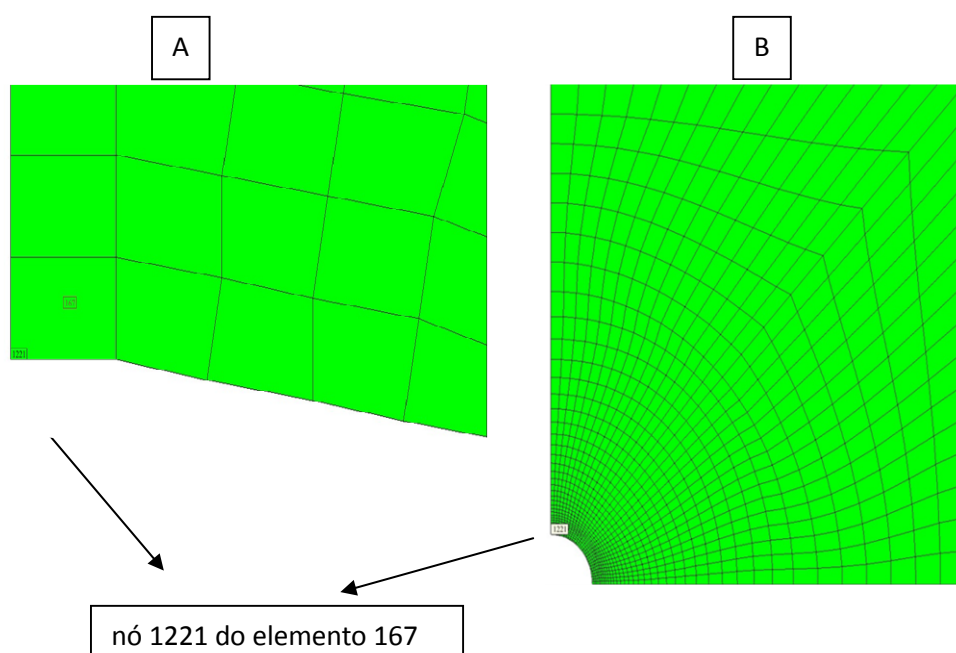


Figura 1.2. A) Zoom do nó analisado; B) Localização do nó e elemento estudado.

