

# Simulação Numérica do Processo de Cimentação de Poços de Petróleo em Evaporitos

Ynaê Almeida Ferreira

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, ynaealmeida@gmail.com

Tarcísio Barreto Celestino

Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, tbcelest@usp.br

Ricardo Carrazedo

Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, carrazedo@sc.usp.br

**RESUMO:** Os hidrocarbonetos são encontrados sob alta pressão em rochas porosas, denominadas rochas reservatório. A camada pré-sal apresenta rochas reservatório cobertas por uma camada impermeável de sal de grande espessura. Ocorrências de estruturas salinas são favoráveis para o aprisionamento dos hidrocarbonetos e aumentam a probabilidade de sucesso na prospecção de óleo e gás, pois são excelentes rochas capeadoras, de porosidade e permeabilidade praticamente nulas. As rochas salinas apresentam deformação lenta e contínua quando submetidas a tensões constantes, fenômeno conhecido como fluência. Durante a perfuração de poços através de espessas camadas de sal podem ocorrer problemas operacionais, como o aprisionamento da coluna de perfuração e o colapso do poço. Ainda, a fluência pode levar ao colapso os revestimentos de um poço de petróleo revestido. Neste contexto, este trabalho consiste na análise numérica da escavação e cimentação de poços em rochas salinas para exploração de petróleo, com o estudo do comportamento geomecânico do sal utilizando o programa de elementos finitos Abaqus®. Após a instalação do revestimento e cimentação do poço que engloba tanto o processo de endurecimento do cimento, quanto a resposta de fluência da camada de sal, pôde-se analisar os deslocamentos na fronteira sal-cimento, de forma a evitar possíveis intervenções em poços que acarretam perdas econômicas. Sendo assim, este estudo auxilia no monitoramento e controle do fechamento de poços de petróleo em evaporito, após a escavação e cimentação do poço, evitando os diversos problemas decorrentes do comportamento de fluência do sal.

**PALAVRAS-CHAVE:** Poços de Petróleo, Rochas Salinas, Fluência, Revestimento, Cimentação, Método dos Elementos Finitos.

## 1 INTRODUÇÃO

Uma acumulação de petróleo em uma bacia sedimentar requer a associação de uma série de fatores. Entre eles, cita-se a presença de uma rocha geradora e condições temporais adequadas, além da existência da rocha reservatório com porosidade e permeabilidade necessária à acumulação e produção do petróleo. Ainda, é necessária a presença de condições favoráveis à migração do petróleo da rocha geradora até a rocha reservatório, bem como a existência de uma rocha impermeável

que retenha o fluxo do petróleo. A esta rocha impermeável, denomina-se rocha selante ou capeadora (Thomas *et al.*, 2004).

Os evaporitos solúveis são praticamente impermeáveis, sendo uma característica importante para a indústria do petróleo na medida em que o sal ajuda a criar estruturas selantes de hidrocarbonetos, propiciando o seu acúmulo.

O sal é um material geológico não usual que ao ser submetido a tensões constantes, apresenta deformações significativas em função do tempo, das condições de carregamento e das

propriedades físicas. Ou seja, o sal apresenta comportamento de fluência pronunciada, sendo esta a principal diferença das demais rochas sedimentares (Poiate Jr. *et al.*, 2006).

A descoberta de reservas de petróleo em campos cada vez mais profundos, seguido dos problemas decorrentes dos complexos cenários em que são encontrados, torna a sua extração um desafio e criam oportunidades de evolução na indústria do petróleo. Segundo Farmer *et al.* (1996), as etapas da seleção de fluidos de perfuração até a implementação de programas de revestimento e cimentação, são necessárias para produzir poços de longa duração.

O principal objetivo da perfuração é atingir os reservatórios de interesse, com o mínimo de comprometimento de suas propriedades permoporosas, de forma a construir um conduto cilíndrico que possibilite a execução da sequência operacional prevista até a conclusão do poço, para a extração de petróleo e gás.

A execução do revestimento e cimentação do poço de petróleo são etapas importantes que sucedem a perfuração. Após a instalação do revestimento, o espaço anular entre a coluna de revestimento e as paredes do poço é preenchido com cimento, de forma a manter o isolamento e a integridade do poço. Essas etapas devem ser executadas para garantir a segurança durante a produção do petróleo, com uma boa interação entre o revestimento, cimento e formação rochosa do poço. Assim, o poço poderá produzir sem riscos na profundidade desejada.

