



MODELAGEM NUMÉRICA DE POÇOS DE PETRÓLEO EM ZONA DE SAL COM AVALIAÇÃO DE EFEITOS TÉRMICOS NA FLUÊNCIA

Marcelo De Simone

Nuno Bandarrinha Brandão

Deane Roehl

msampaio@tecgraf.puc-rio.br

nuno@tecgraf.puc-rio.br

deane@tecgraf.puc-rio.br

Instituto Tecgraf, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, 3527-1188, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Resumo. *O presente trabalho apresenta uma modelagem em elementos finitos das etapas de construção de um poço em zona de sal, considerando o efeito da temperatura na taxa de deformação do sal. Estes efeitos podem ser críticos e determinantes no projeto de revestimentos. Foram considerados dois tipos de rochas salinas presentes no pré-sal brasileiro, a carnalita e a halita. Visto que a carnalita é uma rocha de características mecânicas inferiores à halita, revelou-se o caso crítico. Por meio de um estudo de caso foram investigadas as tensões no revestimento, no cimento e na rocha salina na região próxima ao poço durante sua vida útil de 30 anos. Para entender o efeito da temperatura no mecanismo de fluência do sal, foram realizadas três análises para cada rocha salina. Na primeira análise considerou-se a temperatura da fase de construção, enquanto na segunda a de produção. Na terceira análise, a mudança da temperatura da fase de construção até à produção foi adotada. O processo de modelagem das etapas de construção do poço mostrou-se adequado à representação dos efeitos de mudanças geométricas induzidas pela perfuração da rocha, em especial no caso da carnalita. Como resultado da análise de estabilidade, face à fluência constatou-se que as deformações do sal excederam os valores limites. Após a instalação do revestimento e cimentação do poço, as tensões desenvolvidas durante a vida útil não atingiram os limites de integridade dos materiais.*

Palavras-chave: *Modelagem de poço, Rocha salina, Temperatura, Fluência*

1 INTRODUÇÃO

Na área de construção de poços de petróleo é importante a busca por aprimoramento das técnicas de construção com pesquisas voltadas para essa área. A perfuração de poços em maiores profundidades e em áreas de maiores desafios construtivos tem maior risco de acidentes. Exemplos como os enunciados em Henderson e Hainsworth (2014) e Bougoyne, Scott e Manowski (1999), Heathman e Beck (2006) mostram vários exemplos de ruína de poços com consequências ambientais e financeiras catastróficas. Estudos como o de Mackay e Fontoura (2014) que analisam o comportamento de um poço durante sua construção e de Gray *et al.* (2007) que realiza uma análise tanto na fase de construção como na de produção, aumentam confiabilidade durante a vida útil do poço e diminuem o risco de insucessos operacionais e ambientais.

No caso do pré-sal um dos aspectos críticos é a fluência do sal. Autores como Costa *et al.* (2005), Firme *et al.* (2014) e Poiate Jr. (2012) têm vindo a estudar esse efeito em poços de petróleo. Ao atravessar camadas de sal durante a perfuração, leva-se em conta esse efeito para garantir a estabilidade do poço e determinar os pesos de lama adequados. A depender do tipo de evaporito, a taxa de deformação por fluência pode ser crítica para o projeto do poço (Poiate Jr., 2012 e Costa *et al.*, 2005). Entre os evaporitos presentes no pré-sal brasileiro, a halita é predominante. Contudo, é usual a presença de rochas salinas com pior comportamento mecânico que a halita, como por exemplo, a carnalita, que representam o cenário mais crítico do dimensionamento. A descrição do comportamento destas rochas incorporando os efeitos da temperatura demanda o emprego de modelos constitutivos que representem a fluência do sal durante a vida útil do poço (Firme *et al.* 2014).

O presente trabalho apresenta os primeiros resultados de um estudo de avaliação dos efeitos da fluência do sal sobre o cimento e sobre o revestimento de poços. A metodologia empregada se baseia em modelos numéricos em elementos finitos utilizando o programa comercial ABAQUS. Para considerar a fluência no sal, foi utilizada uma rotina desenvolvida por Firme (2013) que utiliza o modelo de fluência de duplo mecanismo (Costa *et al.*, 2005). Foram modeladas diversas etapas da construção do poço, como a perfuração, instalação do revestimento, aplicação do cimento, e também a fase de produção do hidrocarboneto. Considera-se a variação da temperatura no modelo constitutivo do sal. A forma de modelagem utilizada neste trabalho busca obter uma melhor descrição dos estados de tensão e deformação no poço, permitindo avaliar a integridade e estabilidade do sistema.

