

## **AJUSTE DE PARÂMETROS PARA MODELOS VISCOELÁSTICO DE FLUÊNCIA COM APLICAÇÕES EM ROCHAS SALINAS**

**Alberto D. S. Cavalcante<sup>a</sup>, Viviane C. L. Ramos<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, sito à Av.  
Trabalhador São-carlense, 400, Centro - 13566-590 São Carlos, SP.*  
<http://www.eesc.usp.br/geopos/>

<sup>b</sup>*Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Campus A. C. Simões, BR 104 – Norte,  
km 97, Cidade Universitária - Maceió - AL, CEP 57072-970, Brasil, [http:// http://www.ctec.ufal.br](http://www.ctec.ufal.br)*

**Palavras chave:** Fluência, Rocha Salina, Modelos Constitutivos.

**Resumo.** A precaução com a ruína em um material geológico submetido a tensões é um problema bastante comum na geomecânica. Na perfuração de poços de petróleo, por exemplo, durante a remoção da coluna de material sólido é gerado um desequilíbrio que pode levar a ruptura, fechamento e perda do mesmo. Quando a perfuração é em rochas salinas, a remoção dessa coluna pode provocar desequilíbrio durante toda a vida do poço. Esse fato se deve ao comportamento de fluência (*Creep*) das mesmas, que se caracteriza por uma deformação lenta e contínua a uma tensão e temperatura constante. Os estudos de fluência em rochas de sal vêm sendo descrito por modelos constitutivos, citados em algumas literaturas e derivados de estudos de metais. A falta de parâmetros e a dificuldade de obtê-los torna inviável a utilização destes. Outro problema importante é o emprego dos mesmos com parâmetros pouco confiáveis, gerando resultados muito aquém do que seria de fato. Como alternativa para essas dificuldades, o presente trabalho vem propor uma série de parâmetros ajustados com base em ensaios de fluência em rochas salinas do tipo halita. Os mesmos foram ajustados e podem ser utilizados para as diversas faixas de tensão, nos intervalos usuais da engenharia de poços de petróleo. As simulações feitas com estes parâmetros foram modeladas no Abaqus®, programa comercial de elementos finitos, e comparadas com alguns resultados, encontrados em literaturas, para poços perfurados em rochas salinas.

## 1 INTRODUÇÃO

Rochas Salinas ou Evaporitos são rochas sedimentares que geralmente se formam em locais de clima seco e com alta taxa de evaporação, permitindo a sedimentação de baixo aporte de terrígenos levando a formação dos minerais evaporíticos. Os estudos sobre esse tipo de rocha surgiram a mais de um século e até os anos de 1960 se fundamentaram na análise química dos minérios. Em seguida este estudo se tornou sedimentológico com uma visão mais atual, onde os ambientes modernos passaram a ser utilizados como modelos para o entendimento de paleoambientes deposicionais. A principal razão para esta mudança é a descoberta de faciologias evaporíticas costeiras na Costa Trucial do Golfo da Pérsia [Curtis et al. \(1963\)](#). Tais estudos possibilitaram a criação de modelos de fácies e sequencias deposicionais que passaram a ser utilizados na geologia do petróleo.

A maioria das Rochas Salinas é de origem marinha e podem ser encontrado em quase toda parte do globo, em locais onde a evaporação da água é superior à precipitação. No Brasil sua ocorrência é bastante significativa nas bacias do Amazonas, do Paraíba (com sedimentos formados no Paleozoico) e na bacia Sergipe-Alagoas (Cretáceo). Sua importância se dá pela associação com petróleo (segundo [Warren \(1989\)](#), cerca de 70% dos campos de petróleo gigantes em rochas carbonáticas estão relacionados a depósitos evaporíticos), além da associação frequente ao armazenamento de lixo radioativo devido à sua capacidade selante. Este fato se deve a algumas características mecânicas neles presentes, que impossibilitam o vazamento e garante o bom isolamento do material.

[Mackay et al. \(2008\)](#) apontam como características principais das Rochas Salinas a alta solubilidade, a ativação geoquímica, o comportamento contínuo de “*creep*” ou fluência e a ativação térmica. A fluência, fenômeno responsável pela deformação lenta e contínua na rocha (a uma tensão e temperatura constante), de fato é a característica mais marcante das Rochas Salinas. Essa deformação ocorre de forma irreversível, devido ao fato de que tal fenômeno ocorre no regime plástico de deformação e na maioria das vezes sujeitas a altas temperaturas. As propriedades das Rochas Salinas, as tensões de sobrecarga, o tempo e a temperatura de exposição são fatores que pode interferir na ocorrência da fluência. A fluência é caracterizada por deformações que no primeiro momento apresenta uma desaceleração (fluência primária ou transiente) até o momento em que se atinge uma taxa constante de deformação (fluência secundária ou estacionária). Esta é a fase dominante do regime, nela as deformações ocorridas não são totalmente recuperadas. Por fim é a fase de aceleração e ruptura, fluência terciária, caracterizada pelo aumento da taxa de deformação. A [Figura 1](#) representa de maneira gráfica esse comportamento.

