

## 4

# Metodologias e resultados de análises de fluência em rochas salinas

### 4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os modelos geomecânicos bidimensionais e axissimétricos para a simulação da fluência em rochas salinas.

Como ferramenta de estudo, foi adotado o programa de elementos finitos ABAQUS®, da Dassault Systèmes®. As simulações foram realizadas utilizando elementos isoparamétricos quadrilaterais de oito nós com integração reduzida (2 x 2), conforme mostra a Figura 4.1. Para os modelos axissimétricos foi adotado o elemento CAX8R e para análises em estado plano de deformações, o CPE8R. Ambos os elementos não consideram poropressão, o que é compatível com a idealização de porosidade nula no sal.

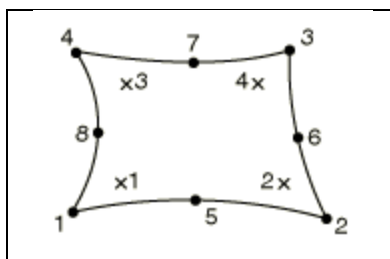


Figura 4.1 – Elemento isoparamétrico quadrilateral com integração reduzida CAX8R/CPE8R (ABAQUS).

Foi adotada a incrementação dinâmica de tempo no processamento das análises, com um controle de taxa de deformação máxima definido de acordo com o nível de tensões do problema ou com a máxima taxa de deformação admissível. Essa funcionalidade é particularmente desejável para análises altamente não lineares que se estendem por um longo período de tempo.

O pré-processamento do modelo, isto é, a geração da geometria e da malha de elementos finitos, foi feita utilizando o módulo ABAQUS/CAE<sup>®</sup> e, em alguns casos com o programa Sigma 2D<sup>®12</sup>.

A opção pelo programa ABAQUS<sup>®</sup> como ferramenta computacional para análises geomecânicas envolvendo rochas salinas tem sido recorrente em universidades brasileiras nos últimos anos, podendo ser citados os trabalhos de Mackay *et al.* (2007, 2008), Botelho (2008), Mackay (2011), Cavalcante (2012), Grainger (2012) e Orozco *et al.* (2013).

Pretende-se apresentar metodologias de análise e resultados dos exemplos de aferição das implementações em linguagem FORTRAN, para utilização dos modelos constitutivos não disponíveis originalmente no ABAQUS<sup>®</sup>.

O objetivo dos exemplos de aferição não é julgar a validade de um modelo constitutivo ou de sua calibração para a simulação de um fenômeno real, mas somente comparar soluções numéricas com o intuito de demonstrar o correto funcionamento do programa e das implementações. Entende-se que as pequenas diferenças entre as soluções numéricas realizadas e de referência são devidas a fatores externos às formulações, tais como precisão numérica, métodos de integração, *solver's* e demais peculiaridades de cada programa.

As propriedades utilizadas nos exemplos de aferição são as mesmas utilizadas nas soluções numéricas de referência, não sendo, necessariamente, as mais atuais. Optou-se por não apresentá-las diretamente para que divergências entre propriedades de aferição e as utilizadas nas etapas de validação, análise determinística e análise probabilística não viessem a prejudicar a compreensão ou gerar contradições. As propriedades adotadas nesses exemplos podem ser obtidas a partir das respectivas referências.

## **4.2. Aferição das implementações em FORTRAN**

### **4.2.1. Ensaio triaxial de fluência**

A simulação do ensaio triaxial de fluência representa uma etapa fundamental para a calibração e validação de modelos constitutivos.

---

<sup>12</sup> O programa Sigma 2D<sup>®</sup> é uma ferramenta computacional de pré e pós-processamento de modelos de elementos finitos desenvolvido pelo Instituto Tecgraf, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (Tecgraf – PUC-Rio), em convênio com a Petrobras.

Foram simulados ensaios com halitas do Brasil (Formação Muribeca, Sergipe) e dos Estados Unidos (porção *on-shore* Golfo do México). As amostras são cilíndricas, com razão de proporcionalidade (comprimento/diâmetro) de 2, conforme as especificações de ensaio do *ISRM*.

Valendo-se da simetria transversal e axial da amostra, o ensaio pode ser simulado com uma análise axissimétrica em modelo geomecânico bidimensional, com a metade da altura da amostra real.

O objetivo da simulação é medir o deslocamento na direção do carregamento que retira o corpo do estado inicial de tensões (tensão desviadora). Nos casos retratados, o ensaio é de carregamento axial, logo, mede-se o deslocamento axial ( $\delta_{ax}$ ), conforme mostra a Figura 4.2. A deformação axial ( $\varepsilon_{ax}$ ) será dada por (4.1):

$$\varepsilon_{ax} = \frac{\delta_{ax}}{L} \quad (4.1)$$

onde  $L$  é o comprimento do corpo de prova.

A partir das leituras de deslocamento e tempo a curva de fluência é modelada.

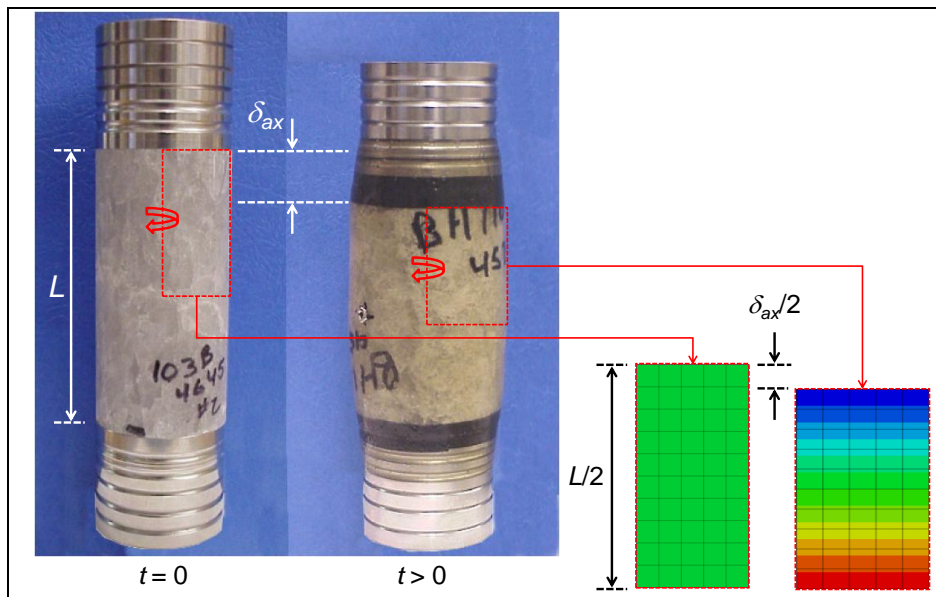


Figura 4.2 – Esquematisação para cálculo da deformação axial do corpo de prova (adaptado a partir de Lee *et al.*, 2004).