2 MATERIAIS

2.1 Aço

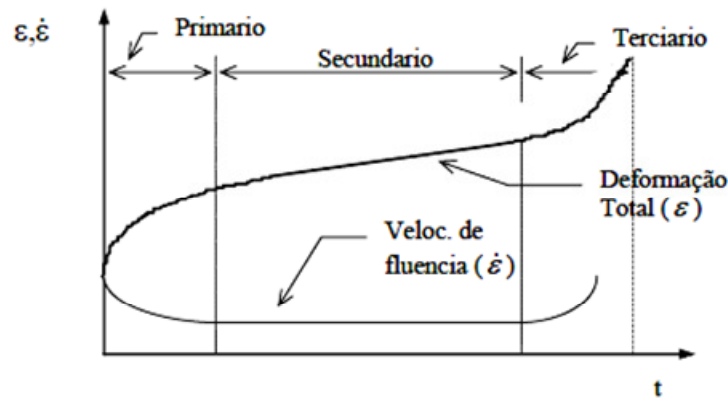
Para o aço do revestimento utilizam-se os dados fornecidos por Mackay e Fontoura (2014). O autor simula o material como elástico perfeitamente plástico com o critério de von Mises. O modelo constitutivo apresenta uma lei de fluxo associado à lei de escoamento. Os parâmetros elástico-plásticos para a definição do modelo do material são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros elasto-plásticos para a simulação do revestimento metálico

Modulo de elasticidade (MPa)	2.0E+5
Coeficiente de Poisson	0.30
Tensão de escoamento (MPa)	517,11

2.2 Sal

Poiate Jr (2012) caracteriza a rocha salina como uma rocha sedimentar de alta solubilidade, ativação geoquímica com um comportamento contínuo de fluência. Esta fluência é caracterizada por deformações plásticas irreversíveis que podem ser divididas em três estágios, conforme apresenta a Fig. 1. O primeiro estágio (fluência primária ou transiente) é caracterizado pela desaceleração da deformação até atingir uma taxa de deformação constante. A fase em que a taxa de deformação é constante, chamada de fluência secundária ou estacionária, é a fase dominante do regime. Por fim, a fluência terciária, é caracterizada por um aumento de taxa de deformação e consequente ruptura.

**Figura 1. Estágios da fluência**

Firme *et al.* (2014) apresenta três diferentes modelos constitutivos para simular a fluência na rocha salina: a lei de potência, duplo mecanismo e multi mecanismo. Os autores concluem que, embora o modelo de multi mecanismo seja o mais concordante com os valores experimentais, o modelo de duplo mecanismo apresenta bons resultados para a fase secundária e a lei de potência apresenta bons resultados para a fase primária.

Para a caracterização da fluência na halita brasileira, Costa *et al.* (2005) chegam à conclusão que a lei de duplo mecanismo é uma lei apropriada para a fase estacionária. A taxa de deformação é caracterizada pela Eq. (1).

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \exp\left(\frac{Q}{RT_0} - \frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0}\right)^n \quad (1)$$

Os parâmetros, definidos com base em resultados experimentais, adotados para a lei de duplo mecanismo para a halita e carnalita brasileira estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros da lei de duplo mecanismo adotados para a halita/carnalita brasileira

Modelo de duplo mecanismo – Parâmetros adotados para a halita/carnalita brasileira e parâmetros elásticos		
E (MPa)	Modulo de Elasticidade	2,04 (10 ⁴) / 4,02 (10 ³)
ν	Coefficiente de Poisson	0,36
Q (kcal/mol)	Energia de ativação de ambos os mecanismos	12,0
R (kcal/mol.K)	Constante universal dos gases	1,9858 (10 ⁻³)
σ_0 (kPa)	Tensão de mudança de mecanismo	9910,0 / 5710,0
$\dot{\epsilon}_0$ (h ⁻¹)	Taxa de deformação de mudança de mecanismo	1,88(10 ⁻⁶) / 1,55(10 ⁻⁴)
T_0 (°C)	Temperatura de mudança de mecanismo	86,0 / 130,0
n_1	Expoente de tensão para o deslizamento de discordâncias	3,36 / 2,87
n_2	Expoente de tensão para a solubilização por pressão	7,55 / 7,17

Fonte: Poiate Jr. (2012)

Além da fluência do sal, será também avaliada a dilatância da halita, de modo a acompanhar as deformações volumétricas na halita, que podem ocasionar pequenas fraturas no sal.

