



ESTABILIDADE DE POÇOS DE PETRÓLEO EM FORMAÇÕES EVAPORÍTICAS – EFEITOS DE FLUÊNCIA, PLASTICIDADE E DANO.

Juan David Velilla Uribe

Sergio A.B da Fontoura

Daniel Duque Melo

Nelson Inoue

juandavid@puc-rio.br

fontoura@puc-rio.br

inoue@puc-rio.br

Departamento de Engenharia Civil, GTEP/PUC-rio, Rio de Janeiro, Brasil.

Rua Marques de São Vicente 225- Edifício Padre Leonel Franca- 6 andar, 22453-900,

Jorel Lopes dos Anjos

jorel.anjos@petrobras.br

CENPES/Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil.

Avenida Horácio Macedo, 950 Cidade Universitária, ilha do fundão.

Abstract. *O comportamento tensão-deformação de materiais rochosos é influenciado por três zonas principais: zona elástica, zona plástica e zona de dano. No caso das rochas evaporíticas além das três zonas citadas é apresentado o fenômeno da fluência, ou deformações do material sob um carregamento constante aplicado, onde normalmente é suposto que o material possui um comportamento visco-elástico, sendo assim só considerada a fluência e a zona elástica, suposição que ignora um possível enfraquecimento do material devido à plasticidade e o dano. O presente trabalho tem como objetivo analisar a resistência ao cisalhamento do material salino na perfuração de poços de petróleo no pré-sal, considerando os efeitos da fluência e a curva completa tensão deformação. O software de elementos finitos, ABAQUS, foi empregado para realizar as simulações. A fluência foi modelada com a lei de duplo mecanismo de deformação e para o comportamento tensão-deformação foi utilizado o modelo constitutivo de Drucker e Prager com dano dilatante. Os parâmetros de cada modelo constitutivo foram escolhidos com base em dados de laboratório reais da literatura. Finalmente a perfuração e fluência de um poço de petróleo são analisadas, para condições reais num modelo de estado plano de deformação.*

Keywords: *Evaporitos, perfuração, fluência, plasticidade, dano.*

1 INTRODUÇÃO

Os evaporitos são rochas sedimentares de origem química que se formam a partir da precipitação de sais presentes numa solução aquosa concentrada (salmoura) devido à evaporação da água do mar. Existem quatro principais tipos de evaporitos a serem formados depois do processo de precipitação, deposição e diagêneses, que são: anidrita, halita, carnalita e taquidrita (figura 1).

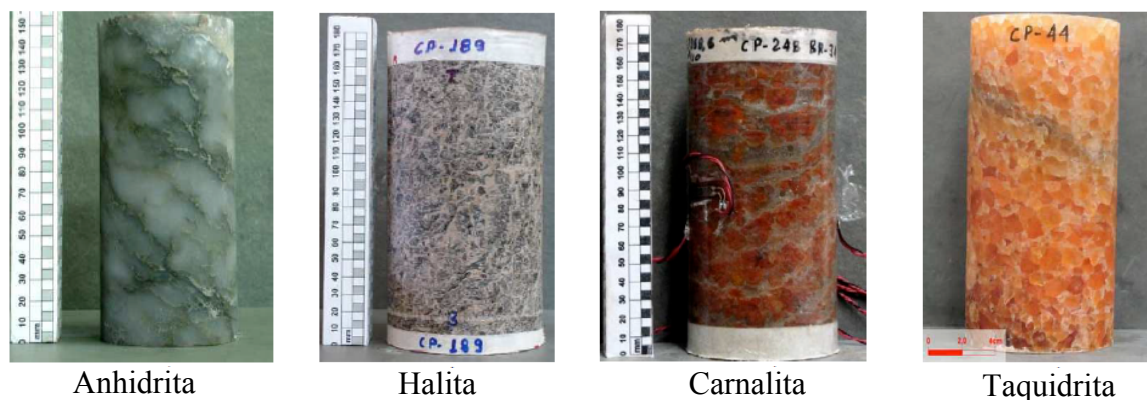


Figura 1. Diferentes tipos de evaporitos (Poiate, 2012)

As principais características geomecânicas deste tipo de rochas são: fluência (deformação no tempo sob um carregamento constante aplicado), são praticamente impermeáveis, solúveis em água, apresentam alta resistência ao faturamento, são incompressíveis (peso específico constante em profundidade) e possuem alta condutividade térmica, de duas a três vezes maior a outras rochas sedimentares como arenitos e argilas.