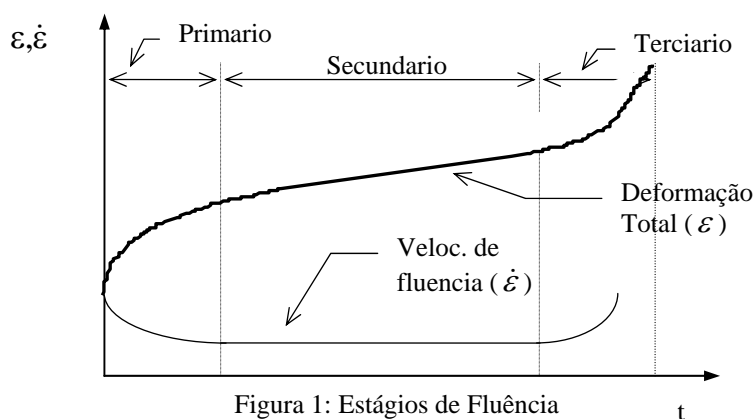


Figura 1: Estágios de Fluência

## 2 MODELOS CONSTITUTIVOS DE FLUÊNCIA

O estudo de fluência para finalidades práticas incluem modelos reológicos, físicos e empíricos, geralmente descrevendo apenas um estágio de comportamento. Inicialmente estes modelos fundamentaram-se no comportamento dos metais que posteriormente foram adaptados para a mecânica das rochas. Os modelos reológicos são modelos que representam de forma macroscópica o comportamento mecânico dos corpos sólidos em termos tensão, deformação e tempo. Um exemplo deste é o modelo de Burgers, formado pela associação em série dos modelos de Maxwell e de Kelvin. Tal modelo leva em consideração as características elásticas e viscosas dos Rochas Salinas e pode definir muito bem o regime estacionário de fluência. As leis baseadas em processos físicos, que em geral se associam as leis de fluência estacionaria, surgiram com objetivo de representar o comportamento dos Rochas Salinas baseado em mecanismos de iteração por meio de certos intervalos de tensões, de estado de deformação, de taxa de deformação, de temperatura e de microestrutura. Basicamente os estudos com base em processos físicos se baseiam nos três mecanismos predominantes no comportamento de fluência dos materiais: “*dislocation climb*”, “*dislocation glide*” e um mecanismo indefinido. Atualmente existe uma tendência para utilização da lei física de duplo mecanismo de deformação, onde inclui os mecanismo de fluência “*dislocation glide*” e mecanismo indefinido. Ela se baseia no microcomportamento da estrutura submetida a diferentes condições de temperatura e tensão diferencial, podendo ser melhor entendida em Costa (1984). Os modelos empíricos, nada mais são que equações matemáticas deduzidas de observação e ajuste entre o comportamento de uma curva típica de fluência e o seu resultado experimental. De acordo com a função matemática dominante a equação empírica pode ser subdividida em: potencial, logarítmica e exponencial. A lei empírica potencial, é o modelo que melhor representa o comportamento nos primeiros estágios de fluência. A Equação (1), desenvolvida por Lomenick aput Gravina (1997), utiliza três constantes empíricas para o seu melhor ajuste e relaciona a deformação com a tensão, temperatura e tempo.

$$\varepsilon = K\sigma^c t^b T^a, \quad (1)$$

onde:  $\varepsilon$  é a deformação transiente de fluência;  $\sigma$  é a tensão diferencial;  $t$  é o tempo;  $T$  é a temperatura;  $K$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes empíricas.

Devido ao comportamento das Rochas Salinas a lei potencial vem sendo aplicada bastante na fase transiente da curva de deformação por fluência. Algumas literaturas sugerem outras formulações potenciais para descrever o fenômeno em rochas salinas. O Abaqus® (programa comercial para modelagem em elementos) propõe o “*power-law model*”, um modelo de fluência que leva em consideração a tensão diferencial ( $\sigma$ ) e o tempo ( $t$ ). O modelo “*power-law model*” do Abaqus® pode ser utilizado em duas versões: “*time-hardening*” e “*strain-hardening*”. A versão “*time-hardening*” é mais apropriada quando o estado de tensão permanece essencialmente constante, enquanto que a versão “*strain-hardening*” é mais recomendada quando o estado de tensões varia durante as análises. Nas simulações realizadas leva-se em consideração a taxa de deformação de fluência na versão “*time-hardening*”, visto que nas análises considera-se uma variação muito pequena no estado de tensão. A Equação (2) é o modelo “*power-law model*” do Abaqus®. Aplicando-se como condição inicial  $\tilde{q}$  igual a um uma tensão diferencial constante  $q_c$  ao longo do tempo e resolvendo a equação diferencial (2), pode-se chegar a Equação (3).

$$\dot{\varepsilon} = A\tilde{q}^n t^m, \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{(t^{m+1}) \cdot A q_c^n}{m+1}, \quad (3)$$

onde:  $\dot{\varepsilon}$  é a taxa de deformação equivalente uniaxial de fluência;  $\tilde{q}$  é a tensão equivalente uniaxial desviadora;  $t$  é o tempo total;  $A$ ,  $n$  e  $m$  são constantes definidas em função da temperatura. Por razões físicas, as constantes  $A$ ,  $n$  devem ser positivas e  $m$  um valor entre -1 e 0 para que a deformação no tempo tenha significado físico.

### 3 AJUSTE DE PARÂMETROS PARA O “POWER-LAW MODEL”

#### 3.1 Dados para ajuste

Os ensaios de fluência, utilizados neste estudo, foram realizados por Cella (2003) e corresponde a ensaios triaxiais de fluência na halita, sob altas pressões e temperaturas. A halita é uma rocha que se caracteriza por ser formada por íons e sódio cristalizados num sistema cúbico através de ligações iônicas. Normalmente a coloração é incolor ou branca, quando pura apresenta fratura conchoidal, dureza baixa (aproximadamente 2,5) e densidade moderada (por volta de  $2.100\text{kg}/\text{m}^3$ ). Em seus estudos Cella (2003) obteve as taxas de deformações para o regime estacionário de fluência da halita. Essas taxas, na maioria dos casos, foi retirada a partir de períodos superiores a 1400 horas, em diferentes ensaios de fluência. Na Tabela 1 tem-se o resumo das taxas de deformação obtidas nos ensaios triaxiais de fluência, para diferentes tensões diferenciais e temperatura de  $86^\circ\text{C}$  ( $359\text{K}$ ). A faixa de extração e as tensões diferenciais de cada um dos ensaios também são apresentados na Tabela 1.