A cimentação no espaço anular é realizada mediante bombeio de pasta de cimento, que é deslocada através da própria tubulação de revestimento. Após o endurecimento da pasta, o cimento deve ficar fortemente aderido à superfície externa do revestimento e à parede do poço, nos intervalos previamente definidos (Thomas *et al.*, 2004).

Para atingir o objetivo da cimentação em poços de petróleo, um vedante hidráulico deve ser obtido entre o revestimento e o cimento, e entre o cimento e às formações, enquanto que, ao mesmo tempo, evita os canais de fluido na bainha de cimento, como mostrado na Figura 1 (Nelson, 1990). Este requisito torna a operação de cimentação a mais importante realizada em um poço.

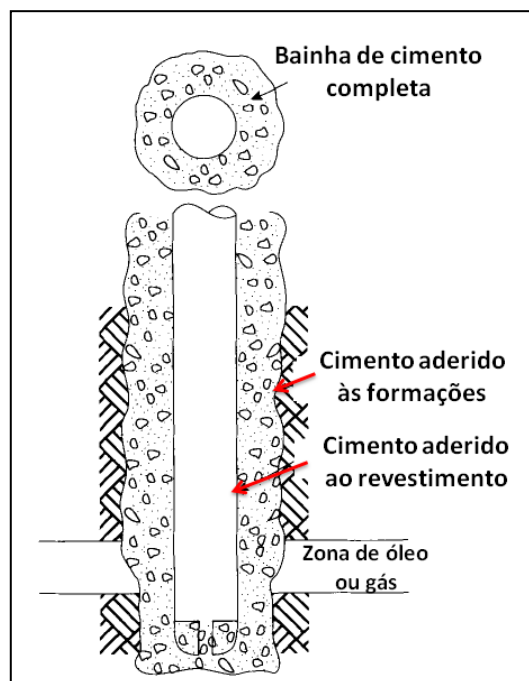


Figura 1. Cimentação em poços de petróleo.  
Fonte: Modificado de Nelson (1990).

## 2 MODELAGEM NUMÉRICA DO PROCESSO DE CIMENTAÇÃO DO POÇO

A modelagem numérica da perfuração do poço de petróleo em evaporito, com a posterior instalação do revestimento e cimentação do poço foi realizada levando em consideração o modelo plano de deformação, situado em uma região com as características da estratigrafia típica da Bacia de Santos (Brasil). Para a modelagem foram utilizados elementos do tipo CPE3, na região do poço a ser escavada e elementos do tipo CPE4, no restante da malha, sendo o modelo composto por 6700 nós e 6622 elementos.

O modelo simulado refere-se ao poço de petróleo situado em uma camada de sal, na profundidade de estudo de 6000m abaixo do nível do mar. O modelo plano de deformação consiste num domínio 3,10m x 3,10m, com diâmetro do poço de 0,31m. A tensão de sobrecarga dada pela soma das tensões nas três regiões, lâmina de água, maciço rochoso localizado acima do estrato de sal e camada de sal, tem um valor de 107,6MPa. A relação entre a tensão horizontal e vertical é assumida igual à unidade para uma determinada profundidade ( $K_0 = 1$ ). No plano horizontal também ocorre a

isotropia de tensões e, desta forma, para a profundidade de 6000m abaixo do nível do mar  $\sigma_1 = \sigma_2 = 107,6\text{MPa}$ .

A Figura 2 apresenta a geometria utilizada, em que se observam os três materiais envolvidos na análise: revestimento (marrom), cimento (cinza) e sal, com suas respectivas dimensões. Ainda se pode observar as condições de contorno do modelo, em que estão presentes apoios do primeiro gênero na parte inferior e lateral esquerda, de modo a impedir os deslocamentos normais ao contorno do modelo. Na superfície superior do modelo e na lateral direita podem ser observadas as tensões geostáticas atuantes.

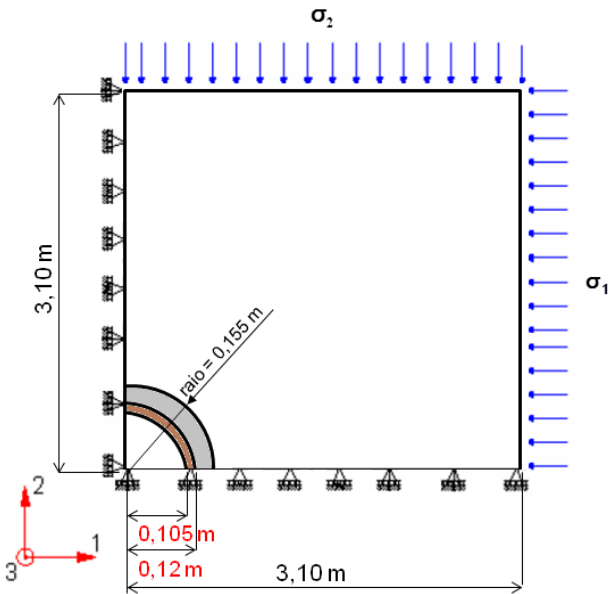


Figura 2. Representação da geometria com revestimento e cimento, com as condições de contorno, sem escala.  
Fonte: Modificado de Botelho (2008).