Uma das principais aplicações que envolvem rochas evaporíticas na área de engenharia está na análise da estabilidade de poços de petróleo, onde o objetivo principal é garantir a integridade estrutural da coluna perfurada durante as etapas de perfuração, cimentação e produção, pelo que um dos requerimentos necessários é compreender o comportamento tensão-deformação deste tipo de rochas sob os carregamentos a que são expostos. Na literatura existem vários estudos que tem sido realizados sobre o comportamento geomecânico de evaporitos. Costa (1984) desenvolveu um procedimento numérico para análise de escavações subterrâneas de evaporitos empregando o métodos dos elementos finitos incluindo análise geométrica linear e não linear, leis constitutivas visco-elásticas e visco-plásticas. Medeiros (1999) apresenta procedimentos para análise dos esforços em colunas de revestimento instaladas em um poço de petróleo, sob a condição do fenômeno de fluência do evaporito. Vieira (2008) propõe um estudo do comportamento mecânico do sal em poços de petróleos analisando os deslocamentos, deformações e tensões na parede do poço e em sua vizinhança para diversos pesos de fluido de perfuração com a utilização do método dos elementos finitos. Mackay (2011) estabeleceu um procedimento para análise do processo de perfuração e cimentação de poços em camadas de sal englobando tanto o processo de endurecimento do cimento quanto a resposta da fluência da camada do evaporito. Poiate (2012) realizou testes de laboratório em amostras de anidrita, halita, taquidrita, para assim gerar as curvas tensão deformação de cada tipo de rocha e depois com estes resultados realizar simulações numéricas da construção de poços. Li et al. (2013) e Misal et al. (2014) realizaram

análises do comportamento completo (zona elástica, zona plástica e zona de dano) da curva tensão-deformação de amostras de halita.

O principal objetivo deste artigo é incluir o comportamento completo da curva tensão-deformação nas análises de estabilidade de poço. O trabalho está dividido em duas partes: a primeira é a simulação numérica de testes triaxiais sintéticos baseados em dados de laboratório, e a segunda parte é a modelagem computacional no software ABAQUS da perfuração e fluência de um poço de petróleo.

2 O COMPORTAMENTO COMPLETO TENSÃO-DEFORMAÇÃO

O comportamento completo tensão-deformação de uma rocha pode ser descrito por três zonas principais: 1) zona elástica: ocorre no material que possui deformações reversíveis quando os carregamentos externos deixam de ser aplicados, 2) zona plástica: o material possui deformações irreversíveis e ainda é íntegro 3) zona de dano: é onde o material possui deformações irreversíveis além de começar a apresentar um enfraquecimento (pequenas fraturas) até atingir o limite máximo de resistência. O limite entre a zona elástica e a zona plástica pode ser definido quando o material já não apresenta mais comportamento linear entre tensão e deformação, enquanto o limite plástico-dano pode ser identificado no momento em que a rocha passa a aumentar de volume (dilatância), isto é, quando micro-fraturas começam a se propagar, aumentando o volume do material, conforme a figura 2.

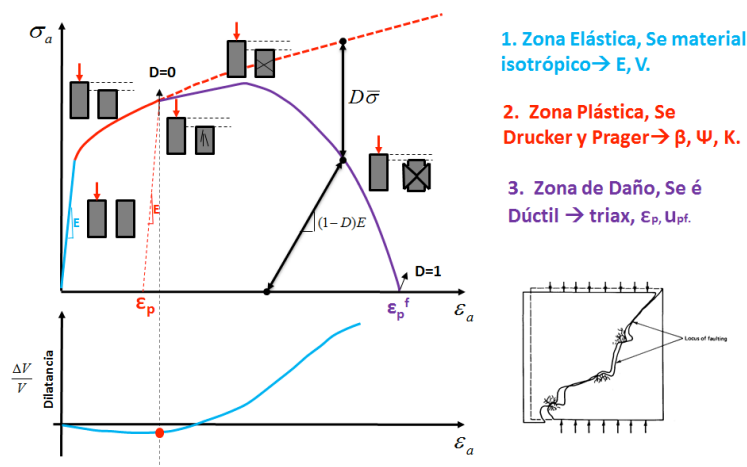


Figura 2. Comportamento completo tensão-deformação de rochas (modificado manual ABAQUS)

Nas rochas evaporíticas a relação tensão-deformação pode ser estudada com base em trabalhos da literatura. Liu et al (2013) realizaram análises em dezoito amostras de halita, retiradas entre 1400 e 1800 metros de profundidade, e divididas em três grupos: 1) halita pura (%NaCl>95%); 2) halita com baixo grau de impureza (90%<%NaCl<95%); e 3) halita com alto grau de impureza (80%<%NaCl<90%).