De forma análoga ao ensaio real, a Figura 4.3 apresenta as etapas de dimensionamento da amostra, confinamento, carregamento axial e fluência ao longo do tempo.

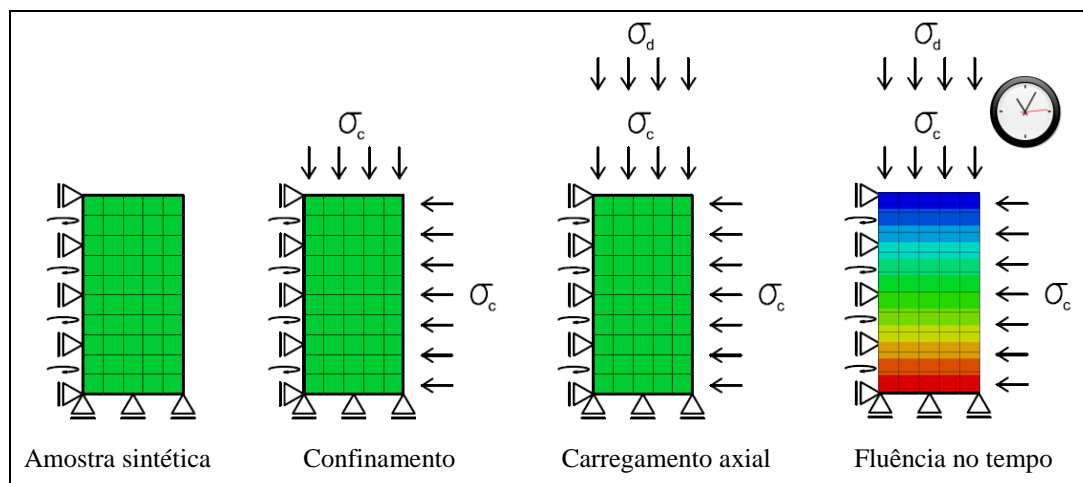


Figura 4.3 – Etapas da simulação do ensaio triaxial de fluência.

As condições de contorno consistem em apoios simples, restringindo deslocamentos verticais na base do modelo, que corresponde ao eixo de simetria transversal da amostra real, e deslocamentos horizontais na lateral esquerda, que corresponde ao eixo de revolução da amostra.

A aplicação do confinamento equivale ao carregamento geostático do modelo e simula o estado de tensões pré-existente do sal, quando esse elemento de rocha fazia parte do maciço. Nessa etapa, os deslocamentos iniciais são nulos.

Embora seja uma premissa questionável do ponto de vista da geotecnia clássica, assume-se que a tensão confinante não influencia o comportamento à fluência – o que é representado pelo fato da tensão equivalente de von Mises<sup>13</sup> somente se referir a parcela desviadora das tensões. É aplicado o carregamento axial, impondo-se a alteração do estado de tensão e, a partir desse momento, é iniciada a fluência.

A Figura 4.4 apresenta as principais etapas de carregamento de um ensaio triaxial de fluência<sup>14</sup>. Inicialmente, são aplicadas a tensão vertical e horizontal com o mesmo valor, simulando o confinamento isotrópico da amostra. A seguir, ocorre o carregamento axial, exibido através da tensão equivalente de von Mises. Por fim, é mostrada a nova tensão vertical atuante, que é o valor da tensão confinante acrescido da tensão desviadora. Não há variação na tensão horizontal.

<sup>13</sup> O ABAQUS® adota a tensão equivalente de von Mises. A generalização do estado uniaxial para esse estado multiaxial de tensões é detalhada no Apêndice A.

<sup>14</sup> O ensaio representado deu-se à tensão confinante de 10 MPa, tensão desviadora de 14 MPa e temperatura constante de 86°C, a partir de Costa *et al.* (2005).

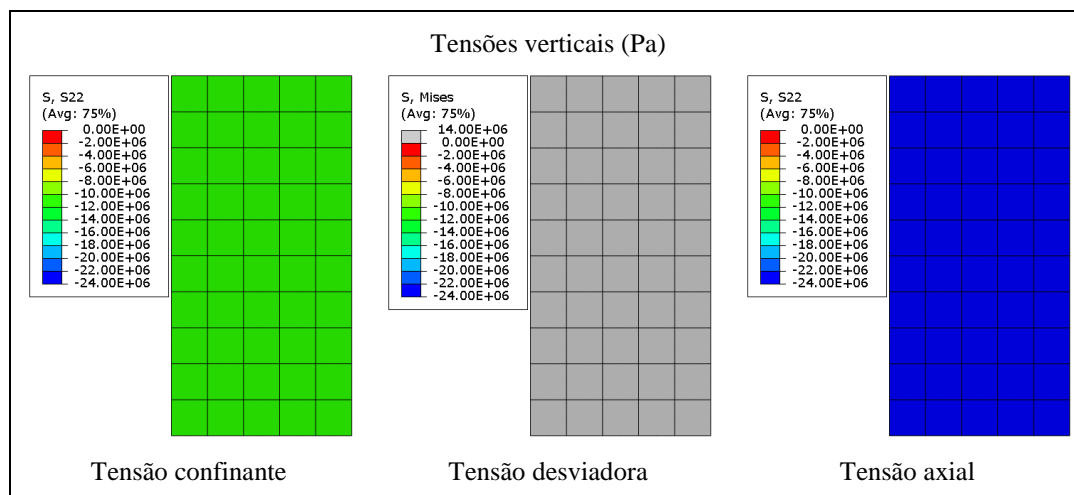


Figura 4.4 – Ensaio Triaxial de Fluência – Tensões axiais (Pa).

A Figura 4.5 mostra os deslocamentos verticais (axiais) da amostra após cada etapa do ensaio, na configuração deformada. São mostrados os deslocamentos iniciais, devidos ao confinamento – são funcionalmente nulos. Em seguida, são mostrados os deslocamentos imediatamente após a aplicação da tensão desviadora. Entende-se que nessa etapa, a amostra reage elasticamente. Finalmente, são apresentados os deslocamentos ao término do ensaio de fluência.