Os parâmetros elásticos e as constantes empíricas de fluência do sal estão apresentados na Tabela 1. O comportamento de fluência do sal foi simulado utilizando o *power-law model* do Abaqus®, na versão time-hardening.

| Parâmetros elásticos               | Constantes empíricas de fluência |
|------------------------------------|----------------------------------|
| $E = 2,04 \text{ E } 07\text{kPa}$ | $A = 2,4 \text{ E } -17$         |
| $\nu = 0,36$                       | $n = 3,0$                        |
| -                                  | $m = -0,7$                       |

Fonte: Modificado de Botelho (2008).

A modelagem do revestimento foi realizada como um material elasto-plástico e os parâmetros utilizados foram baseados nos valores apresentados por Bourgoyne Jr. *et al.* (1986). Foi considerado um revestimento do tipo API Grade C-75, com resistência de escoamento mínimo de 517,1MPa (75000psi), com diâmetro externo de 0,24m (aproximadamente 9 5/8") e diâmetro interno de 0,21m (aproximadamente 8,535"). Os parâmetros elasto-plásticos do revestimento são apresentados na Tabela 2.

| Tabela 2. Parâmetros elasto-plásticos do revestimento. |          |
|--------------------------------------------------------|----------|
| E (kPa)                                                | 2,0 E 08 |
| $\nu$                                                  | 0,30     |
| Tensão de escoamento (kPa)                             | 5,2 E 05 |

Fonte: Modificado de Mackay (2011).

Após a instalação do revestimento, o espaço anular entre a coluna de revestimento e as paredes do poço é preenchido com cimento. As propriedades elásticas do cimento variam significativamente durante o período de endurecimento. O coeficiente de Poisson é adotado como sendo constante e, com isso, o valor do módulo de elasticidade final é obtido após um período de 11 dias. Os dados das propriedades elásticas do cimento foram baseados nos apresentados por Mackay (2011) e são modelados de forma a representar o ganho de rigidez ao longo do tempo (Tabela 3).

| Intervalo de Tempo (dias) | Módulo de Elasticidade (MPa) | Coefficiente de Poisson |
|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 0 - 0,6                   | 1,5 E 03                     | 0,286                   |
| 0,6 - 1,0                 | 2,9 E 03                     | 0,286                   |
| 1,0 - 2,0                 | 4,5 E 03                     | 0,286                   |
| 2,0 - 3,0                 | 6 E 03                       | 0,286                   |
| 3,0 - 4,0                 | 7,2 E 03                     | 0,286                   |
| 4,0 - 5,0                 | 8,2 E 03                     | 0,286                   |
| 5,0 - 6,0                 | 9,03 E 03                    | 0,286                   |
| 6,0 - 7,0                 | 9,7 E 03                     | 0,286                   |
| 7,0 - 9,0                 | 1,08 E 04                    | 0,286                   |
| 9,0 - 11,0                | 1,1 E 04                     | 0,286                   |
| > 11                      | 1,4 E 04                     | 0,286                   |

Fonte: Mackay (2011).

As análises são realizadas para um fluido de perfuração com pressão de 63,9MPa, simulado

como não penetrante. A pressão do fluido de cimento é calculada em função do valor encontrado na literatura (Gray *et al.*, 2007), 15,8ppg (16173,2psi), que equivale a 111,5MPa ( $P_w$ ) para a profundidade de estudo de 6000m (19685ft).

### 3 PROCESSO DO ENDURECIMENTO DO CIMENTO

Inicialmente são realizadas etapas de perfuração do poço, que é iniciada com o uso da função geostática do Abaqus®, com o carregamento das tensões no modelo. Na segunda etapa, a qual corresponde à escavação do poço, foi simulada a resposta elástica devida à desativação da malha do poço e à introdução das tensões provocadas pelo fluido de perfuração na parede do poço. A fluência do sal antes da descida do revestimento foi simulada para um tempo de 30 dias, tempo máximo que antecede a descida do revestimento. Então o revestimento é instalado e inicia a aplicação da pressão do cimento em estado líquido.