Nos testes de compressão triaxial foram identificadas três importantes conclusões: 1) tensões confinantes acima de 5 Mpa geram uma transição do comportamento rígido para dilatante na rocha; 2) Existe pouca influência da tensão confinante, sem considerar amostras com camadas intermediárias de outro tipo de rocha (impureza); e 3) O modo de ruptura é de cisalhamento por dilatância. A figura 3 apresenta estes resultados.

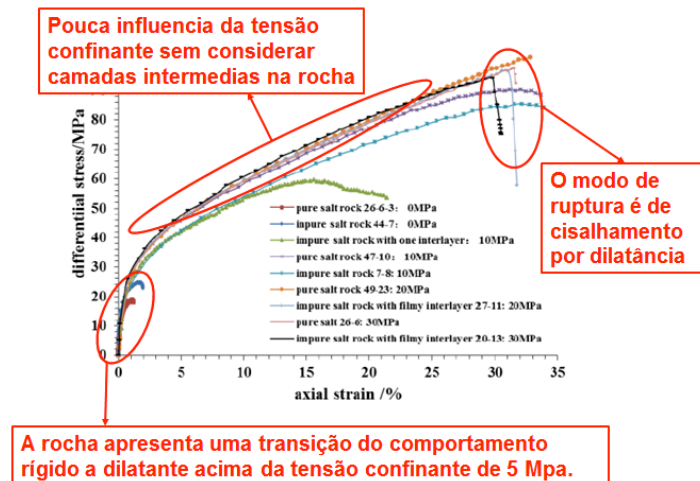


Figura 3. Curvas tensão deformação para diferentes tensões confinantes, Liu et al. (2013)

2.1 Modelagem computacional

A geometria do modelo axisimétrico apresentado na figura 4 foi considerada. A amostra sintética possui um diâmetro de 0.1 metros e uma altura de 0.2 metros. Uma malha de elementos de 1400 elementos quadrilaterais de tipo CAX4R com 1479 nós foi gerada a partir de um quarto da geometria devido aos dois eixos de simetria que possui o modelo. Como condições de contorno foram impedidos os deslocamentos na vertical e na horizontal no contorno inferior e no contorno esquerdo respectivamente.

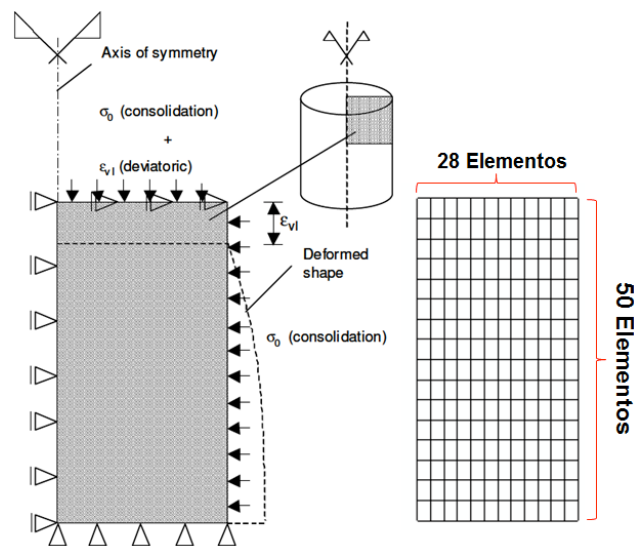


Figura 4. Geometria do modelo axisimétrico (modificado Bayounmi, 2006)

Foram realizadas dois tipos de testes. No primeiro é aplicada uma velocidade de 0.5 m/s no topo da amostra durante um tempo de 0.04 s num tipo de modelagem chamado de dinâmico explícito (salientando-se que o comportamento da amostra é independente da taxa de deslocamento imposta). No segundo teste foi aplicado um carregamento incremental no

topo de 0 até 100 Mpa num tipo de modelagem chamado de estático. Os parâmetros de entrada para todas as zonas foram:

- Zona elástica: o material foi considerado como isotrópico, ou seja, só é preciso definir o módulo de Young ($E=23.8$ GPa) e Poisson ($\nu=0.36$).
- Zona Plástica: O comportamento do material foi considerado segundo o critério de Drucker-Prager, cujos dados de entrada necessários são o ângulo de atrito (β), o ângulo de dilatância (Ψ), o parâmetro que relaciona resistência a tração e compressão (K), e a taxa de endurecimento do material para um teste não confinado. Considerando a hipótese de Liu et al. (2013) de que a partir das tensões confinantes de 5 Mpa o confinamento não influencia a resposta do material, temos que os parâmetros de Drucker-Prager são: $\beta=0$, $\Psi=0$ e $K=1$. A tabela de deformações plásticas-tensão (taxa de endurecimento) foi fornecida da curva tensão-deformação apresentada na figura 3.
- Zona de Dano: O dano está dividido em duas etapas: o início e a evolução. O material foi assumido como dilatante, e, neste caso, o início do dano será fornecido por uma tabela que relaciona deformações plásticas com a triaxilidade de tensões (relação entre a tensão de Von Mises, q , e a tensão média, p). Devido à suposição de que o material não apresenta influência da tensão confinante, o início do dano do material apresenta a mesma deformação plástica, independentemente da triaxilidade. Para definir a evolução do dano é necessário o máximo deslocamento uniaxial U_f , medido desde o início do dano, que a amostra pode suportar.

Os resultados da modelagem dinâmica são apresentados na figura 5 para diferentes deslocamentos uniaxiais máximos (U_f). Na figura 5 também pode-se observar que a curva elasto-plástica tem pouca convergência com a curva de laboratório.

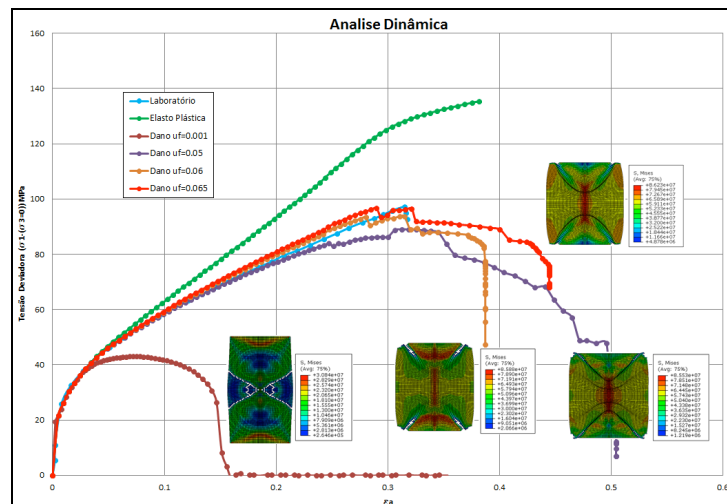


Figura 5. Modelagem dinâmica da curva tensão-deformação.

O segundo tipo de modelagem realizada foi a de tipo estática. Os resultados, considerando o início do dano no limite máximo de resistência de 100 Mpa, são apresentados na figura 6, ou seja, as curvas obtidas pelo modelo estão apenas no regime elasto-plástico sem considerar o dano. Pode-se observar que esta curva tem uma melhor convergência comparada com a curva elasto-plástica da análise dinâmica.

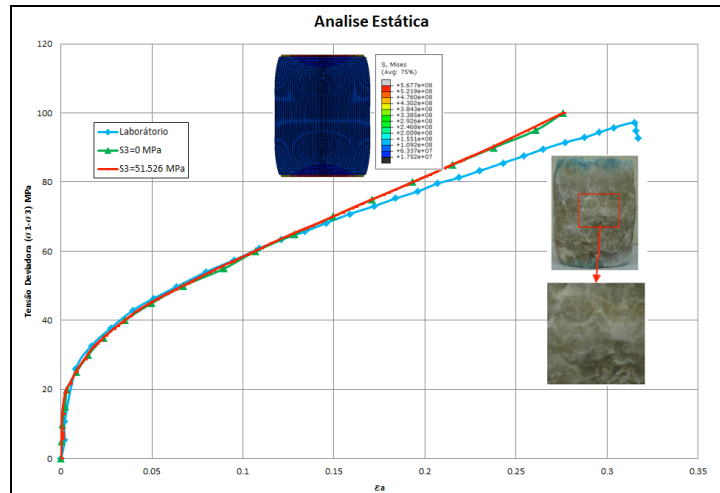


Figura 6. Modelagem estática da curva tensão-deformação.

3 O COMPORTAMENTO DE FLUÊNCIA

A fluência é o termo utilizado para descrever a tendência de um material a se deformar ao longo do tempo sob um diferencial de carregamento constante aplicado. Nos evaporitos a fluência é influenciada principalmente pela espessura da camada de sal, pela temperatura da formação, pela composição mineralógica, pelo teor de água, pela presença de impurezas e pela extensão em que o carregamento diferencial é aplicado no corpo salino.

Devido à propriedade de fluência o sal pode ser considerado como visco-elástico, termo utilizado para definir um material que apresenta uma forte dependência do tempo em seu comportamento, combinando o efeito da viscosidade e da elasticidade.