Ensaio	Taxa de Deformação ( $h^{-1}$ )	Tensão Diferencial (MPa)	Faixa de Extração da Fluência Estacionária
102-06	2,321E-07	6	>1400hs
102-03	8,468E-07	8	>1600hs
102-05	1,801E-06	10	>700hs
102-04	7,911E-06	12	>1400hs
102-07	2,807E-05	14	>140hs
102-02	7,749E-05	16-17	>850hs até 1400hs
102-01	1,000E-03	20	>22hs

Tabela 1: Taxa de deformação para as diferentes tensões diferenciais (Cella, 2003).

Para o ajuste da função de fluência do Abaqus® é utilizados os dados dos ensaios de Cella (2003) nos diferentes níveis de tensões. O objetivo é estimar os parâmetros da Equação (2), de modo que a mesma possa representar a curva de deformação para diferentes estágios de tensões diferenciais.

#### 3.2 Método de ajuste

Na estimativa dos parâmetros da equação do Abaqus® é utilizado o Solver, ferramenta do programa Microsoft Office Excel®. Esse recurso faz parte de um conjunto de programas,

algumas vezes chamado de ferramentas de análise hipotética, e tem como uma de suas funções o ajuste de um ou alguns parâmetros de uma equação a partir de uma série de dados. Com o Solver, um valor ou uma sequência de valores, referências de células, nomes, funções ou operadores em uma célula podem ser encontrados de maneira rápida e interativa. Podendo-se ainda aplicar algumas restrições às células ajustáveis, à célula de destino ou a outras células direta ou indiretamente relacionadas à célula de destino. Restringindo assim os valores que afetam a formulação a ser ajustada.

No processo de ajuste procura-se minorar uma função de erro que é definida como o somatório dos erros absolutos, diferença absoluta entre o valor de deformação do ensaio  $y$  e o valor estimado no ajuste  $\bar{y}$ . De maneira a se obter o melhor ajuste para os parâmetros da equação. A expressão para este erro pode ser dada pela Equação (4).

$$E = \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i|, \quad (4)$$

### 3.3 Apresentação dos resultados

Na determinação dos parâmetros de fluência da equação do Abaqus®, as deformações obtidas para os diferentes ensaios, o tempo e a tensão diferencial são dados de entrada. O resultado que retorna do ajuste são os parâmetros  $A$ ,  $m$  e  $n$  para a equação de fluência do Abaqus®. O gráfico da Figura 2 mostra as curvas ajustadas para os diferentes níveis de tensões. Estes ajustes retornaram como parâmetros  $A = 4.468 \cdot 10^{-31}$ ,  $m = -0.21$  e  $n = 6.69$  para a tensão  $\tilde{q}$  em  $kPa$ ,  $t$  em horas.

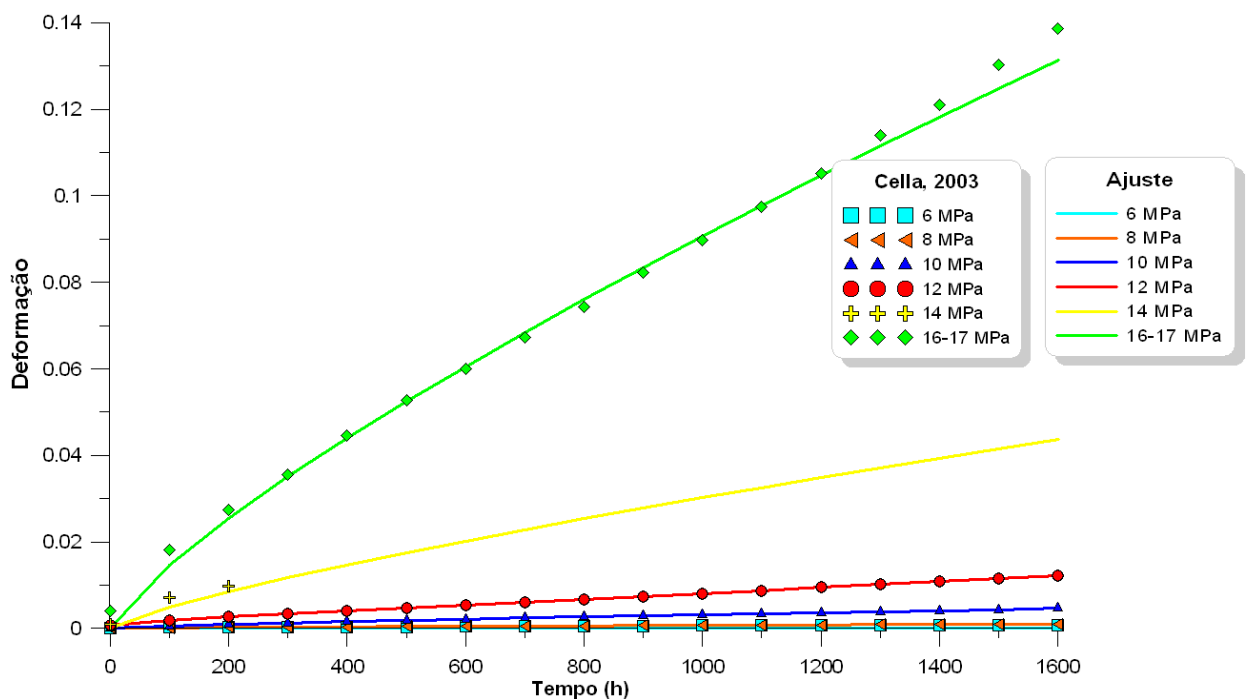


Figura 2: Ajuste da deformação ao longo do tempo para os diferentes níveis de tensões.

Observa-se que há uma boa aproximação da equação com os dados do ensaio. Nessa situação, com os parâmetros obtido, observam-se erros muito pequeno da ordem de menos de 0.5%. Alguns autores também fizeram ajustes de parâmetros para equações semelhantes a do

Abaqus®. Starfield e McClain (1973) fizeram ajustes para o modelo potencial (Equação (1)) com base em ensaios uniaxial de fluência em rochas de sal e obtiveram a Equação (5).

$$\varepsilon = 1.3 \cdot 10^{-37} \sigma^3 t^{0.3} T^{9.5}, \quad (5)$$

sendo  $\sigma$  em *psi*,  $t$  em horas,  $T$  em Kelvin e  $\varepsilon$  adimensional.