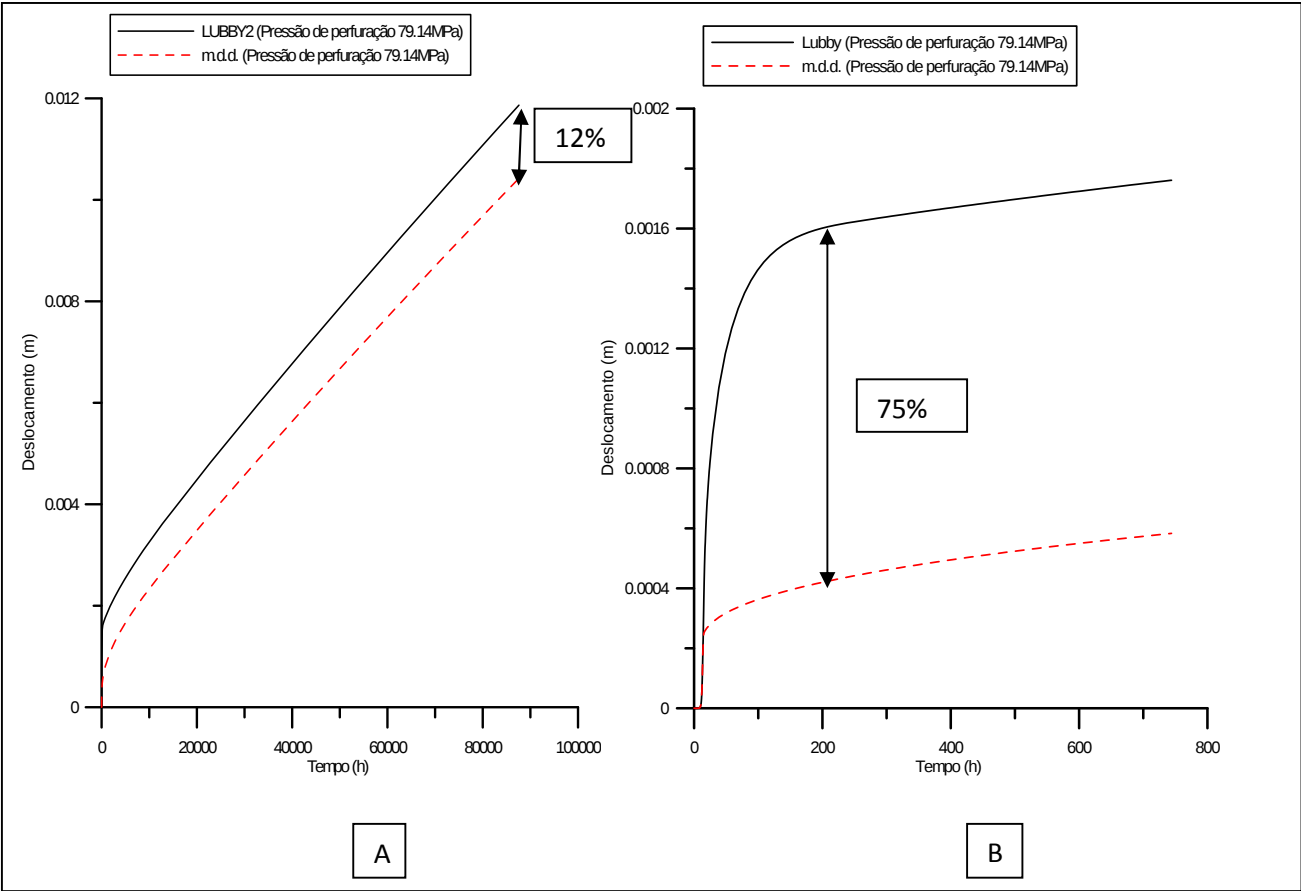


Figura 1.3 A) Resultado obtido para simulação do deslocamento pelo tempo do nó 1221 para 10 anos de duração utilizando o LUBBY2 e o m.d.d.; B) Deslocamento pelo tempo do nó 1221 para 31dias de duração utilizando o LUBBY2 e o m.d.d..

Tabela 1.2 Parâmetros elásticos da halita do trabalho de COSTA, et al (2010) utilizados na simulação

| Descrição               | Símbolo | Valor  | Unid.            |
|-------------------------|---------|--------|------------------|
| Coefficiente de Poisson | $\mu$   | 0.36   | Ad. <sup>1</sup> |
| Módulo de Young         | E       | 2.04E4 | MPa              |

Nota: Ad= Adimensional

Tabela 1.3 Parâmetros de creep da halita do m.d.d do trabalho de SILVA (2010) utilizados na simulação

| Descrição                             | Símbolo                | Valor   | Unid.               |
|---------------------------------------|------------------------|---------|---------------------|
| Tensão desviadora de referência       | $\sigma_{do}$          | 10      | MPa                 |
| Taxa de deformação de referência      | $\dot{\epsilon}_{sco}$ | 0.00059 | (ano) <sup>-1</sup> |
| Parâmetro função da tensão desviadora | $n_1$                  | 3       | Ad.                 |
| Parâmetro função da tensão desviadora | $n_2$                  | 5,8     | Ad.                 |

Nota: Ad= Adimensional

Tabela 1.4 Parâmetros de creep da halita do LUBBY2 do trabalho de HEUSERMANN, et al (2003) utilizados na simulação

| Descrição                      | Símbolo     | Valor    | Unid.             |
|--------------------------------|-------------|----------|-------------------|
| Viscosidade inicial de Kelvin  | $\eta_{K0}$ | 4.98E5   | MPa.dia           |
| Viscosidade inicial de Maxwell | $\eta_{M0}$ | 1.21E8   | MPa.dia           |
| Módulo inicial de Kelvin       | $G_{K0}$    | 1.88E5   | MPa               |
| Constante do LUBBY2            | $m_0$       | -3.27E-1 | MPa <sup>-1</sup> |
| Constante do LUBBY2            | $k_1$       | -2.54E-1 | MPa <sup>-1</sup> |
| Constante do LUBBY2            | $k_2$       | -2.67E-1 | MPa <sup>-1</sup> |
| Constante do LUBBY2            | $l_0$       | 0        | K <sup>-1</sup>   |
| Temperatura                    | $T_0$       | 318      | K                 |