2.3 Cimento

Neste trabalho, ao cimento atribui-se um comportamento elasto-plástico seguindo o critério de Mohr Coulomb, regido pela Eq. (2). O potencial plástico é associado ao critério de escoamento. Este modelo constitutivo leva em conta a fraca resistência à tração do cimento e o aumento da resistência quando o material é submetido a uma tensão hidrostática.

$$\tau = \sigma \tan(\phi) + c \quad (2)$$

Para a introdução do modelo constitutivo no programa de elementos finitos ABAQUS, o modelo requer os parâmetros apresentados na Tabela 3, Bosma *et al.* (1999).

Tabela 3. Parâmetros utilizados para o critério de Mohr-Coulomb

Parâmetros elásticos e plásticos para o critério de Mohr-Coulomb		
Modulo de elasticidade (MPa)	E_c	8300
Coeficiente de Poisson	ν	0,1
Coesão efetiva (MPa)	c	21,6
Ângulo de atrito (graus)	ϕ	17,1

Fonte: Bosma *et al* (1999)

3 MODELAGEM

Para um modelo numérico se aproximar ao máximo dos problemas em campo, o modelo mais apropriado seria um tridimensional, levando em conta as direções radial, circunferencial e axial. Um modelo desse tipo, apesar de mais realista, é também mais complexo. Muitos problemas de elementos finitos podem então ser aproximados por análises bidimensionais, fazendo com que muitos autores utilizem modelos 2D, como em Rodriguez *et al.* (2003) e em Jandhyala *et al.* (2013).

Para o caso da modelagem de poços de petróleo, em várias situações, as simplificações de um modelo em estado plano de deformação (EPD) e axissimétrico são aplicáveis. O EPD é utilizado quando a dimensão perpendicular à seção de análise do corpo é muito grande e as cargas são aplicadas perpendicularmente ao eixo longitudinal e uniformemente distribuídas ao longo do eixo. O caso axissimétrico assume que a carga é aplicada em um sólido de revolução e depende das coordenadas r e z (radial e axial). No caso estudado, o poço é circular, centralizado e a cimentação é considerada perfeita. Esse é um caso ideal, que pode não representar o que ocorre em campo. Por exemplo, a modelagem de pressões não uniformes no revestimento e no cimento, como mostrado por Berger *et al.* (2004), podem levar a resultados que indicam o colapso.

Para a construção dos modelos, é utilizado o estado plano de deformação no programa de elementos finitos ABAQUS. O processo é semelhante ao apresentado por Macay e Fontoura (2014). Inicialmente considera-se o sal íntegro sob o efeito apenas do estado geostático. O modelo inicia-se já com o furo do poço, porém com os deslocamentos dos nós da parede do sal restringidos, reproduzindo as condições iniciais (antes da perfuração). Na etapa de perfuração, a restrição na parede do poço é retirada, liberando assim o deslocamento, simulando a perfuração. Simultaneamente aplica-se a pressão do fluido de perfuração na parede do poço. Em seguida, a deformação por fluência se inicia, sendo definida uma duração de dez dias até a instalação do revestimento. As etapas seguintes são respectivamente a ativação dos elementos do revestimento e do cimento. No modelo adotado os nós da interface cimento-revestimento são compartilhados por ambos os materiais. A mesma condição é considerada entre o cimento e o sal. Para este modelo, a malha do cimento quando entra, tem de se ajustar ao deslocamento prévio do revestimento e do evaporito para que as malhas não fiquem sobrepostas. Para acomodar essas deformações, consideram-se elementos de rigidez desprezível, que partilham os mesmos nós da malha do cimento. Esses elementos estão presentes no início da análise e são removidos na fase de reconstrução quando a malha do cimento é colocada.

O detalhamento das etapas de instalação do revestimento e da cimentação estão esquematizadas na Figura 2.