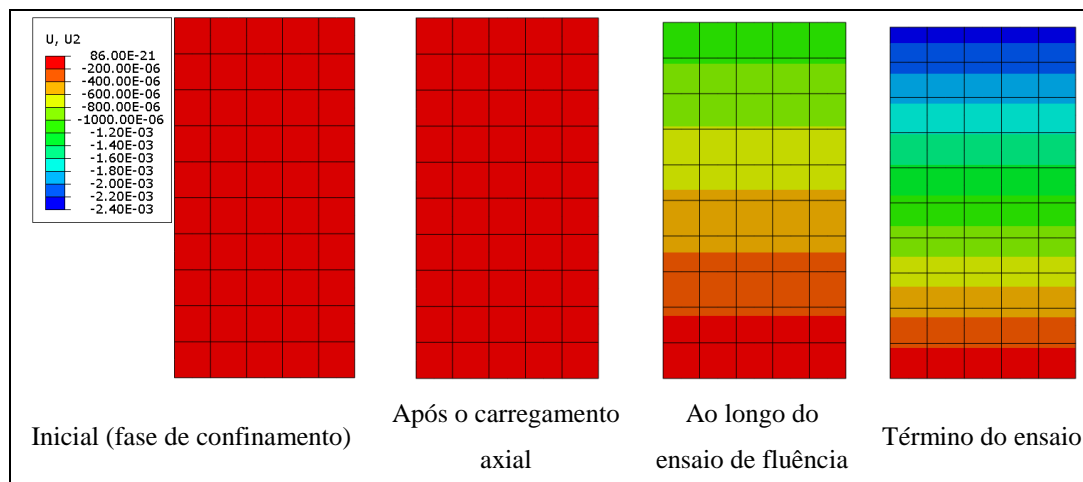


Figura 4.5 – Ensaio Triaxial de Fluência – Deslocamentos axiais (m).

Para as análises em halitas brasileiras, os corpos de prova para ensaios têm 7,0 polegadas (17,6 cm) de comprimento e 3,5 polegadas (8,8 cm) de diâmetro (Poiate Jr., 2012). Na simulação numérica, considerando-se a axissimetria e a simetria em relação à meia altura, os corpos de prova têm 8,8 cm de comprimento e 4,4 cm de raio. Foram gerados modelos de elementos finitos de 181 nós e 50 elementos CAX8R, conforme mostrado na Figura 4.6.

Nos ensaios em halitas da porção *on-shore* do Golfo do México, provenientes dos campos *West Hackberry* e *Big Hill*, foram considerados corpos

de prova de 8,25 polegadas (21 cm) de comprimento e 4,0 polegadas (10,8 cm) de diâmetro (Wawersik *et al.*, 1980). Os modelos numéricos correspondentes têm 10,5 cm de comprimento e 5,4 cm de raio. O modelo de elementos finitos tem 253 nós e 72 elementos CAX8R, conforme mostra a Figura 4.7.

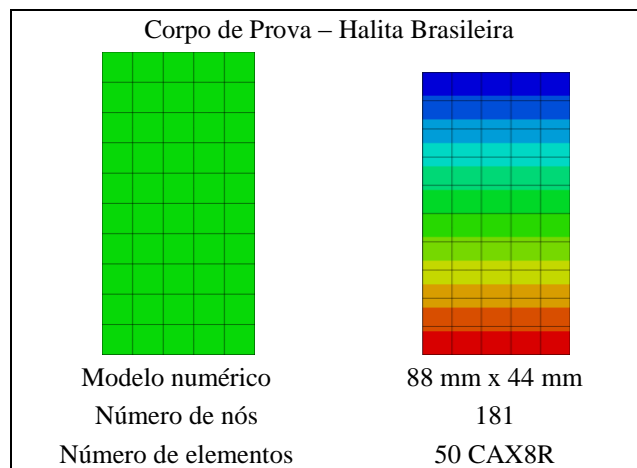


Figura 4.6 – Especificações do modelo numérico da amostra da halita brasileira.

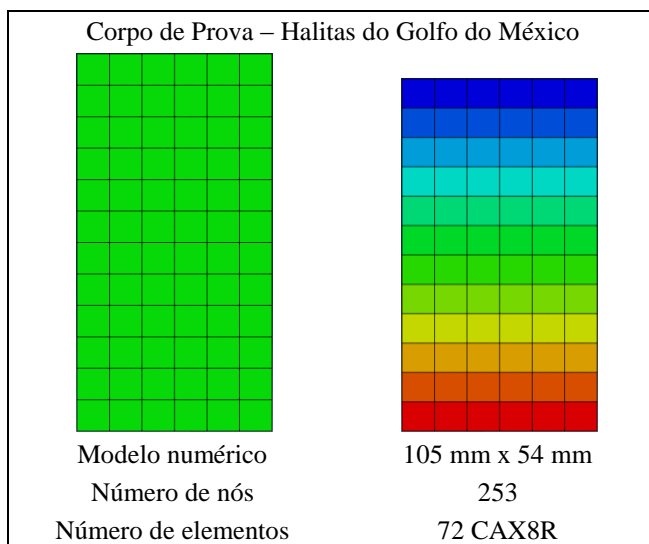


Figura 4.7 - Especificações do modelo numérico da amostra das halitas da porção *on-shore* do Golfo do México.

A primeira análise, com o intuito de aferir o funcionamento da sub-rotina em FORTRAN para utilização do Modelo de Duplo Mecanismo, é a reprodução da modelagem de um ensaio triaxial apresentada por Costa *et al.* (2005), realizada em halita brasileira, com temperatura constante de 86°C. A duração do ensaio é de 1000 horas. Inicialmente, a amostra é confinada isotropicamente com tensão confinante de 10MPa. A seguir, é imposta uma tensão desviadora de 14 MPa, em estágio único. O novo estado de tensão é mantido e a amostra inicia o alívio de tensões por fluência.

A Figura 4.8 apresenta a amostra sintética. É mostrado o confinamento horizontal e vertical da amostra. Por fim, é mostrado o deslocamento axial ao término do ensaio.