Tabela 1.5 Outros parâmetros utilizados na simulação

| Descrição                                         | Símbolo  | Valor  | Unid. |
|---------------------------------------------------|----------|--------|-------|
| Porosidade inicial da halita                      | $\phi$   | 0.05   | Ad.   |
| Tensão vertical/horizontal aplicada na superfície | $\sigma$ | 107,58 | MPa   |
| Pressão do fluido de perfuração                   | $P_f$    | 79,14  | MPa   |

Nota: Ad= Adimensional

## Conclusões

O programa CODE\_BRIGHT mostrou-se capaz de analisar problemas bidimensionais com utilização de modelo de creep para representar o comportamento de um evaporito.

Sendo uma preocupação geral que as modelagens numéricas utilizem modelos mais realistas para o comportamento tensão-deformação do material, o modelo LUBBY2 mostrou-se capaz de contribuir para um melhor entendimento do fenômeno de fechamento do poço durante e após a escavação em rochas salinas.

## Referências Bibliográficas

COSTA A. M. DA, MEDEIROS, F. A., FONSENCA, C. F. **Perfuração de Espessas Camadas de Sal na Bacia de Campos**. Relatório Petrobrás, 2004.

COSTA, A. M.; POIATE JR, E.; AMARAL, C. S.; GONÇALVES, C. J. C; FALCÃO, J. L.; PEREIRA, A. **Geomechanics applied to the well design through salt layers in Brazil: A History of success**. In: 44<sup>th</sup> US Rock Mechanics Symposium and 5<sup>th</sup> U.S. – Canada Rock Mechanics Symposium, 2010.

BORGES, R. G. **Avaliação Numérica de Perturbações de Tensões Associadas a estruturas Salíferas e suas Influências na Estabilidade de Poços**. Dissertação de Mestrado UFRJ/COPPE, 2008.

BOTELHO, F. V. C. **Análise Numérica do Comportamento do Sal em Poços de Petróleo**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2008.

GUIMARÃES, L. N. **Análisis multi-componente no isoterma en medio poroso deformable no saturado**. Phd Thesis, Geotechnical Engineering Department, Technical University of Catalunya, Spain, 2002.

HEUSERMANN, S.; ROLFS, O., SCHMIDT, U. **Nonlinear finite-element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY2 constitutive model**. In: Computers and Structures 81, pp. 629-638, 2003.

JIN, J. & CRITESCU, N. D. **An Elastic/Viscoplastic Model for Transient Creep of Rock Salt**. International Journal of Plasticity, Vol. 14, Nos. 1-3, pp 85-107, 1998.

LUX, K. H.; HEUSERMANN, S. **Creep Tests on Rock Salt with Changing Load as a Basis for the Verification of theoretical Material Laws**. In: Proceedings of 6<sup>th</sup> Symposium on Salt, Toronto, vol. 1, pp. 417- 435, 1983.

MACKAY, F.; BOTELHO, F. V. C.; INOUE, N.; FONTOURA, S. A. B. **Análise do Comportamento de Evaporitos**. 4ºPDPETRO\_2\_2\_0332, 2007.

MOHRIAK, W.; SZATMAN, P.; ANJOS, S. M. C. **Sal: Geologia e Tectônica (Exemplos nas Bacias Brasileiras)**. (1ªEd).Beca Edições Ltda. Petrobrás, São Paulo, 2008.

SILVA, I. J. M. **Implementação via algoritmo implícito de modelos de fluência de rochas salinas em programas de elementos finitos**. Dissertação de Mestrado, UFPE, 2010.