A curva deformação-tempo característica para uma rocha salina sob um carregamento uniaxial constante aplicado é apresentada na figura 7. Nesta figura podem-se diferenciar três fases ou três tipos de fluência: a) Primária, b) Secundária; c) Terciária.

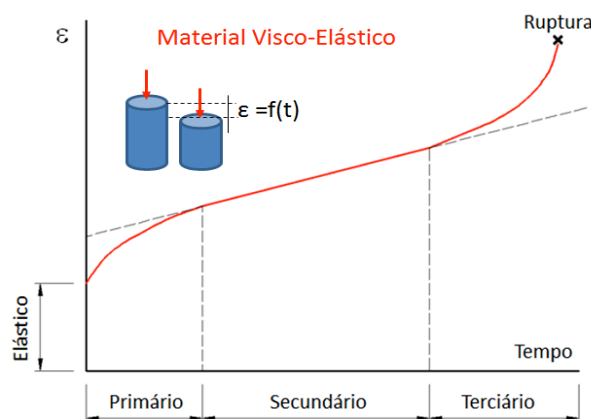


Figura 7. Modelagem estática da curva tensão-deformação.

O modelo constitutivo que é empregado para modelar a fluência secundária é conhecido como lei de duplo mecanismo de deformação (equação 1).

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_o \cdot \left(\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_o} \right)^n \cdot e^{\left(\frac{Q}{RT_o} - \frac{Q}{RT} \right)} \quad (1)$$

Onde $\dot{\varepsilon}_s$ é a taxa de deformação por fluência na condição de regime permanente, $\dot{\varepsilon}_o$ é a taxa de deformação por fluência de referência (1/h), σ_d é a tensão desviadora sendo igual a $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ para um teste de fluência triaxial, onde σ_1 é a tensão principal maior e σ_3 é a tensão principal menor. σ_o é a tensão efetiva de referência, Q é a energia de ativação (Kcal* mol^{-1}), para halita Q=12 Kcal* mol^{-1} (Costa et al, 2005), R=1.9858E⁻³ é a constante universal dos gases (Kcal* $\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$), T₀ é a temperatura de referência (K) no qual a rocha foi testada no laboratório T₀=86 °C=329.15 K, T é a temperatura da rocha na profundidade em estudo, n é o coeficiente que depende do nível das tensões aplicadas.

4 MODELAGEM DA PERFURAÇÃO E FLUÊNCIA DE POÇOS DE PETRÓLEO

A seguir será apresentada a modelagem da perfuração e fluência de um poço de petróleo. A figura 8 apresenta os passos da modelagem a serem realizados. Primeiro são definidas as entradas de dados do modelo como a geometria, propriedades do material, tensões in situ, malha de elementos finitos e condições de contorno e etapas da simulação que são três: equilíbrio geostático, perfuração do poço e fluência. Finalmente a última etapa é a análise de resultados.

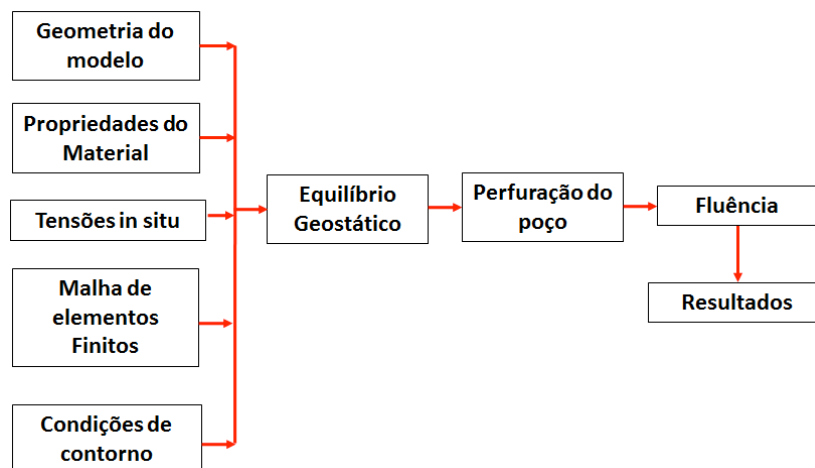


Figura 7. Fluxograma de trabalho.

4.1 Dados do Modelo

O software ABAQUS foi escolhido para realizar as simulações. A geometria do modelo encontra-se dentro de um quadrado de 3.2x3.2 m, o poço possui um raio de 0.2032 m. A rocha de interesse é halita seguindo o comportamento completo tensão deformação.