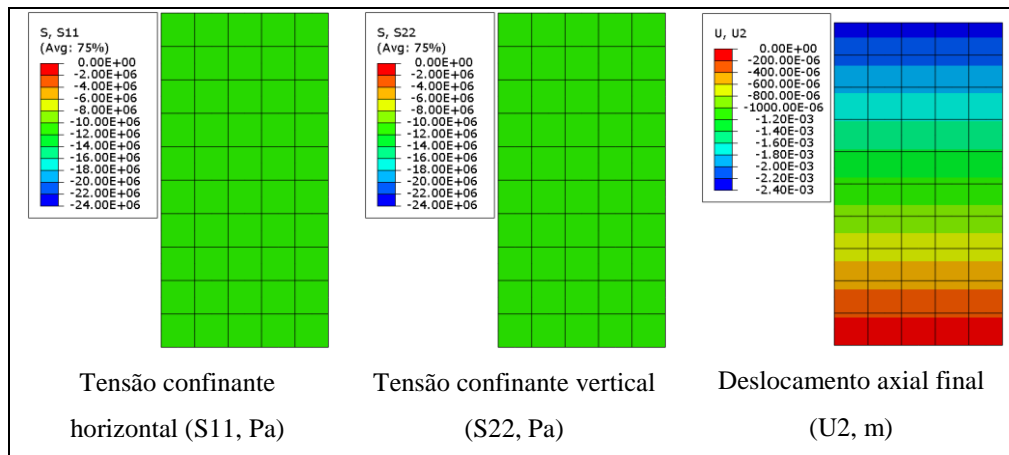


Figura 4.8 – Etapas da simulação do ensaio triaxial de fluência em halita brasileira.

A Figura 4.9 apresenta as curvas de fluência do ensaio em questão. São exibidos pontos experimentais e as simulações realizadas pelo programa ANVEC® (Costa, 1984) e pelo autor desta dissertação, adotando o ABAQUS®.

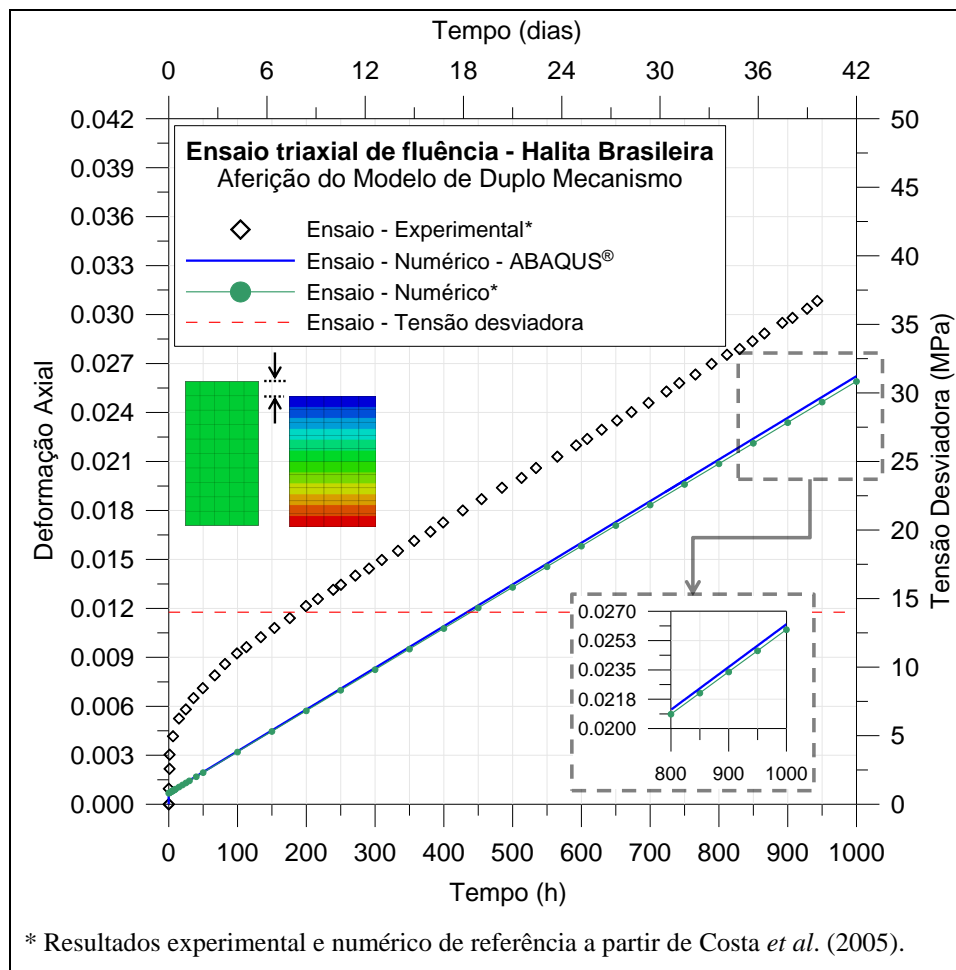


Figura 4.9 – Simulação de ensaio triaxial de fluência em halita brasileira.

Entende-se que a diferença de inclinação entre a reta obtida com o ABAQUS® e a apresentada pelo programa ANVEC® em Costa *et al.* (2005) é devida a diferenças entre *solver's*. A deformação final estimada pelo ANVEC® foi de 0.025899, contra 0.026217 obtido pelo ABAQUS®, resultando em uma diferença relativa de 1,21% em 1000 horas de simulação, que pode estar associada a efeitos de não linearidade geométrica (que não foi considerada em ambos os programas).

A seguir, foram reproduzidas três modelagens de ensaios triaxiais de fluência apresentadas por Munson (1999), em halitas americanas da porção *on-shore* do Golfo do México. O objetivo destas modelagens é aferir o funcionamento da sub-rotina em FORTRAN para utilização do Modelo de Multi Mecanismo. Os ensaios de interesse são os das amostras do *West Hackberry Salt* e *Big Hill Salt*, tendo visto sua semelhança em termos de mobilidade (fluência) com a halita brasileira (Poiate Jr., 2012).

Os ensaios do *West Hackberry Salt* são de carregamento axial, estágio único e temperatura constante. As durações, tensões desviadoras e temperaturas de cada ensaio são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Especificações do ensaio triaxial de fluência em halita americana do *West Hackberry Salt* (Munson, 1999).

Ensaio triaxial de fluência - <i>West Hackberry Salt</i>			
Ensaio	Duração (h)	Tensão Desviadora (MPa)	Temperatura (°C)
WH1	475	20,4	22
WH2	263	20,0	80
WH3	262	20,0	22
WH4	72	19,9	80

A Figura 4.10 apresenta a tensão desviadora e os deslocamentos axiais ao término do ensaio nos modelos numéricos.

A Figura 4.11 apresenta as curvas de fluência dos ensaios. São mostrados os pontos experimentais e as simulações realizadas por Munson (1999) e pelo autor, adotando o ABAQUS®. Foi verificada uma excelente convergência com a solução de numérica de referência.