Após estas etapas, é dado início ao processo de endurecimento do cimento, com consequente ganho de rigidez. A malha do cimento é ativada e inserida com estado de tensão inicial do cimento correspondente a 111,5MPa.

O enrijecimento do cimento ocorre em um período de tempo, conforme mostrado na Tabela 3. Para cada período de tempo necessário para o ganho de rigidez do cimento, ocorre a fluência do sal. Assim, tem-se a divisão deste processo de endurecimento em 10 pares de etapas. Cada par corresponde ao ganho de rigidez, com a resposta elástica e fluência do sal. Na última etapa, o cimento atinge seu valor final de rigidez. A pressão do fluido de perfuração é continuamente aplicada na parte interna do revestimento durante todo esse processo (Figura 3).

Os parâmetros elásticos do cimento variam a cada passo da simulação, após o cimento ser adicionado ao restante da malha. A análise foi realizada de forma que as tensões e as deformações decorrentes de cada par no processo de endurecimento do cimento (resposta elástica e fluência do sal) fossem as iniciais do próximo par de etapas. O

deslocamento decorrente do ganho de rigidez do cimento se dá devido à diferença de tensão entre as tensões provocadas pelo cimento nessa região e pela pressão constante do fluido de perfuração aplicado na parte interna do revestimento.

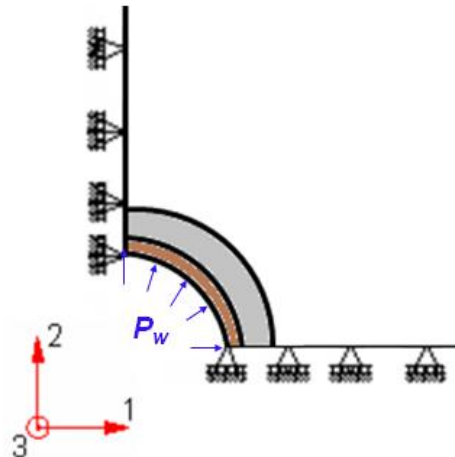


Figura 3. Ativação da malha de cimento, com a continuidade da aplicação da pressão do fluido de perfuração ( $P_w$ ) na parte interna do revestimento, sem escala.

Quando, numa estrutura, a tensão e o módulo de elasticidade variam com o tempo, o acréscimo de deformação em um determinado instante é relacionado ao acréscimo de tensão no mesmo instante e à matriz de elasticidade calculada com parâmetros válidos também para o mesmo instante  $t$ :

$$\{d\sigma\} = [D(t)](d\varepsilon) \quad (1)$$

Tomando-se por simplicidade o caso unidimensional, ou seja, de uma barra cujo módulo de elasticidade varia com o tempo, sujeita a uma tensão também variável com o tempo, a Equação 1 pode ser escrita como:

$$d\varepsilon = \frac{1}{E(t)} d\sigma \quad (2)$$

As funções  $\sigma(t)$  e  $E(t)$  podem ter comportamentos como os mostrados na Figura 4 e Figura 5, respectivamente.

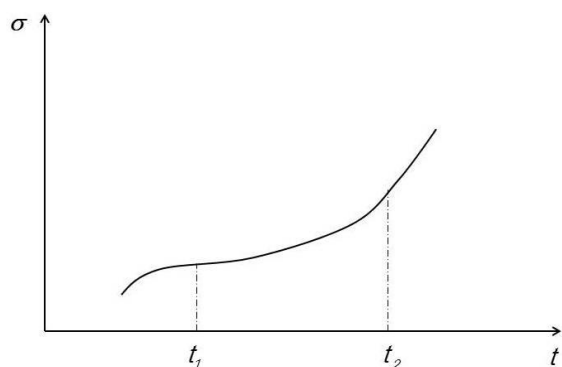


Figura 4. Variação da tensão com o tempo.

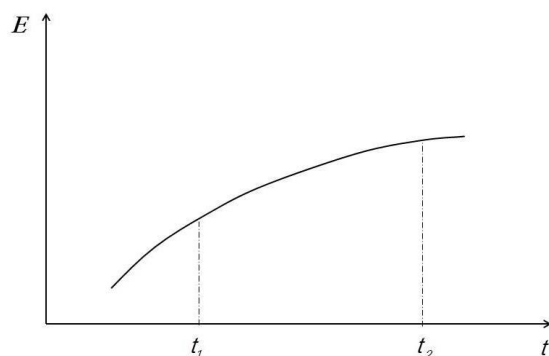


Figura 5. Variação do módulo de elasticidade com o tempo.