A profundidade da análise é de 5740 m, dividida numa lâmina de água de 2207 m e uma camada de rocha de 3533 m. O peso médio da coluna litostática é de 20.7 N/m^3 e da coluna de água é de 10 KN/m^3 . A tensão vertical (σ_v) é calcula como: $\sigma_v = 3533 \cdot 10 + 2207 \cdot 20.7 = 95.864 \text{ MPa}$. O material encontra-se num equilíbrio hidrostático de tensão, pelo que as três tensões principais (tensão vertical σ_v , tensão horizontal máxima σ_H e tensão horizontal mínima σ_h) são iguais: $\sigma_v = \sigma_H = \sigma_h = 95.864 \text{ MPa}$. A densidade do fluido de perfuração é de 1437 Kg/m^3 (12 PPG=81 MPa). A poropressão para este tipo de rocha é considerada como zero.

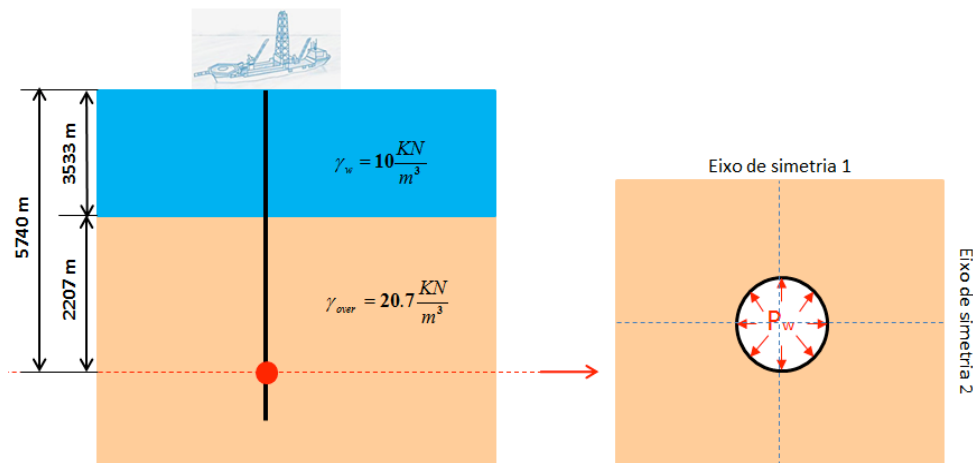


Figura 8. Geometria do modelo.

O tipo de modelo escolhido para as simulações foi deformação plana com dois eixos de simetria, ou seja, que para uma maior velocidade de cálculo somente $\frac{1}{4}$ de geometria é analisada. A malha de elementos finitos está formada por 448 elementos do tipo CPE4R e 493 nós tal como é apresentado na figura 8. As condições de contorno estão em termos de deslocamento $x=0$ no contorno vertical esquerdo e $y=0$ no contorno horizontal inferior. A face do poço encontra-se restrita em deslocamento na etapa geostática e livre nas etapas seguintes. As etapas de simulação são divididas como:

1. Geostático: encarregada de definir as condições de equilíbrio inicial do sal. Nesta etapa os descolamentos são zero, as tensões iguais às tensões in situ e a tensão de von Mises é igual a zero.
2. Perfuração: as condições de contorno de deslocamento são removidas da face do poço e é aplicada a pressão do fluido de perfuração.

Fluência inicial: o sal é permitido a se deformar ao longo do tempo durante

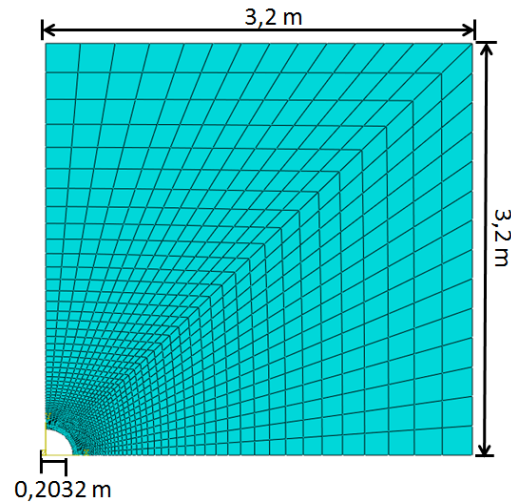
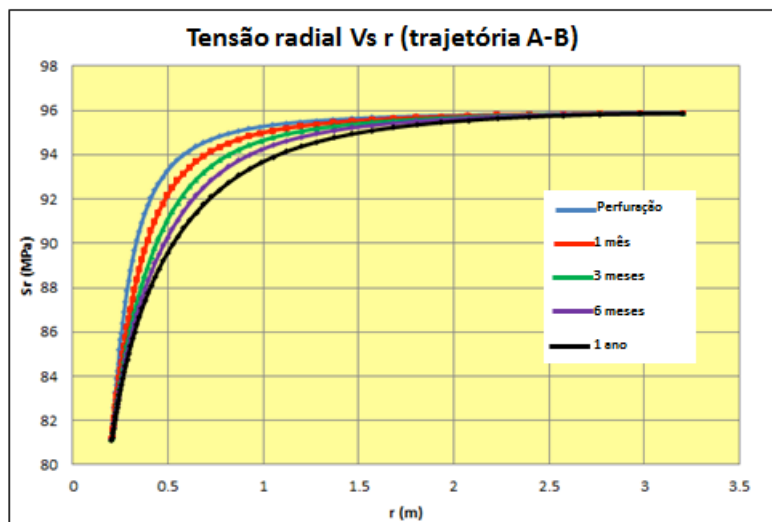