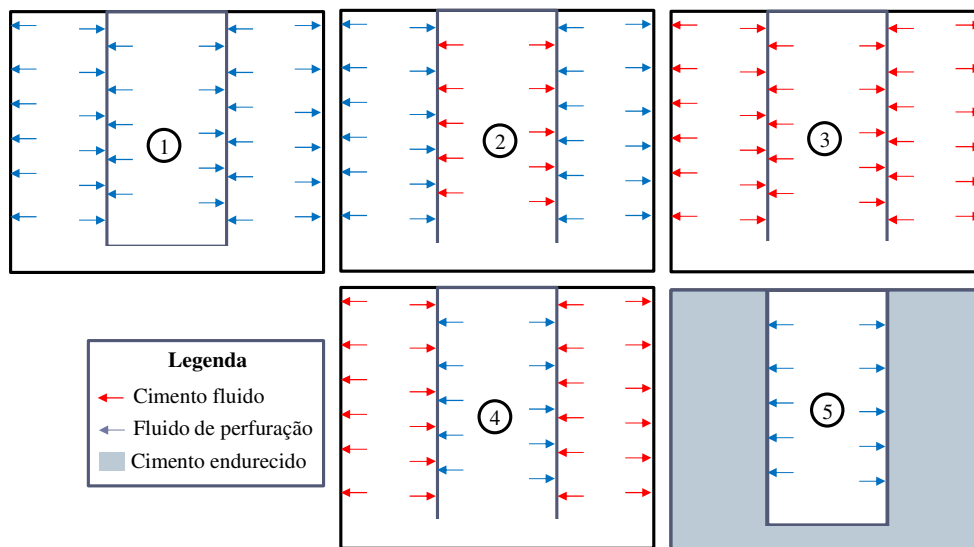


Figura 2. Pressões atuantes no poço ao longo das etapas de construção (seção axial do poço)

Após as fases de construção, considera-se o início da fase de produção, com uma alteração da pressão interna após seis meses do início da análise. Simultaneamente, a temperatura sofre alteração, porém é adotado que essa variação da temperatura afeta apenas o modelo constitutivo do sal, até o raio de um metro a partir do eixo do poço.

4 ESTUDO DE CASO

Para a modelagem do poço, um quarto da seção transversal é utilizado devido à simetria. Não são consideradas falha na cimentação, ovalização ou descentralização do revestimento. Para as condições de contorno, os nós da borda do modelo têm seus deslocamentos restringidos em todas as direções, enquanto as faces inferior e esquerda do modelo têm os deslocamentos tangenciais restringidos, podendo apenas se mover radialmente. Na geração da malha, são utilizados elementos quadrangulares, com quatro nós e integração completa.

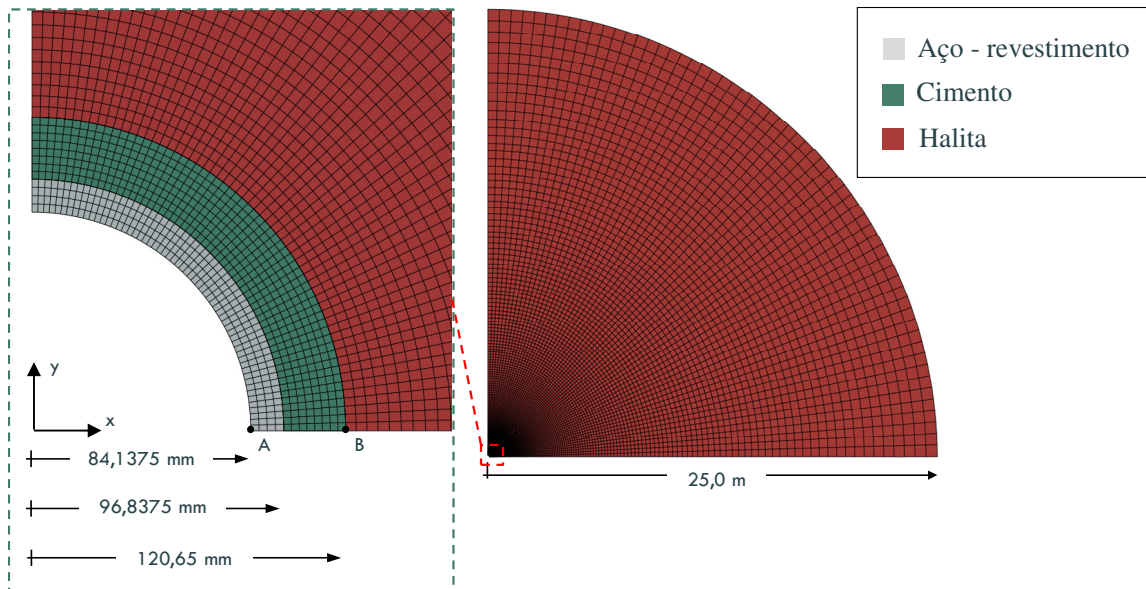


Figura 3. Malha e dimensões dos modelos analisados.

As propriedades dos materiais e os carregamentos utilizados no modelo estão apresentados na Tabela 4. Para o tamanho do modelo, foi adotado um raio de 25 metros do eixo do poço até o contorno. Esse tamanho garante que as condições de contorno do modelo não interfiram na análise na região de interesse, e garante ainda que ao final da simulação, o estado de tensão do sal no contorno do modelo se mantém igual ao geostático. Em todos os modelos, o tempo de fluência utilizado entre as etapas de perfuração e de instalação do revestimento é de 240 horas (10 dias) e a produção inicia-se 6 meses após o início da análise. O tempo total de simulação é de 1564 semanas (30 anos). A profundidade analisada é de 3500 metros, e os valores da Tabela 4 são apresentados considerando esta profundidade.