A deformação  $\varepsilon_{t_1, t_2}$  acumulada no intervalo de tempo entre  $t_1$  e  $t_2$  pode ser obtida por:

$$\varepsilon_{t_1, t_2} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{E(t)} \cdot \frac{d\sigma(t)}{dt} dt \quad (3)$$

Das Equações 2 e 3, constata-se que não haverá acréscimo de deformação quando não houver acréscimo de tensão, mesmo que o módulo de elasticidade varie.

Quando o procedimento é discretizado em fases distintas de cálculo, as tensões iniciais na fase  $i$  são as tensões calculadas na fase anterior  $i-1$  (Celestino *et al.*, 1974).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA CIMENTAÇÃO DO POÇO DE PETRÓLEO EM EVAPORITO

As análises dos deslocamentos radiais são realizadas após a etapa de fluência decorrente da perfuração do poço e após a instalação do

revestimento com o processo de endurecimento do cimento. Os resultados para estas análises são obtidos em um nó (nó 3) na parede do poço, na direção do eixo 1 (Figura 6).

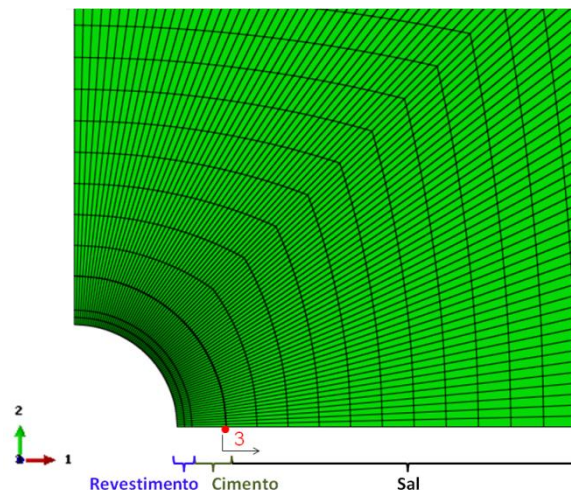


Figura 6 - Representação do nó de análise na parede do poço.

Os deslocamentos radiais quando utilizado o peso do fluido de perfuração de 9 ppg (63,9MPa) em um período de fluência de 30 dias após a escavação do poço, estão representados na Figura 7. Percebe-se que após um período de um mês de fluência com a utilização de um fluido de perfuração com peso de 9ppg, ocorreu um fechamento no poço de 2,28cm.

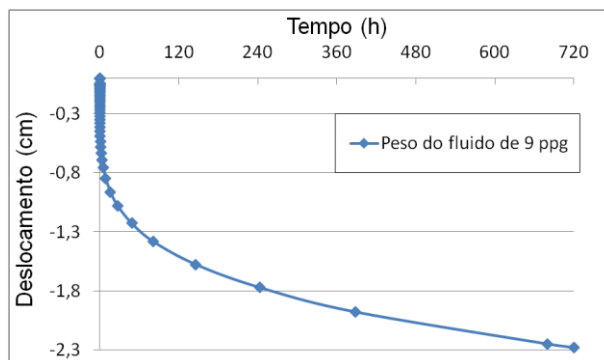


Figura 7. Deslocamento radial na parede do poço em um período de um mês de fluência após a escavação, para um fluido de perfuração com peso de 9 ppg.

Após a instalação do revestimento e aplicação do cimento no estado líquido, deu-se início ao processo de endurecimento do cimento. Antes, porém, fez-se a verificação do comportamento do estrato salino aplicando-se

diferentes condições de rigidez do cimento: nula, infinita e intermediária.

A Figura 8 apresenta três curvas para a análise do comportamento do poço quando utilizado cimento no estado líquido ( $P_{wc} = 111,5 \text{ MPa}$ ), cimento com rigidez infinita ( $E = 1,5 \text{ E } 08 \text{ MPa}$ ) e com um valor de rigidez intermediário ( $E = 1,5 \text{ E } 03 \text{ MPa}$ ).