Hansen e Mellegard (1980) também fizeram ajuste para a Equação (1) e obtiveram a Equação (6).

$$\varepsilon = 2.21 \cdot 10^{-40} \sigma^{3.28} t^{0.45} T^{11.45}, \quad (6)$$

sendo  $\sigma$  em *kPa*,  $t$  em horas,  $T$  em Kelvin e  $\varepsilon$  adimensional.

Transformando as Equações (5) e (6) numa expressão semelhante a do Abaqus® e admitindo  $\tilde{q}$  em *kPa*,  $t$  em horas, chega-se aos parâmetros da Tabela 2.

	Starfield e McClain (1973)	Hansen e Mellegard (1980)	Ajustado
$A$	2.233E-16	1.792E-11	4.468E-31
$n$	3.00	3.28	6.69
$m$	-0.70	-0.55	-0.21

Tabela 2: Parâmetros para a Equação do Abaqus®

O gráfico da Figura 3 apresenta uma comparação entres os parâmetros ajustados e os obtidos na literatura com o ensaio de 16-17MPa de Cella (2003).

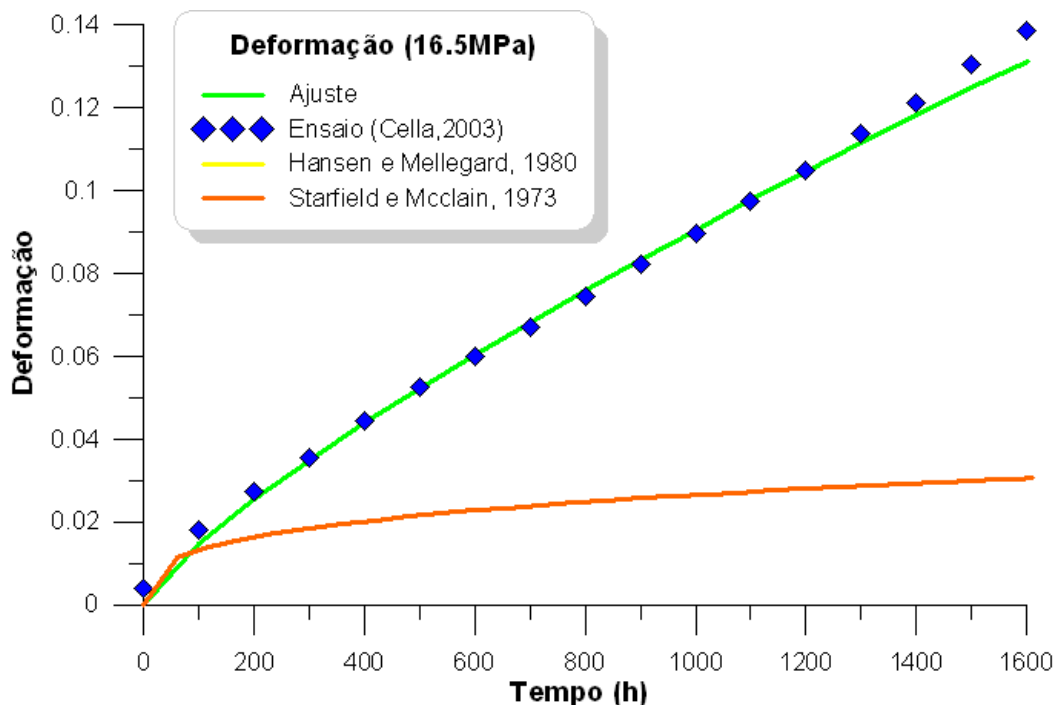


Figura 3: Comparação com outros parâmetros.

Observa-se no gráfico da Figura 3 uma discrepância muito grande entre os dados do ensaio e o ajuste com os parâmetros de Starfield e McClain (1973). Não existe uma boa relação com a fluência da halita. Para os parâmetros de Hansen e Mellegard (1980) a discrepância é ainda maior e as deformações dezenas de vezes maior que a do ensaio. Observa-se ainda que para os

parâmetros ajustados o erro é muito pequeno e a curva, neste caso, é a que melhor representa o comportamento de fluência da halita.

Atualmente existe uma tendência em se adotar o modelo de Mecanismo Duplo de Deformação. É um modelo que representa bem o comportamento secundário de fluência e por ser um modelo linear o ajuste dos parâmetros é muito mais simples. O modelo físico de Duplo Mecanismo de Deformação considera o “*dislocation glide*” e “*mecanismo indefinido*” como mecanismo de deformação. Costa et al. (2005) apresentou uma solução para a equação para uma temperatura de 86°C. Nesta situação Costa et al. (2005) propôs a Equação (7).

$$\varepsilon = 1.88 \cdot 10^{-6} \cdot \left( \frac{\sigma_{efet}}{10} \right)^n, \quad (7)$$

para uma tensão de referencial  $\sigma_0 = 9.91 MPa$ , onde:

$$n = 3.36 \text{ para } \sigma_{efet} < \sigma_0$$

$$n = 7.55 \text{ para } \sigma_{efet} \geq \sigma_0$$

Na Figura 4 apresenta-se uma comparação com os dados do ensaio (Cella, 2003) e as curvas dos modelos Ajustado e Costa et al. (2005).