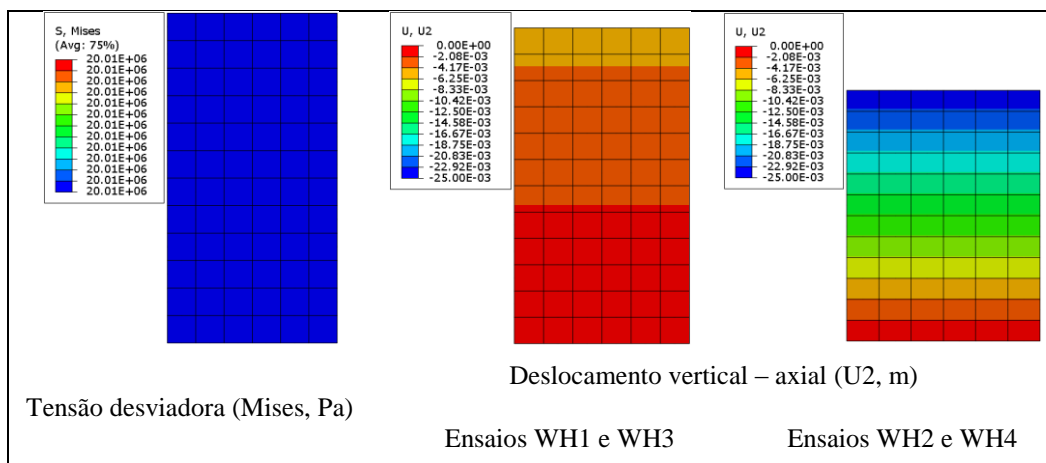


Figura 4.10 – Simulação do ensaio triaxial de fluência em halita americana do *West Hackberry Salt*.

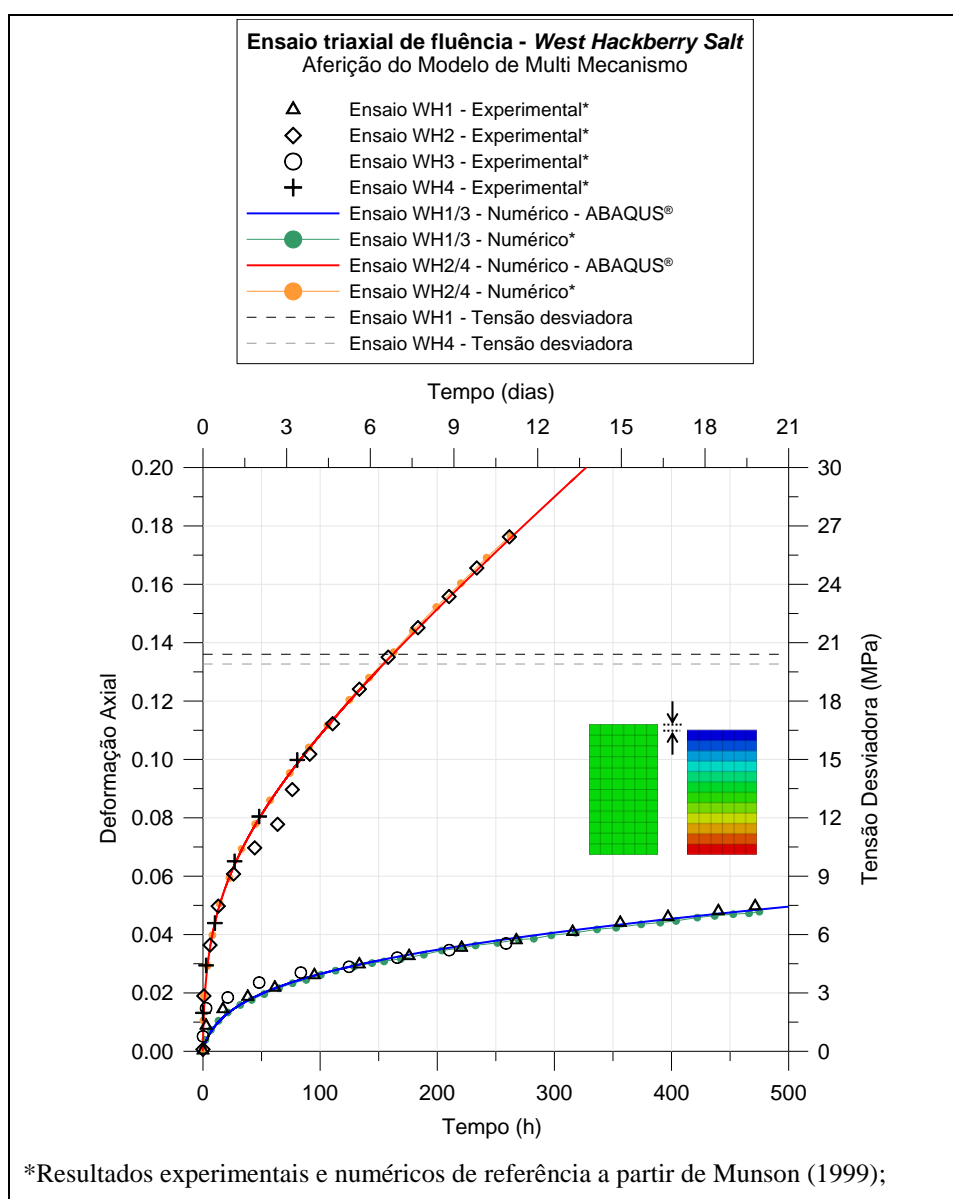


Figura 4.11 – Simulação de ensaio triaxial de fluência em halita americana do *West Hackberry Salt*.

O ensaio do *Big Hill Salt* é um ensaio de carregamento axial, com múltiplos estágios e temperatura variável. As durações, tensões desviadoras e temperaturas de cada estágio são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Especificações do ensaio triaxial de fluência em halita americana do *Big Hill Salt* (Munson, 1999).

Ensaio triaxial de fluência – <i>Big Hill Salt</i> – Ensaio BH1			
Estágio	Duração (h)	Tensão Desviadora (MPa)	Temperatura (°C)
1	370	14,9	60
2	70	15,0	80
3	934	15,1	60
4	243	17,9	60

A Figura 4.12 apresenta o deslocamento axial da amostra ao longo do ensaio: deslocamentos iniciais (funcionalmente nulos) após o confinamento, imediatamente após o início do 1º, 2º, 3º e 4º estágios e o deslocamento final, ao término do ensaio.