Tabela 4. Propriedades dos materiais e carregamentos

Dados	Valor	Unidade
Diâmetro externo do revestimento (7 5/8")	193,675	mm
Diâmetro interno do revestimento (6 5/8")	168,275	mm
Parede do poço (9 1/2")	241,3	mm
Estado inicial de tensão da halita	74645,0	kPa
Pressão hidrostática do cimento	64977,5	kPa
Fluido de perfuração	61100,0	kPa
Fluido de produção	24158,0	kPa
Temperatura de construção	60	°C
Temperatura de produção	120	°C

Fonte: Gray *et al.* (2007)

Para analisar a influência da temperatura no modelo constitutivo do sal, são plotados três gráficos comparativos. Primeiramente os três modelos a serem comparados serão avaliados quanto à plastificação do revestimento, Figura 4. O IP (índice de plastificação) é a razão entre

a tensão equivalente (desviadora) atuante no material e a tensão equivalente limite do mesmo. Destaca-se que cada material possui um critério de plastificação diferente.

Os três modelos avaliados se diferenciam apenas na temperatura considerada no modelo constitutivo do sal. O modelo “Construção” possui uma temperatura de 60 °C, considerando a temperatura in situ da halita durante todo o tempo de análise. O modelo “Produção” tem uma temperatura de 120 °C, considerando já a temperatura na fase de produção ao longo das 1564 semanas avaliadas. Por último, o modelo “Construção/Produção” tem a temperatura inicial de 60 °C até a semana 25,7 (6 meses), e após esse tempo, a temperatura é alterada para 120 °C apenas na halita com um raio de 1 metro do eixo central do poço. Na Figura 4 é apresentada apenas a região próxima ao poço ao final de 1564 semanas, pois o objetivo da análise é avaliar as tensões no cimento e no revestimento.

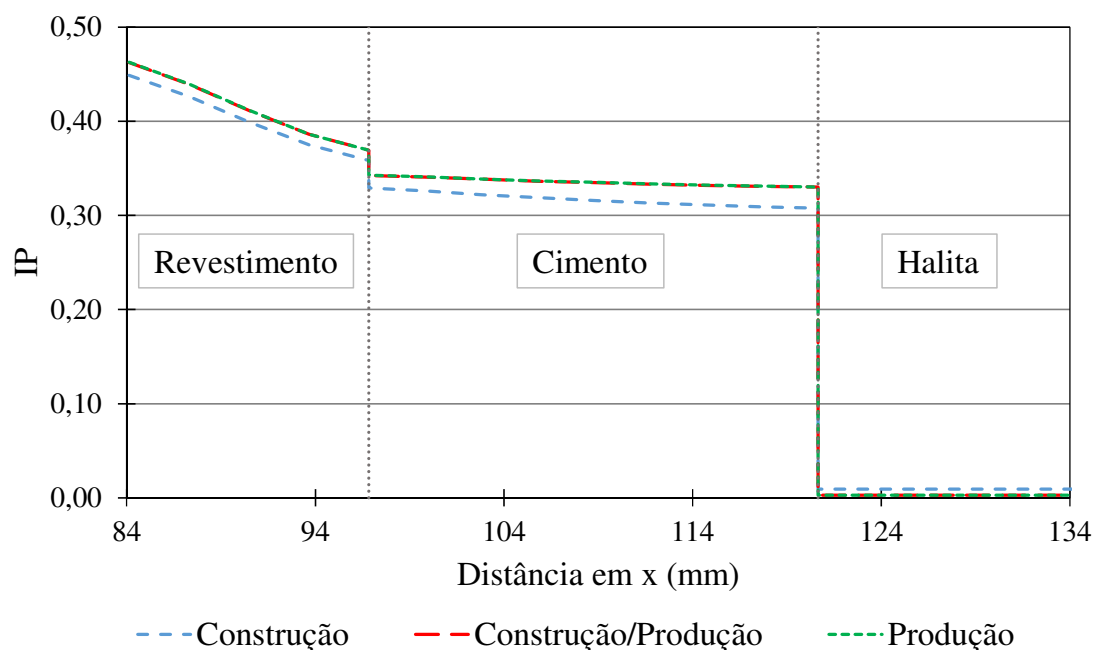


Figura 4. Índice de plastificação no revestimento, cimento e início da halita para os três modelos após 1564 semanas

A Figura 4 mostra que a distribuição de tensão é maior no revestimento uma vez que este é o material mais rígido. Com o aumento de temperatura, os valores de tensão no aço e, com maior expressão, no cimento aumentam. Estando o cimento o material contido entre o sal e o revestimento, a deformação do sal devido à fluência leva a um aumento das tensões no cimento. O índice de plastificação no nó interno do revestimento no modelo considerando halita com 60°C atinge o valor de 0,45, enquanto que com 120°C atinge 0,46 ao final das 1564 semanas.