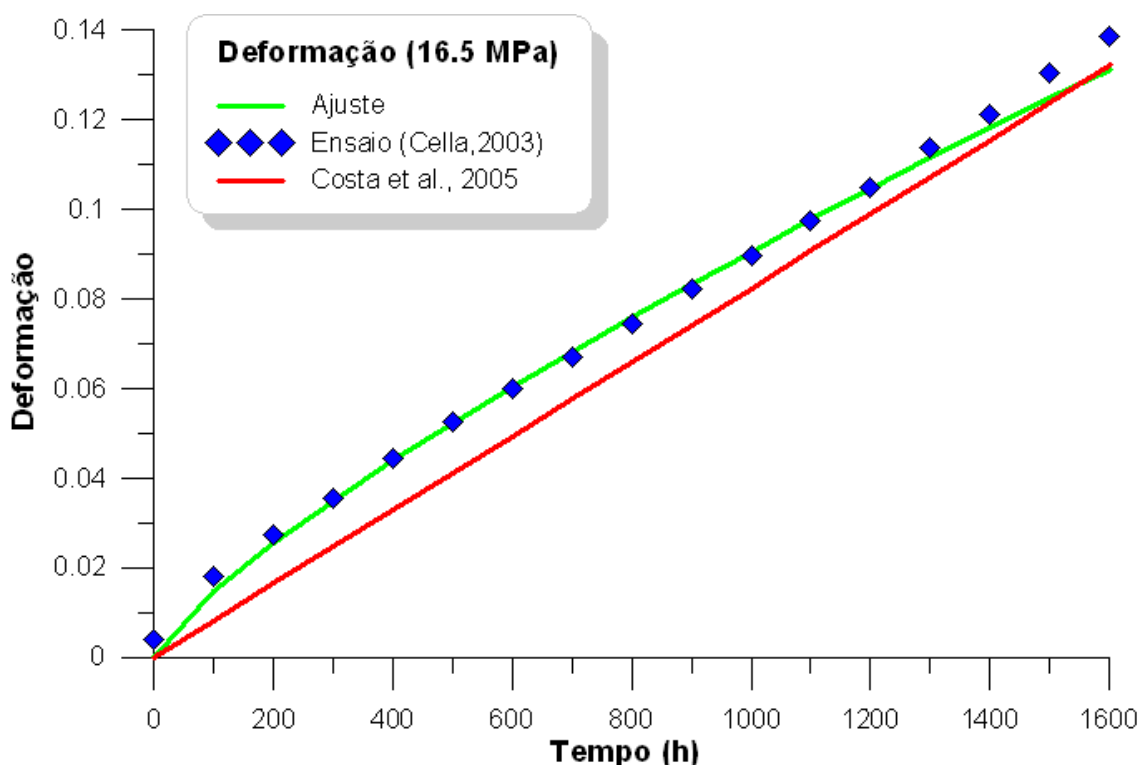


Figura 4: Comparação com o modelo de Costa et al. (2005).

Observa-se na Figura 4 que o modelo de Costa et al. (2005) apresentou deformações com discrepâncias próximas de 1%, fato já comprovado pelo referido autor. Mesmo sendo funções de leis diferentes, as curvas mostram uma boa relação com a fluência. Mais uma vez é comprovado a validade dos parâmetros ajustados.



#### 4 MODELAGEM NUMÉRICA DE UM POÇO

A modelagem numérica da perfuração do poço de petróleo foi realizada a partir das características da Bacia de Campos (Brasil). Segundo [Costa et al. \(2005\)](#), a Bacia de Campos é caracterizada por uma espessa camada de evaporito localizada abaixo de uma camada de rocha dura e a cerca de 1400m de profundidade. Para as simulações realizadas é admitido um cenário (semelhante ao de [Costa et al. \(2005\)](#)) com uma espessa camada de halita pura, a ser perfurado no intervalo de 4000m para 4014.4m abaixo do nível do mar. Essa situação foi adotado para o caso da modelagem axissimétrica e pode ser melhor entendida a partir da [Figura 5](#) que ilustra o perfil geológico utilizado na análise.

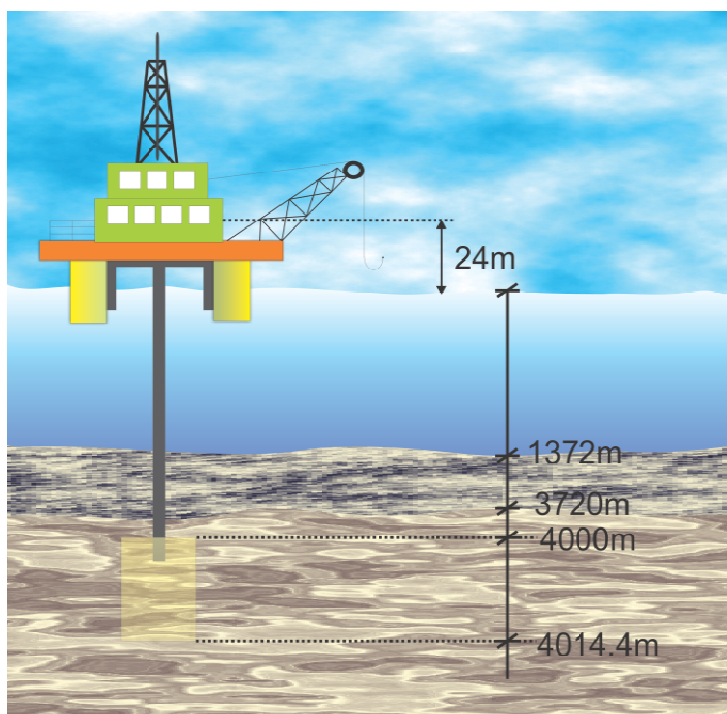


Figura 5: Perfil geológico analisado.

Observa-se que para a situação em análise o equipamento de perfuração está localizado a uma profundidade de 24m acima do nível do mar e que entre a halita e o mar existe uma camada de rocha com 2348m de espessura.

O cálculo da tensão de confinamento levou em consideração o peso do fluido de  $12.6kN/m^3$  ( $10.5lb/gl$ ). Para as tensões in situ foi idealizado o material com características isotrópica, ou seja, as tensões são iguais em todas as direções ( $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ ). Além disso, o módulo de elasticidade ( $E$ ) é constante em toda camada do material, ou seja, o meio é homogêneo.