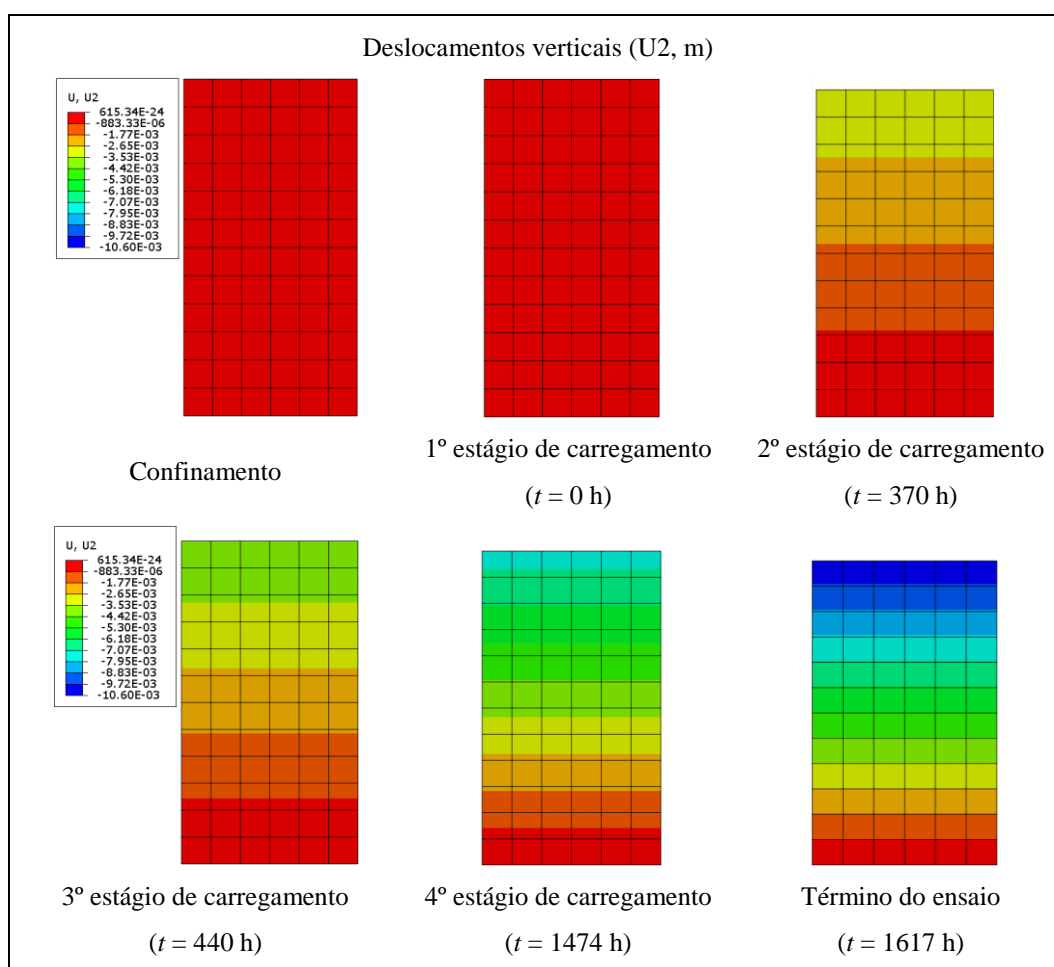


Figura 4.12 – Deslocamento axial (U2, m) da amostra ao longo dos estágios do ensaio.

A Figura 4.13 apresenta as curvas de fluência do ensaio. São mostrados os pontos experimentais e as simulações realizadas por Munson (1999) e pelo autor, adotando o ABAQUS®.

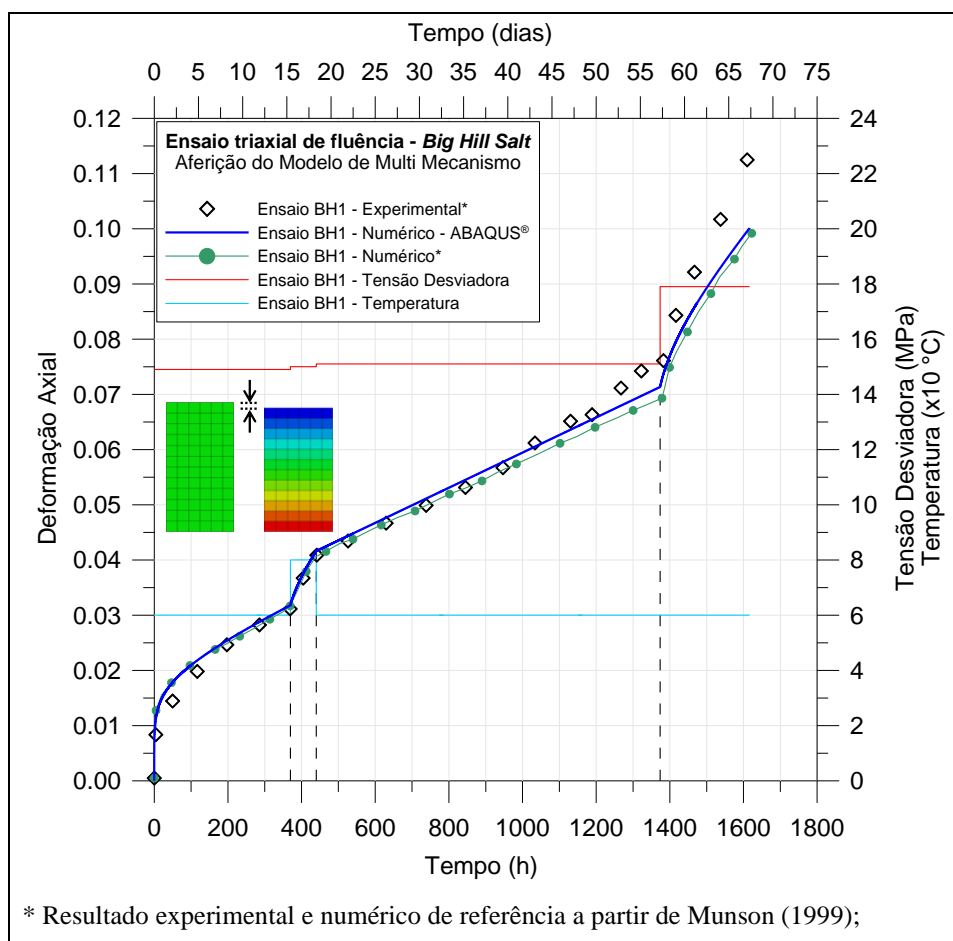


Figura 4.13 – Simulação de ensaio triaxial de fluência em halita americana do *Big Hill Salt*.