Na Figura 5 e na Figura 6 estão registrados respectivamente, os valores de índice de plastificação e de deslocamento radial até à semana 44. Pode-se observar que no início da análise não há diferença entre os resultados do modelo com temperatura variando e do modelo com temperatura de construção. Após 6 meses, a temperatura é alterada, e então a curva do modelo com variação de temperatura tende para a curva do modelo com temperatura de produção. As análises com temperaturas de produção e construção representam o limite superior e inferior da modelagem.

A Figura 5 apresenta o comportamento do IP ao longo do tempo (em semanas), porém é apresentado somente até a semana 44 para poder observar a diferença entre as etapas de construção e produção.

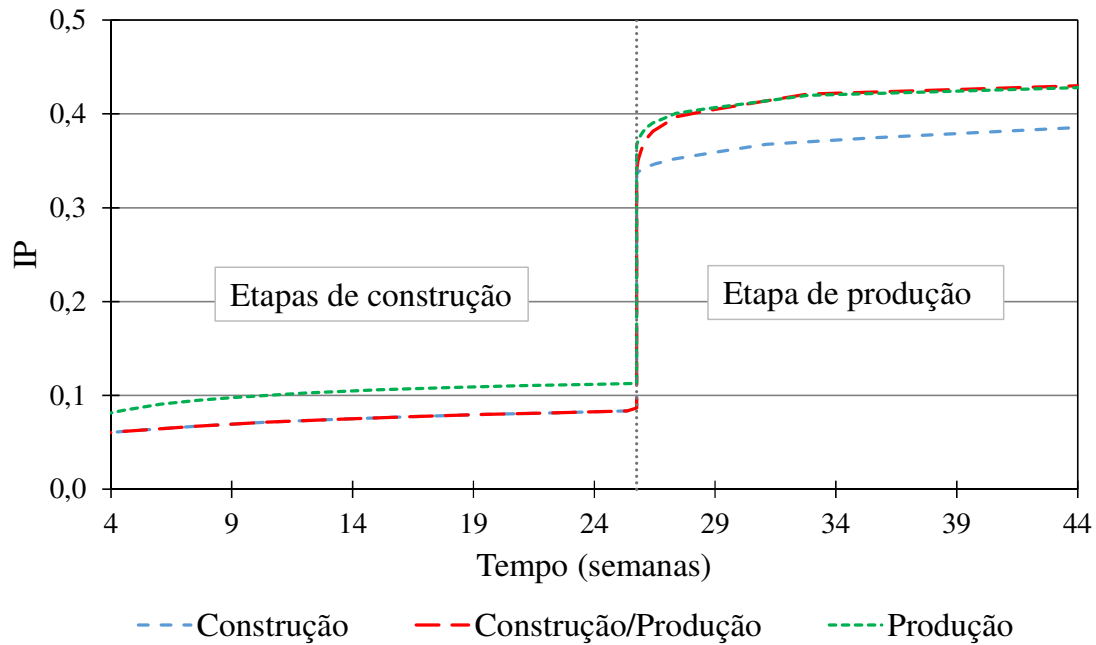


Figura 5. Índice de plastificação no nó interno do revestimento (Ponto A) ao longo do tempo para os três modelos

Na Figura 6, o deslocamento radial do nó interno do revestimento (Ponto A da Fig. 3) é avaliado para os três diferentes cenários de temperatura simulados.