Os pesos específicos adotados para os diferentes matérias foram escolhidos com base em dados da literatura, utilizados por [Botelho \(2008\)](#) e [Costa et al. \(2005\)](#). O Cálculo das tensões até a profundidade de estudo, 4000m abaixo do nível do mar, é mostrado na [Tabela 3](#). Esta profundidade foi escolhida por ser uma região intermediária da camada de halita e os estudos nela vão até 4020m.



Tipo de material	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Profundidade (m)	Tensão (kPa)
Lâmina de água	10.18	0 a 1372	13966.96
Rochas Duras	22.56	1372 a 3520	48458.88
Estrato de sal	21.6	3520 a 4000	10368.00
<b>Total de <math>\sigma_y</math> na profundidade de estudo</b>			<b>72793.84</b>

Tabela 3: Cálculo das tensões até 4000m abaixo do nível do mar.

As simulações são feitas tanto para um modelo axissimétrico, como para um modelo plano de deformação e leva em consideração um poço com diâmetro de 0.36m, aproximadamente 14". Essa consideração, em ambos os casos, resume o estudo de caso a um problema semelhante ao de [Costa et al. \(2005\)](#) e pode servir como parâmetro para a verificação da coerência de resultados. O objetivo das simulações numéricas é de investigação, na zona evaporítica, da taxa de fechamento do poço.

O modelo proposto (Equação (3)) não tem como variável a temperatura e dessa forma não é necessário o uso de um gradiente de geotérmico. Este fato leva a uma simplificação do modelo, que para a simulação realizada é compatível com a temperatura de 359K dos experimentos de [Cella \(2003\)](#). Temperatura esta, muito próxima da encontrada na região de análise.

Os parâmetros elásticos utilizados nas modelagens foram extraídos de [Poiate Júnior et al. \(2006\)](#) e tem como valor para o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson:  $E = 2.07 \cdot 10^7 \text{ kPa}$  e  $\mu = 0.36$ , respectivamente. Esses valores foram obtidos a partir de estudos relacionados ao comportamento mecânico do sal da mina Taquari-Vassouras no Nordeste Brasileiro. O comportamento de fluência da halita, simulado no Abaqus® pelo modelo "power-law model" na versão "time hardening", é obtido com bases nos parâmetros ajustados.

#### 4.1 Modelo axissimétrico

O modelo axissimétrico corresponde a um plano de 7.2m x 14.4m como mostra a [Figura 6](#) Nessa situação considera-se apoio do primeiro gênero na parte inferior, de modo a impedir os deslocamentos na direção vertical. Na [Figura 6](#) ainda é possível observar o eixo de revolução na lateral esquerda, equivalente a apoios do primeiro gênero impedido os deslocamentos na horizontal, o que caracteriza o modelo.

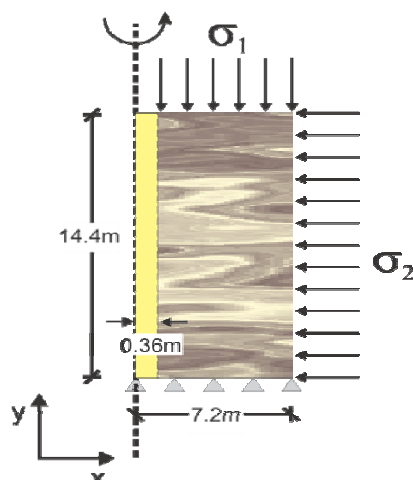


Figura 6: Modelo Axissimétrico.

Por ser considerado um meio isotrópico tem-se que  $\sigma_1 = \sigma_2$ . Estas tensões, calculadas anteriormente, vão sofrer variação com a profundidade no modelo utilizado. Ou seja, as tensões verticais tendem a aumentar o que leva a um aumento das tensões horizontais. Para tanto é usado o carregamento gravitacional, do Abaqus®, no modelo em análise.

A simulação do modelo Axissimétrico é dividida em 31 “steps” que corresponde a cada etapa da simulação. A primeira etapa (step) é feito o uso da função geostático do Abaqus®, nessa etapa é simulado um equilíbrio entre o estado de tensão e a força externa, ou seja, nessa fase se cria um equivalente de forças externas. A Segunda e todas demais etapas “par” corresponde à simulação da resposta elástica e a introdução das tensões geradas pelo peso do fluido de perfuração. A terceira e as demais etapas “ímpar” corresponde à fase de fluência da halita. Nestas etapas são considerados tempos de resposta de 6 minutos até a escavação do próximo lance, com exceção a última de 200 horas.

#### 4.2 Modelo plano de deformação

O modelo Plano de Deformação correspondeu a um plano de  $7.2m \times 7.2m$  como mostra a Figura 7. Na parte inferior e lateral esquerda são considerados apoios do primeiro gênero de modo a impedir os deslocamentos na direção horizontal e vertical respectivamente. Na superfície do modelo e na lateral direita são admitidos as tensões de compressão nas direções 1 e 2. Tensões estas calculadas para uma profundidade de  $4020m$  abaixo do nível do mar e que corresponde a  $73225.84kPa$ .

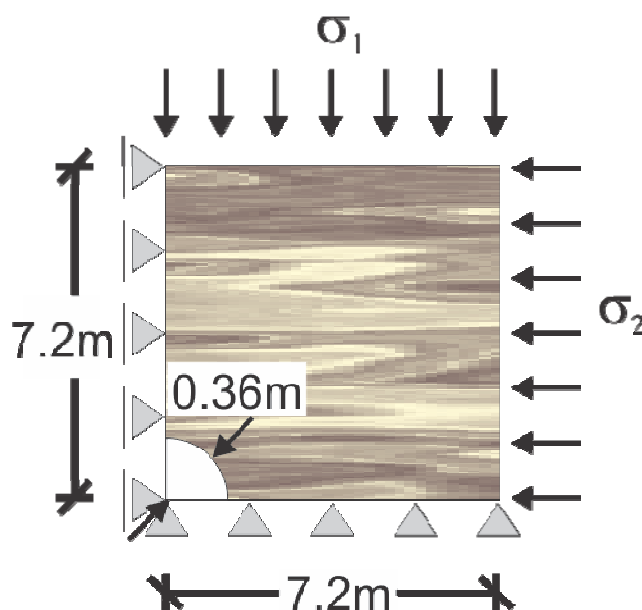


Figura 7: Modelo Plano de Deformação.