As curvas de fluência obtidas com o ABAQUS® ficaram muito próximas das apresentadas por Munson (1999). As diferenças podem ser atribuídas às peculiaridades de cada *solver* e ao acúmulo de erro devido ao processo explícito de integração do parâmetro  $\zeta$ , a cada iteração. Todavia, conforme apresentado, tais diferenças não têm magnitude relevante.

#### 4.2.2. Modelo sintético de poço – fechamento diametral

##### 4.2.2.1. Introdução

A modelagem para análises de fechamento de poço e integridade de revestimentos pode ser realizada por meio de modelos axissimétricos, em meios em que existe simetria ao redor de um eixo ou bidimensionais, naqueles que podem ser representados por uma seção transversal. Esses modelos representam

grande economia computacional e, se bem empregados, usualmente conduzem a bons resultados – conservadores, porém usualmente mantendo a mesma ordem de grandeza dos resultados obtidos por modelos tridimensionais.

Naturalmente, modelos 2D cobrem uma gama limitada de cenários possíveis de poços, litologia e condições construtivas. Poços inclinados, direcionais e bilaterais, bem como determinadas imperfeições exigem modelos tridimensionais. Entretanto, para a compreensão geral do meio, análises globais, estimativas de projeto e validações, modelos 2D são extremamente úteis e céleres.

Modelos axissimétricos de poço podem ser feitos considerando-se a simetria ao redor de seu eixo, ou seja, uma simetria longitudinal. Modelos bidimensionais podem ser empregados quando o foco não está no comportamento geral do poço na litologia, mas em uma determinada cota, sendo possível considerar a simetria transversal, perpendicular ao eixo do poço, assim como uma seção-tipo de qualquer obra linear, tal qual uma barragem, uma estrada ou túnel.

Nos casos mais gerais de obras lineares, pode-se adotar a hipótese simplificadora de um estado plano de deformações. Já no caso do poço, no qual as condições de carregamento e geotérmicas são dependentes da profundidade, tem-se um estado “pseudo-plano” de deformações<sup>15</sup> (EPPD). A seção transversal não é típica do poço como um todo, mas sim daquela faixa de profundidade.

#### **4.2.2.2. Especificações dos modelos**

Para apresentação da metodologia para análises de fechamento de poço<sup>16</sup>, bem como para aferição das sub-rotinas dos modelos constitutivos para uso no ABAQUS®, foram adotadas as especificações dos modelos sintéticos A1 e A2 apresentados na dissertação de mestrado de Giancarlo Gonçalves (Gonçalves, 2011), da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

Entende-se que estes modelos reproduzem o problema geomecânico de modo didático e representativo. Com o objetivo de aferir a sub-rotina do Modelo

---

<sup>15</sup> Optou-se por utilizar as terminologias “seção transversal” e “estado pseudo-plano de deformações”, uma vez que o estado de tensão, a temperatura e, consequentemente, o comportamento à fluência irão variar com a cota da seção. Embora a dimensão longitudinal do poço seja muito maior do que seu raio de influência transversal, o fato de que o carregamento tem componente e varia longitudinalmente, bem como a temperatura, faz com que a seção transversal do poço não caracterize, por definição, um estado plano de deformações.

<sup>16</sup> Análise de estabilidade de poço.

de Duplo Mecanismo, foram empregadas as mesmas propriedades pelo autor citado. Trata-se de uma análise de fechamento do sal; o poço não é revestido.

A Tabela 4.3 apresenta as especificações dos modelos sintéticos.

Tabela 4.3 – Especificações dos modelos sintéticos de poço (Gonçalves, 2011).

Modelo	A1	A2
Altura da lâmina d'água (m)	750	1125
Cota do topo do sal (m)	-1750	-2875
Cota da base do sal (m)	-1850	-2975
Cota de controle de resultados <sup>17</sup> (m)	-1800	-2925

É considerado um intervalo de 100 metros de maciço salino ideal, composto por halita homogênea. O poço tem diâmetro nominal de 12,25 polegadas ( $\approx 31,12$  cm) e o peso do fluido de perfuração tem peso específico 10,0 lb/gal ( $\approx 11,75$  kN/m<sup>3</sup>). Os bordos do modelo situam-se a 25 metros do eixo do poço.

A Figura 4.14 ilustra esquematicamente os modelos sintéticos na estratificação típica do pré-sal brasileiro, demonstrando a representatividade das análises.

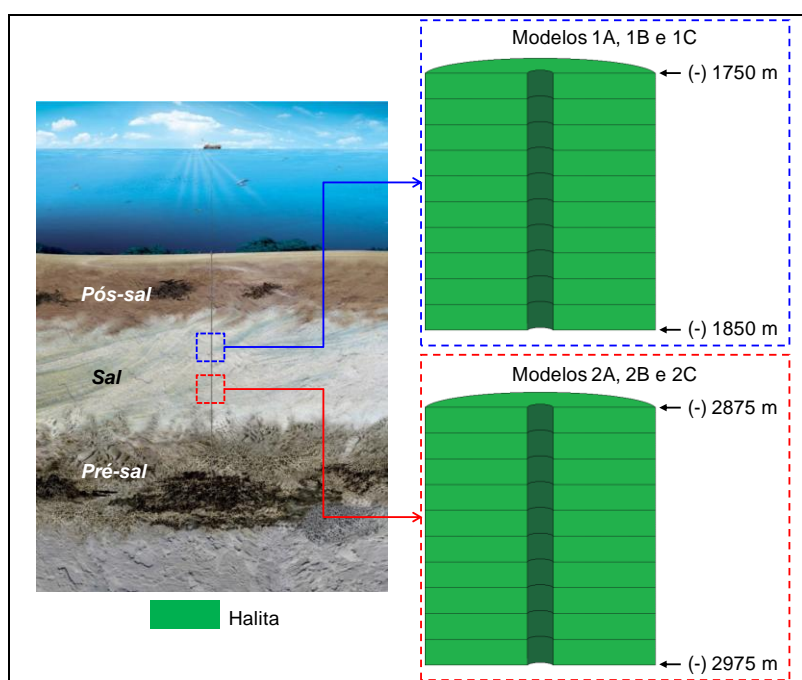


Figura 4.14 – Representação dos modelos sintéticos. Adaptação a partir do perfil representativo do pré sal (Christante, 2009).