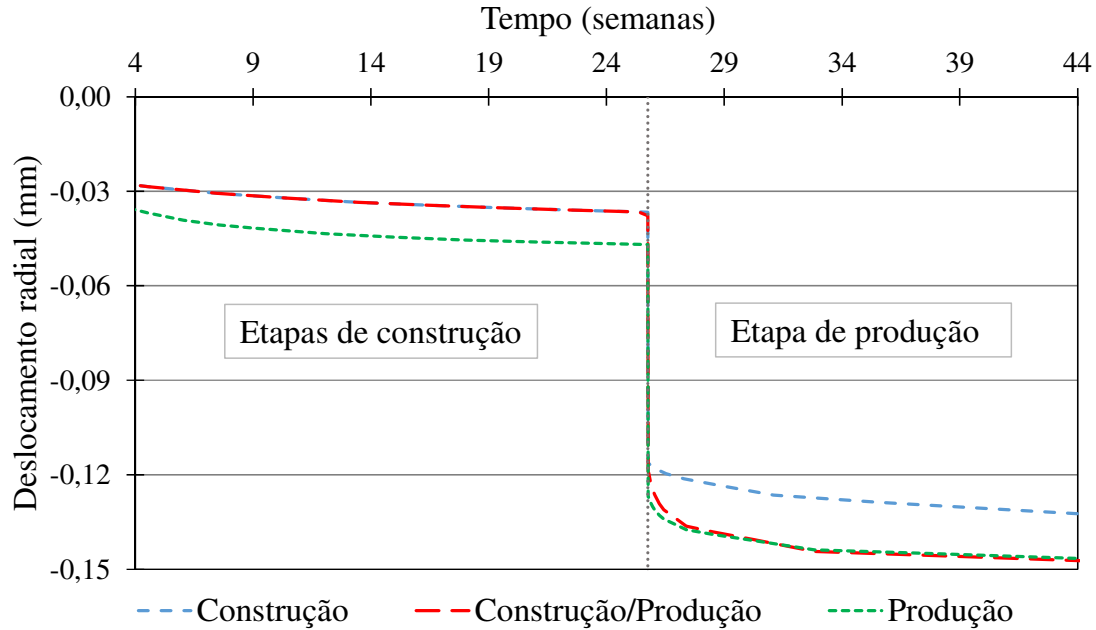


Figura 6. Deslocamento radial ao longo do tempo para os três modelos no nó interno do revestimento (Ponto A)

Além da halita, foi analisada a rocha carnalita, que apresenta uma taxa de deformação maior. Foram feitas as mesmas análises mudando somente as propriedades do sal, e mantendo o estado de tensão inicial e os carregamentos aplicados ao longo do tempo. Para este caso, os valores de IP mostraram-se praticamente idênticos, com um acréscimo máximo de 2% de IP no ponto A em relação aos resultados apresentados no caso da halita, Figura 4. Assim, verificou-se que a tipologia da rocha salina não é determinante no estado de tensão do revestimento e cimento.

Já para o deslocamento na parede do poço (Ponto B da Fig. 3) e consequente dimensão do espaço anular, as análises com a carnalita e halita mostram-se divergentes. Os deslocamentos na parede do poço para a halita e carnalita são apresentados na Fig. 7.

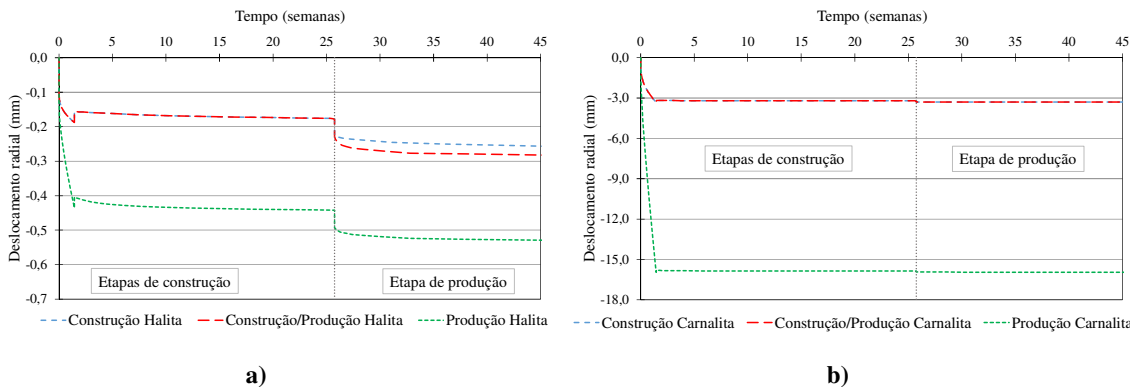


Figura 7. Fechamento da parede do poço ao longo do tempo na a) halita e b) carnalita

A Figura 7 mostra que quando o sal não está confinado exibe um acréscimo de deformações com a variação da temperatura. Verifica-se que para a halita, o aumento da temperatura faz com que a deformação na parede do poço (Ponto B da Fig.3) aumente o

dobro. Para a carnalita esse aumento é muito mais significativo. O deslocamento medido na parede do poço a 120 °C é cinco vezes superior ao deslocamento medido com 60°C. Já quando a rocha salina se encontra confinada, na fase de mudança da construção para a produção, verifica-se que devido ao efeito de confinamento conferido pelo cimento e pelo aço, os deslocamentos na halita são de baixa magnitude enquanto que os da carnalita são praticamente inexistentes. Isto se deve à diferença de rigidezes entre o sal e o cimento.