Por ser considerado um meio isotrópico tem-se que  $\sigma_1 = \sigma_2 = 73225.84kPa$ . Esta situação não necessita de um carregamento gravitacional, pois é analisado as deformações em uma dada profundidade.

A simulação do modelo Axissimétrico é dividida em 3 “steps” que corresponde a cada etapa da simulação. A primeira etapa (step) é feito o uso da função geostático do Abaqus®, na segunda é feita a simulação da resposta elástica e a introdução das tensões geradas pelo o peso do fluido de perfuração. Na terceira é feita a simulação da fluência da halita em um período de 500 horas.

### 4.3 Resultados

Os resultados da simulação axissimétrica foram obtidos em 6 diferentes profundidades, variando de  $4007.5m$  a  $4012.5m$  abaixo do nível do mar. Os resultados apresentados na [Figura 8](#) são correspondentes ao fechamento radial do poço ao longo do período analisado. Segundo [Costa et al. \(2005\)](#) o fechamento aceitável para este poço, considerando as irregularidades da escavação, é de  $1.75''$  ( $0.022m$ ).

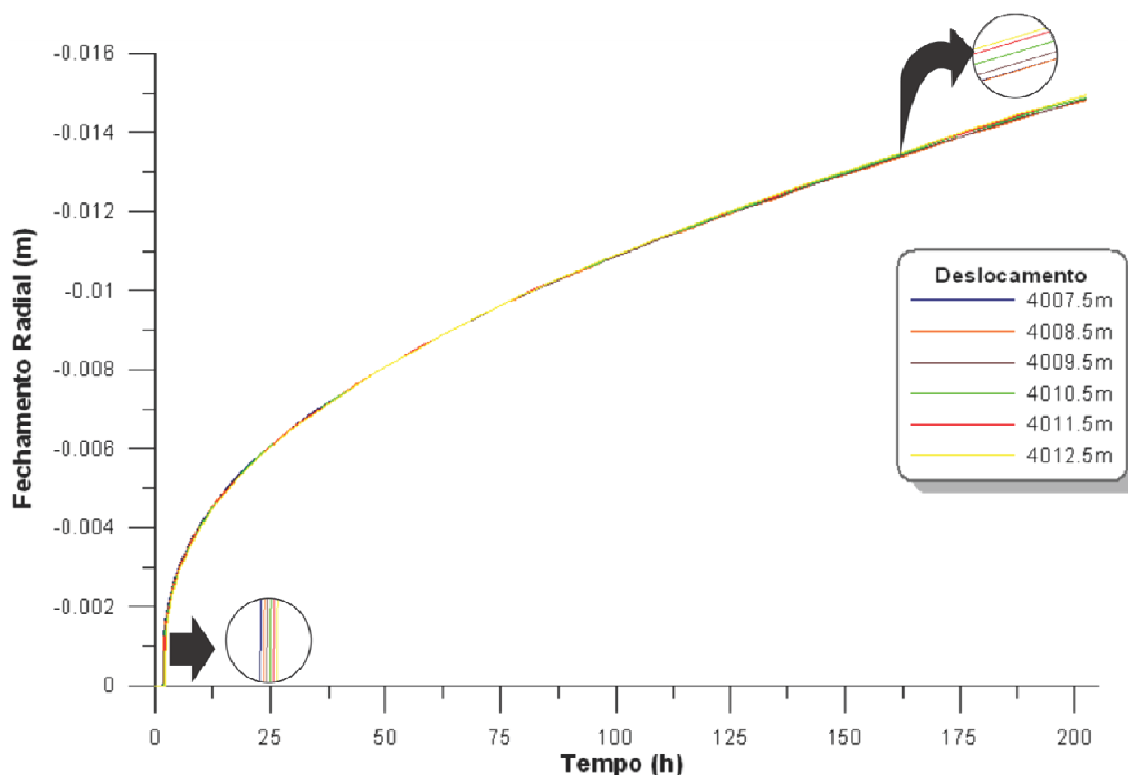


Figura 8: Curva de fechamento do poço para 6 diferentes profundidades

Observa-se que até 200 horas do início da escavação não houve deslocamentos suficientes para atingir o limite aceitável. Dessa forma é possível realizar a descida do revestimento sem quaisquer danos. No gráfico da [Figura 8](#) ainda é observado quase que uma sobreposição entre as curvas de fechamento. Isso se deve a pequena variação de profundidades, separadas a cada metro. Inicialmente, próximo do tempo zero, observa-se uma separação horizontal entre as curvas, o que corresponde aos diferentes níveis de escavação. Cada nível, ou profundidade, começando em um tempo diferente, à medida que o poço é perfurado. Após certo tempo do início da fluência é observado um aumento mais considerável para as regiões mais profundas. Isso se deve ao fato de que as tensões em profundidades mais elevadas são maiores que em profundidades menores.

Para a simulação de deformação plana, a uma profundidade de  $4020m$  abaixo do nível do mar, são mostrados os deslocamentos ao longo de 500 horas após a perfuração. A [Figura 9](#) mostra o resultado da simulação comparados com os resultados obtidos por [Costa et al. \(2005\)](#).