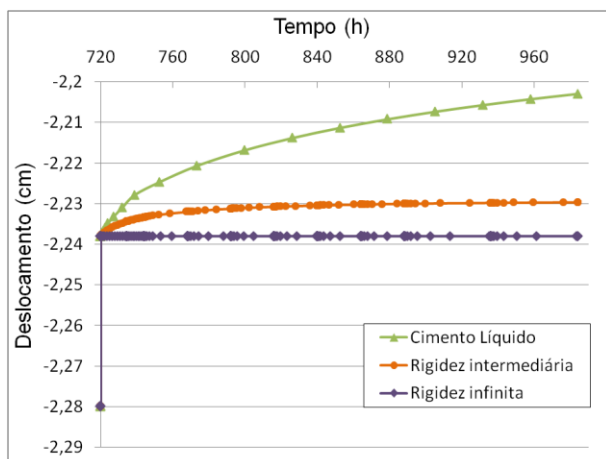


Figura 8. Deslocamento radial na parede do poço em um período de 11 dias com o cimento líquido, cimento de rigidez infinita e rigidez intermediária, para um fluido de perfuração com peso de 9 ppg.

O gráfico da Figura 8 mostra o deslocamento radial na parede do poço após a perfuração, fluência do sal e endurecimento do cimento em um período de 11 dias nos casos de rigidez infinita e intermediária. Na aplicação do cimento em estado líquido, o mesmo foi aplicado na parte externa do revestimento e na parede do poço. Nos três casos, na parte interna do revestimento, o fluido de perfuração é continuamente aplicado.

O eixo das abscissas da Figura 8 representa o tempo após a fluência do sal decorrente da escavação do poço até os 11 dias de análise da aplicação e endurecimento do cimento. O deslocamento decorrente da fluência do sal após 30 dias depois de escavado o poço foi de 2,28cm no sentido do fechamento do mesmo. Com a aplicação da pressão do fluido de cimento na parte externa do revestimento e na parede do poço, o deslocamento na parede do poço passou a ser de 2,24cm. Ao utilizar um material com rigidez infinita preenchendo o espaço anular entre a coluna de revestimento e as paredes do poço, percebe-se que as paredes do poço não mais se deslocam, enquanto que no

caso da aplicação contínua da pressão do fluido de cimento esse deslocamento é máximo para aquele tempo de análise, sendo de 2,20cm após 11 dias. A curva com rigidez intermediária provoca um deslocamento na parede do poço entre os dois valores obtidos quando se utiliza a análise com rigidez máxima e nula.

O aumento progressivo da rigidez do cimento durante esse processo ocorre no decorrer das 21 etapas da simulação, desde a ativação da malha do cimento, e são intercaladas em uma simulação elástica e outra simulação de fluência do sal. O endurecimento do cimento ocorre em um período de tempo, conforme mostrado na Tabela 3. O valor final de rigidez do cimento é atingido na última etapa.

Ao observar os deslocamentos em um nó da fronteira cimento-sal (nó 3 - Figura 6) por meio do gráfico em vermelho apresentado na Figura 9, percebe-se que com o aumento do módulo de elasticidade o cimento apresenta uma maior rigidez e, com isso faz com que ocorra uma diminuição na evolução dos deslocamentos na parede do poço no sentido do fechamento do mesmo. Ao comparar essa curva ao gráfico em verde, em que foi utilizado ao longo dos 11 dias de análise cimento líquido na parte externa do revestimento e na parede do poço, percebe-se que com a evolução da rigidez do cimento esse deslocamento é inferior ao aplicar apenas o cimento em sua fase líquida. Tal fato está condizente ao explicado anteriormente na Figura 8.

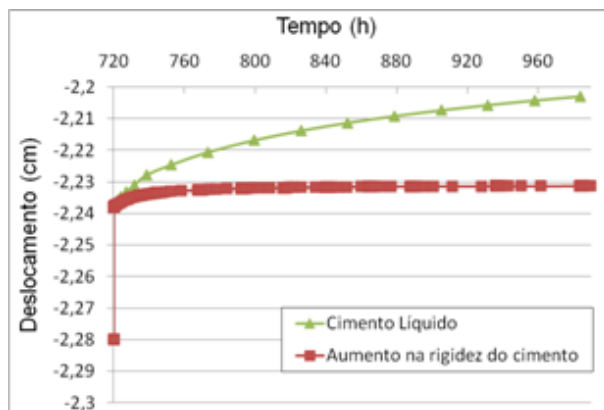


Figura 9 - Deslocamento radial na parede do poço em um período de 11 dias de endurecimento do cimento com aumento da rigidez no tempo, seguindo a Tabela 3. Análise da aplicação do cimento na fase líquida.