5 CONCLUSÕES

O processo de modelagem utilizado nesse trabalho apresenta as principais etapas de construção de um poço além de considerar a instalação do cimento, já levando em conta o deslocamento da parede do poço. Foram analisadas a estabilidade e a integridade de um poço para dois tipos de rocha salina, halita e carnalita. Diferentes cenários de temperatura foram investigados.

No estudo de estabilidade, no caso da carnalita, no momento em que o cimento é colocado, o sal já se deformou consideravelmente, sendo necessário instalar o cimento no anelar (espaço entre o revestimento e a parede do poço) já deformado, para que não haja sobreposição de malhas. Esse efeito dificulta a instalação do revestimento e do cimento, podendo ainda ser necessário repassar inúmeras vezes o poço (realizar a perfuração até o diâmetro do poço ser adequado à instalação do revestimento). No momento em que o cimento é injetado, essa menor distância pode causar falhas na cimentação, causando futuros problemas de integridade do poço. Como uma das funções do cimento é proteger o revestimento, a espessura da bainha do cimento tem um papel importante, e, portanto, deve ser respeitada. Na análise com halita o efeito do fechamento do poço é bem menor do que na carnalita e não indicou problemas de estabilidade.

Conclui-se também que para os valores de temperatura e propriedades da rocha consideradas, a temperatura nas rochas salinas não altera significativamente o fechamento do revestimento e as tensões no cimento e no revestimento no final da análise, estando garantida a integridade do poço.

REFERÊNCIAS

- Berger, A., Fleckenstein, W. W., Eustes, A. W., & Thonhauser, G. (2004). Effect of Eccentricity, Voids, Cement Channels, and Pore Pressure Decline on Collapse Resistance of Casing. *SPE International*, (p. 8). Houston, Texas.
- Bosma, M., Ravi, K., Driel, W. v., & Schreppers, G. J. (1999). Design Approach to Sealant Selection for the Life of the Well. *SPE Annual Technical Conference* (p. 14). Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers.
- Bourgoyne, A. T., Scott, S. L., & Manowski, W. (1999). *A review of sustained casing pressure occurring on the ocs*.
- Costa, A. M., Poiate J., E., Falcão, J. L., & Coelho, L. F. (2005). Triaxial Creep Tests in Salt Applied in Drilling Through Thick Salt Layers in Campos Basin-Brazil. *SPE International*, (p. 9). Amsterdam.
- Firme, P. A. (2013). *Modelagem Constitutiva e Análise Probabilística Aplicadas a Poços em Zonas de Sal*. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

- Firme, P. A., Roehl, D. M., Romanel, C., Poiate Jr, E., & Costa, A. M. (2014). Creep constitutive modeling applied to the stability of pre-salt wellbores through salt layers. *ARMA - American Rock Mechanics Association*, (p. 10). Minneapolis, MN.
- Gray, K. E., Podnos, E., & Becker, E. (2007). Finite Element Studies of Near-Wellbore Region During Cementing Operations: Part I. *SPE Production and Operations Symposium* (p. 15). Oklahoma City: Society of Petroleum Engineers.
- Heathman, J., & Beck, F. E. (2006). Finite Element Analysis Couples Casing and Cement Designs for HT/HP Wells in East Texas. *SPE International/IADC*, (p. 23).
- Henderson, D., & Hainsworth, D. (2014). Elgin G4 Gas Release: What Happened and the Lessons to Prevent Recurrence . *SPE International*, (p. 13). Long Beach, California.
- Jandhyala, S., Barhate, Y. R., Anjos, J., Fonseca, C. E., & Ravi, K. (2013). Cement Sheath Integrity in Fast Creeping Salts: Effects of Well Operations . *SPE International*, (p. 10). Aberdeen.
- Mackay, F., & Fontoura, S. A. (2014). The Description of a Process for Numerical Simulations in the Casing Cementing of Petroleum Salt Wells – Part I: from drilling to cementing. *48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium* (p. 9). Minneapolis: American Rock Mechanics Association.
- Poiate Jr., E. (2012). *Mecânica das Rochas e Mecânica Computacional ara Projetos de Poços de Petróleo em Zonas de Sal*. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).
- Rodriguez, W. J., Fleckenstein, W. W., & Eustes, A. W. (2003). Simulation of Collapse Loads on Cemented Casing Using Finite Element Analysis. *SPE Annual Technical Conference* (p. 9). Denver: Society of Petroleum Engineers.