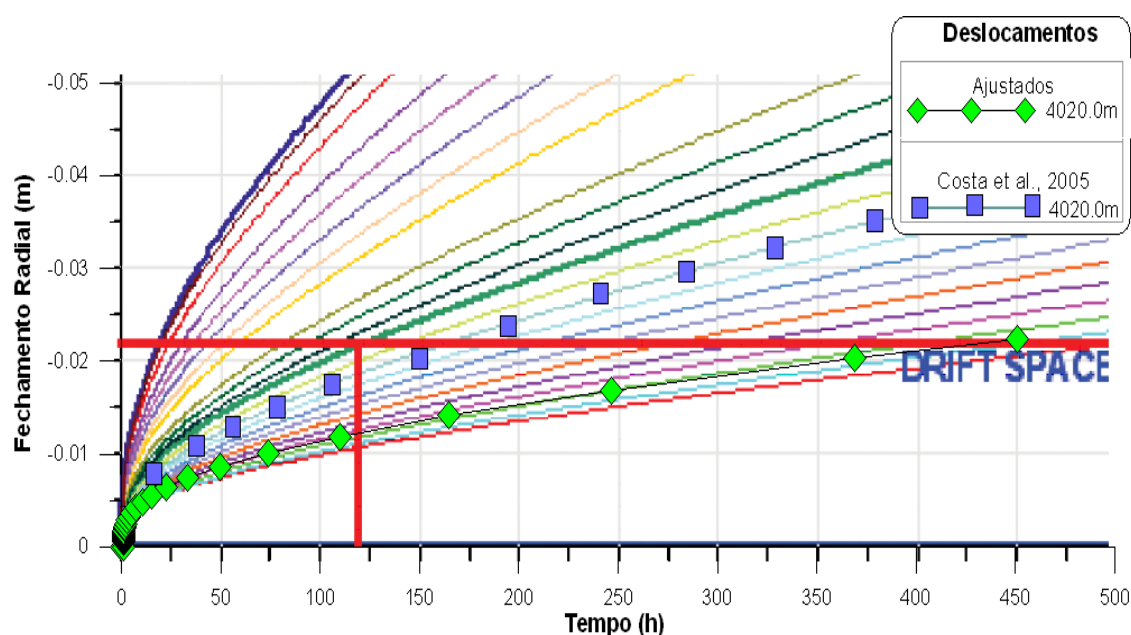


Figura 9: Curva de fechamento do poço para uma profundidade de 4020 abaixo do nível do mar.

Observa-se uma relação coerente entre a curva de fechamento para o caso analisado. Vale ressaltar que não houve uma reprodução fiel do modelo de Costa et al. (2005), isto deve-se as considerações adotadas para os diferentes modelos.

## 5 CONCLUSÕES

O estudo das equações de fluência possibilita a determinação do comportamento de Rochas Salinas quando submetido a tensões diferenciais. O comportamento de fluência dos evaporito ao longo do tempo, apesar de ter vários modelos constitutivos para sua representação, ainda não possui parâmetros suficientes para as equações apresentadas na literatura. A falta de parâmetros para os diferentes modelos dificulta o avanço dos estudos de perfurações destas rochas. Tentando minimizar o problema este trabalho ressalta o quanto é importante o uso de parâmetros significativos para a determinação da fluência em Rochas Salinas.

O modelo apresentado para fluência no Abaqus®, apesar de não ter como variável a temperatura, mostra ser um modelo de fluência que pode ser usado em Rochas Salinas. O fato, da taxa de deformação não ser função da temperatura e o gradiente geotérmico ser bem elevado em grandes profundidades, não apresentou no presente estudo grandes discrepâncias para as deformações obtidas. Ressaltando ainda que não foi investigado a influência da temperatura no meio.

A dificuldade de representação da fluência primária ou transiente faz parte da maioria dos modelos constitutivos. A maioria deles representa apenas uma das fases deste processo e quando se relaciona com duas ou com as três fases de fluência leva a discrepâncias altas. O modelo em questão demonstrou ser bem representativo quando associado com as duas fases iniciais da fluência. Isso permite uma diminuição do erro e uma representação mais fiel da fluência da halita com os parâmetros propostos.

A modelagem realizada no poço teve o objetivo de verificar o uso da função do Abaqus® em uma situação real. A utilização da função é bem simples devido à facilidade de entrada de dados pelo programa, não necessitando do uso de linguagens de programação, nem de métodos de integração para a solução de problemas.

**REFERÊNCIAS**

- Botelho, F.V.C., *Análise numérica do comportamento mecânico do sal em poços de petróleo*, Departamento de Engenharia Civil, Dissertação. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dissertação de mestrado 2008.
- Cella, P.R.C., *Desenvolvimento de execução de ensaios triaxiais de fluência estacionária em rochas salinas sob altas pressões e temperatura*. - Tese Apresentada À Escola Politécnica, Universidade De São Paulo, 2003.
- Costa, A., *Uma aplicação de métodos computacionais e princípios de mecânica das rochas no projeto e análise de escavações subterrâneas destinadas à mineração subterrânea*. - Tese De Doutorado, Coppe/Ufrj, 1984, 1984.
- Costa, A.M. et al., Triaxial creep test in salt applied in drilling through thick salt layers in campos basin – Brazil. *Paper Spe 92629, Presented At The Spe Drilling Conference, Amsterdam - The Netherlands, February 23-25., P.14-24, 2005.*
- Curtis, R. et al., *Association of dolomite and anhydrite in the recent sediments of the persian gulf*. Nature, 1963.
- Gravina, C.C., *Simulação numérica do comportamento mecânico do sal em poços de petróleo*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Dissertação, Universidade Estadual de Campinas. 1997.
- Hansen, F.D.; Mellegard, K.D., *Creep of 50-mm-diameter specimens of dome salt from Avery Island, Louisiana.*, ONWI-104 (office of Nuclear Waste Isolation, U.S. Department of Energy), August, 1989.
- Mackay, F. et al., *Analyzing geomechanical effects while drilling sub salt wells through numerical modeling*. In: 2008.
- Poiate Júnior, E.; Costa, A.M.; Falcão, J.L., *Well design thick evaporite layers in Santos basin – Brazil*. In: IADC/SPE Drilling Conference, Miami, Florida, Feb., 2006.
- Starfield, A.M.; McClain, W.C., *Project salt vault: a case study in rock mechanics\**. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, V. Vol. 10, 1973.
- Warren, J.. *Evaporite sedimentology*. Old Tappan, Nj (Usa); Prentice Hall Inc., 1989.