Analisando o gráfico da Figura 9 em que é simulado um aumento na rigidez do cimento, percebe-se que o deslocamento na parede do poço decorrente da fluência do sal após a escavação que foi de 2,28cm no sentido do fechamento do poço, passa a ter um valor de 2,23cm após o ganho total de rigidez do cimento. Ou seja, com a utilização do revestimento e sua posterior cimentação, pode-se conter o deslocamento por fluência do sal, evitando a continuidade do fechamento do poço.

A Figura 10 apresenta os deslocamentos no sentido do eixo 1, por meio de uma escala de cores no Abaqus®, para o modelo plano de deformação com peso do fluido de perfuração de 9ppg, em um período de um mês de fluência após a escavação do poço.

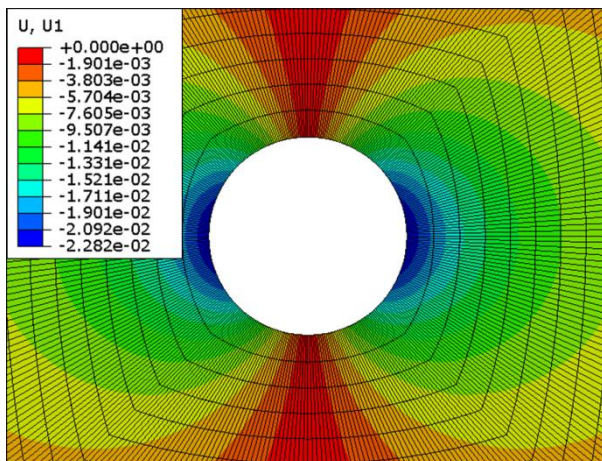


Figura 10 - Deslocamento em metros no sentido do eixo 1 em um período de um mês de fluência após a escavação.

A Figura 11 apresenta os deslocamentos após a instalação do revestimento e aplicação do fluido de cimento em estado líquido. Os deslocamentos decorrentes do processo de endurecimento do cimento estão representados na Figura 12.

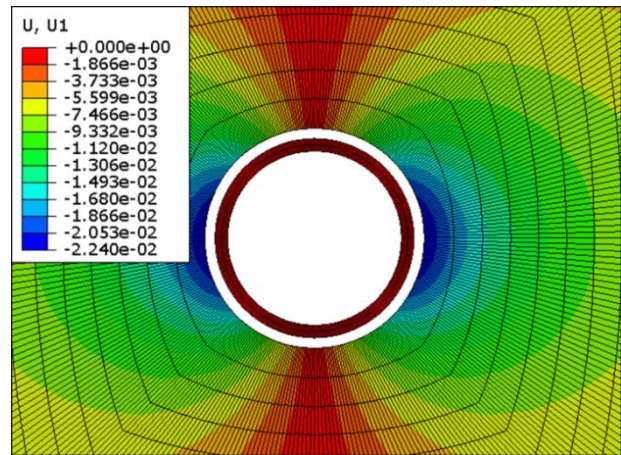


Figura 11 - Deslocamento em metros no sentido do eixo 1 após a instalação do revestimento e aplicação do cimento em estado líquido.

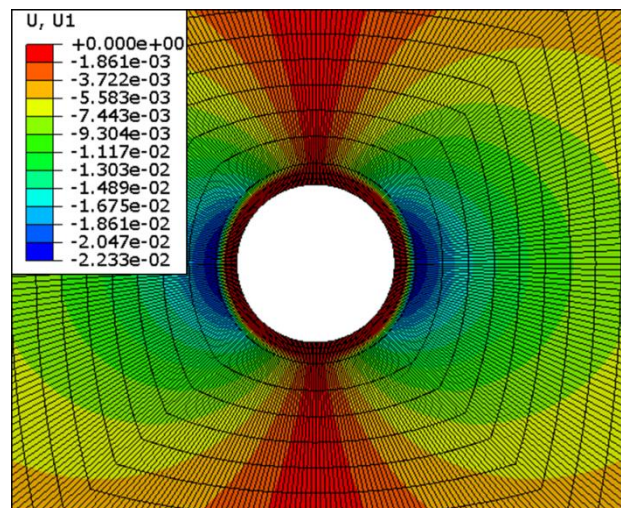


Figura 12 - Deslocamento em metros no sentido do eixo 1 após o processo de endurecimento do cimento.

## 5 CONCLUSÕES

As modelagens computacionais das etapas de perfuração, revestimento e cimentação de um poço de petróleo em zona salina foram realizadas com o programa comercial de elementos finitos Abaqus® e possibilitaram os estudos sobre o comportamento de fluência do sal e o processo de endurecimento do cimento.