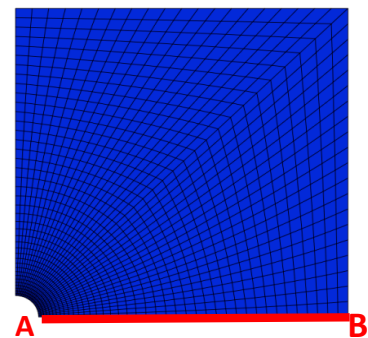
Figura 9. Malha de elementos finitos.

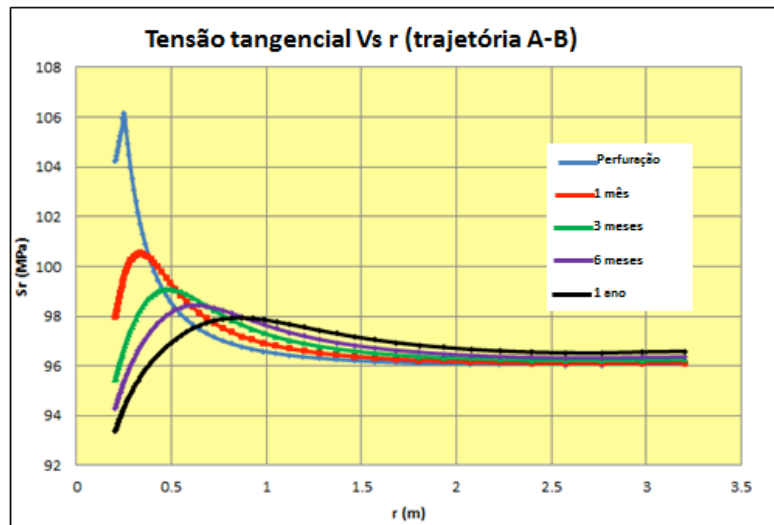
4.2 Resultados

Os resultados são apresentados em termos de tensões e deslocamentos. A figura 9 apresenta a tensão radial e tensão tangencial ao longo da trajetória A-B para. Pode-se notar nesta figura que ao longo do tempo as tensões tendem a aproximarem-se às tensões in situ. No caso da etapa de perfuração a tensão radial na parede do poço é igual ao valor da pressão imposta de 81 MPa e para a tensão tangencial o valor é aproximadamente 105 MPa,



A





B

Figura 9. Tensões: a) radial e b) tangencial ao longo da trajetória A-B

Os deslocamentos no ponto A foram calculados para diferentes pesos da lama de perfuração. Nota-se que quando acontece a perfuração o deslocamento é instantâneo para depois aumentar gradativamente devido à fluência. Nota-se também que quanto maior seja o peso da lama o deslocamento radial diminui. A figura 11 apresenta a relação área plastificada/área do poço. Neste caso o material plastificou, mas sem atingir o seu limite máximo de Mises de 100 Mpa (figura 3).