Posteriormente a escavação do poço e um período de fluência de trinta dias que antecederam a descida do revestimento, o mesmo foi instalado e o espaço anular entre o revestimento e as paredes do poço foi preenchido com cimento. Inicialmente, o cimento foi inserido no estado líquido e durante seu processo de endurecimento adquiriu o valor

da sua rigidez final após um período de onze dias. A modelagem numérica da perfuração do poço de petróleo em evaporito, com a realização das etapas de revestimento e cimentação, foi realizada levando em consideração o modelo plano de deformação. As análises das etapas de revestimento e cimentação do poço englobaram tanto o processo de endurecimento do cimento quanto a resposta de fluência do sal. No processo de endurecimento do cimento os parâmetros elásticos variaram a cada passo da simulação.

Antes da simulação com o ganho de rigidez do cimento no tempo foi verificado o comportamento na parede do poço ao aplicar diferentes condições de rigidez para o cimento (infinita, nula e intermediária). Esses valores foram mantidos constantes durante os onze dias desde a sua aplicação. Para a condição do cimento com rigidez intermediária o deslocamento na parede do poço foi um valor entre os obtidos quando realizadas as análises com rigidez nula e infinita. Assim, o deslocamento na parede do poço quando o cimento adquiriu maior rigidez ao longo do tempo foi inferior ao deslocamento causado pela aplicação do cimento em sua fase líquida (rigidez nula).

O ganho de rigidez do cimento aconteceu no decorrer das 21 etapas da simulação, desde a ativação da malha do cimento, sendo intercaladas em uma simulação elástica e outra simulação de fluência do sal. Ainda, foi aplicado o fluido de perfuração na parte interna do revestimento que atuou durante todo o processo de endurecimento do cimento. Foram realizadas análises dos deslocamentos na parede do poço após o endurecimento do cimento.

Após o cimento adquirir seu valor final de rigidez, percebeu-se que foi possível conter o deslocamento por fluência do sal, evitando a continuidade do fechamento do poço e garantindo a sua integridade.

Com todas as análises discutidas, conclui-se a importância da consideração da fluência nos primeiros instantes após a escavação do poço. Os valores de deslocamentos dependem intrinsecamente da lei de fluência e dos parâmetros adotados na modelagem numérica. Uma vez alterados estes parâmetros, ocasionam diferentes deslocamentos. Assim, os parâmetros

elásticos e as constantes empíricas de fluência devem ser bem definidos para que se tenha a simulação o mais próximo possível da realidade. Com a execução das etapas de revestimento e cimentação do poço, pôde-se observar a sua importância para conservar a segurança do poço durante a perfuração e posterior produção.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Botelho, F.V.C. (2008). *Análise Numérica do Comportamento Mecânico do Sal em Poços de Petróleo*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, PUC-RJ, 211 p.
- Bourgoyne Jr., A.T., Chenevert, M.; Millheim, K.K.; Young Jr., F.S. (1986) Casing Design, *Applied Drilling Engineering*, SPE, ed. J. Evers and D. Pye, p. 300 - 350.
- Celestino, T.B.; Tagliatella, E.P.; Custódio, P.S.D. (1974) O método dos elementos finitos aplicado a escavações profundas em rochas. *Anais 10. Seminário Brasileiro do Método dos Elementos Finitos Aplicado à Mecânica dos Solos*, COPPE-UFRJ, p. 229-245.
- Farmer, P. et al. (1996) Exploring the subsalt, *Oilfield Review*, Vol.8, No.1, p. 50-64.
- Gray., K.E., Podnos, E., Becker, E. (2007) *Finite Element Studies of Near-Wellbore Region during Cementing Operations: Part I*. Paper SPE 106998, presented at the 2007 SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma, U.S.S.
- Mackay, F. (2011). *Análise Geomecânica na Perfuração e Cimentação de Poços de Petróleo em Zonas de Sal*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-RJ, 168 p.
- Nelson, E.B. (1990). *Well Cementing*, 2ª ed., Schlumberger Educational Services. Sugar Land, Texas.
- Poiate Jr., E., Costa, A.M., Falcão, J.L. (2006) *Well Design for Drilling Through Thick Evaporite Layers in Santos Basin – Brazil*, paper SPE 99161, presented at the SPE Annual Drilling Conference, Miami, USA.
- Thomas, J.E. et al. (2004) *Fundamentos de engenharia de petróleo*, 2ª ed., Interciência: PETROBRAS, Rio de Janeiro.