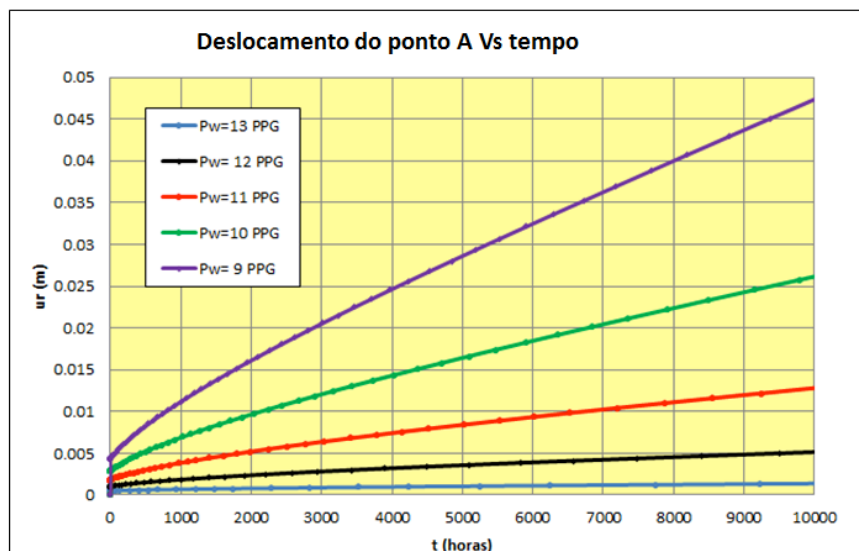


Figura 10. Deslocamento no ponto A para diferentes pesos do fluido de perfuração.

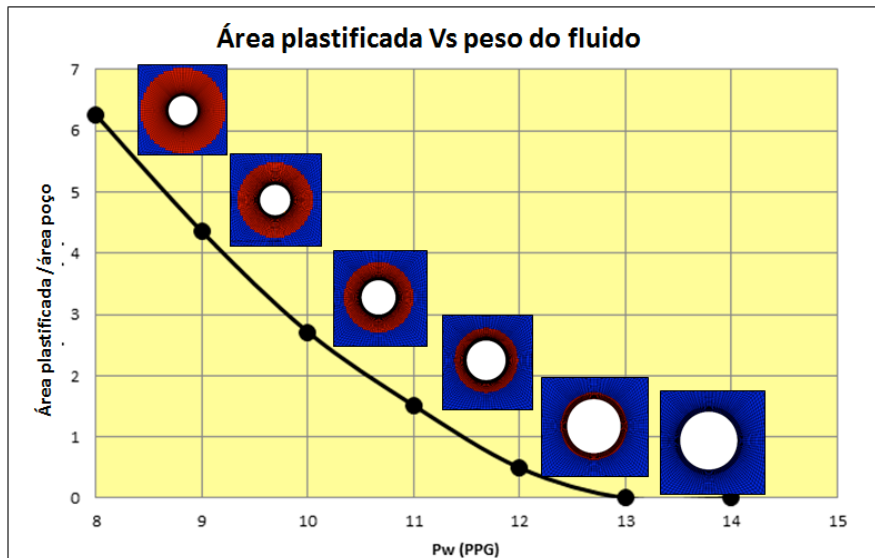


Figura 11. Área plastificada dependendo do peso do fluido

5 CONCLUSÕES

- As rochas evaporíticas apresentam uma transição do comportamento rígido a dilatante para tensões de confinamento maiores a 5 Mpa.
- A lei de duplo mecanismo de deformação consegue simular a fluência secundária, sendo assim suficiente para simular modelos onde o carregamento é prolongado.
- Devido à alta resistência das rochas evaporíticas, o colapso da parede do poço não foi observado, embora o material plastificasse nas proximidades da face do poço.
- O efeito da fluência é de relaxar as tensões na parede do poço no tempo, pelo que as condições mais críticas de carregamento existem no instante que ocorre a perfuração.

6 REFERÊNCIAS

COSTA A.M. Uma aplicação de métodos computacionais e princípios de mecânica das rochas no projeto e análise de escavações destinadas à mineração subterrânea. Dissertação de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1984.

COSTA, A.M., POIATE JR., E., FALCÃO, J.L., COELHO, L.F.M. Triaxial creep tests in salt applied in drilling through thick salt layers in Campos Basin- Brazil, IADC/SPE 92629.

MACKAY F. Análise geomecânica na perfuração e cimentação de poços de petróleo em zonas de sal. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Programa de pós-graduação em engenharia civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.

MEDEIROS, F.A. Análise do comportamento de colunas de revestimento frente à movimentação do sal em poços de petróleo. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Programa de pós-graduação em engenharia civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

LIU W., Li Y., Yang C., HENG S., WANG B. Analysis of physical and mechanical properties of impure rock. ARMA 13-336, 2013.

MISAL C., DORING I., STAHLMANN J. Comparison of triaxial strength tests of clean halite and argillaceous halite from WIPP. ARMA 14-7756, 2014.

POIATE, E.J. Mecânica das rochas e mecânica computacional para projetos de poços de petróleo em zonas de sal. Dissertação de doutorado. Departamento de Engenharia Civil. Programa de pós-graduação em engenharia civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

VIEIRA F. Análise numérica do comportamento mecânico do sal em poços de petróleo. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Programa de pós-graduação em engenharia civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008.