<sup>17</sup> Doravante, cota A.

#### 4.2.2.3. Condições iniciais

O carregamento geostático procura prescrever no modelo geomecânico o estado inicial de tensões do maciço *in situ*, em repouso, antes de sofrer qualquer perturbação. A litologia sobrejacente ao sal (aqui denominada Pós-sal) é considerada homogênea para fins mecânicos.

O cálculo das tensões verticais totais ( $\sigma_v$ ) é simplificado ao assumir que o sal não sofre efeito de compactação, consistindo no acúmulo de sobrecarga devido às camadas sobrejacentes, conforme a expressão (4.2).

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^j \gamma_i \Delta z \quad (4.2)$$

onde  $\gamma_i$  é o peso específico de cada camada e  $\Delta z$  a respectiva espessura. Não havendo poropressão em corpos salinos, as tensões efetivas são iguais às totais.

Foi considerado um coeficiente de tensões horizontais efetivas unitário. Para uma rocha salina ideal, a hipótese de isotropia de tensões é aceitável. Em litologias com estratificação marcante, a tensão horizontal ( $\sigma_h$ ) pode ser ligeiramente superior à vertical.

No campo, a temperatura é relacionada com a profundidade através de gradientes geotérmicos. A taxa de crescimento varia de acordo com o tipo de rocha, sendo particularmente baixa nas rochas salinas. Nesta pesquisa, o efeito de crescimento da temperatura foi assumido linear. De modo simplificado, esse crescimento linear foi representado por uma superposição de crescimentos constantes, isto é, a temperatura foi considerada constante em cada camada (Poiate Jr. *et al.*, 2006) – valores calculados na cota das respectivas bases, considerando sempre o maior valor dos intervalos de temperatura (topo e base) como constante em cada camada. A temperatura em cada camada será dada pela expressão (4.3):

$$T_{sal} = TFM + GTPOS(z_{POS}) + GTS(z_{sal} - z_{POS}) \quad (4.3)$$

onde  $T_{sal}$  é o valor da temperatura a ser considerada na camada,  $TFM$  é a temperatura considerada no fundo do mar,  $GTPOS$  é o gradiente geotérmico no pós-sal,  $z_{POS}$  é a espessura do pós-sal,  $GTS$  é o gradiente geotérmico no sal e  $z_{sal}$  é a cota camada salina. Ressalta-se que as cotas têm como datum o nível do mar.

Os estados iniciais de tensão calculados a partir da equação (4.2) e as temperaturas calculadas a partir da equação (4.3) são apresentados na Figura 4.15.

Foram considerados os mesmos gradientes geotérmicos adotados por Gonçalves (*op. cit.*).

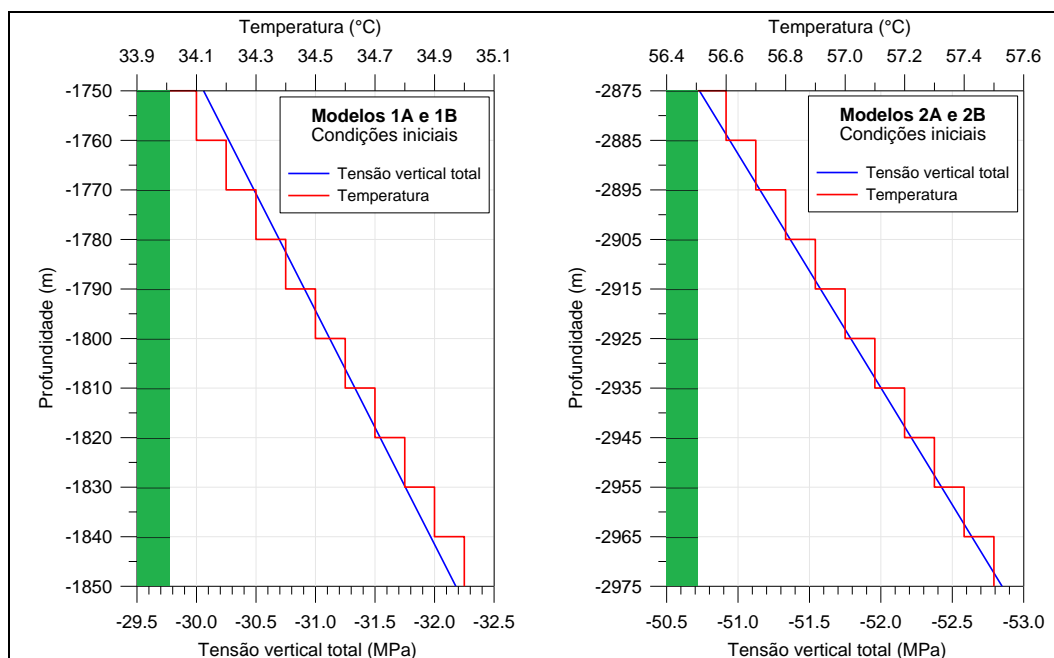


Figura 4.15 – Condições iniciais dos modelos 1A, 1B, 2A e 2B.

#### 4.2.2.4. Perfuração

Uma vez representado o maciço em repouso, com a aplicação das condições iniciais ao modelo geomecânico, inicia-se a simulação da perfuração.

A perfuração desenvolve-se ao longo de um determinado tempo, sua velocidade varia com o tipo de rocha. Costa *et al.* (2010) fornecem o valor de 10 m/h como referência para a velocidade de perfuração em rochas salinas. No caso de evaporitos duros como a anidrita, essa velocidade é menor.

Em termos de simulação numérica, a consideração da velocidade de perfuração, ou seja, a perfuração por etapas implica em alto custo computacional. Isso ocorre uma vez que novos desequilíbrios de tensões ocorrem no modelo na medida em que cada grupo de elementos é removido, simulando o trecho perfurado a cada etapa de perfuração. Indiscutivelmente, essa é a condição mais realista.

Uma alternativa prática é a consideração da perfuração instantânea, representando o caso mais crítico no qual um grande desequilíbrio de tensões laterais é provocado pela remoção instantânea de todos os elementos correspondentes ao poço, gerando uma grande energia de deformação.

A principal diferença entre as duas considerações está na taxa de deformação (ou deslocamento) inicial no trecho perfurado – o que pode provocar uma pequena diferença no resultado final de deformação, de pouca relevância para fins práticos. Modelos com perfuração instantânea podem apresentar resultados superiores de deformação.

À medida que a perfuração ocorre, o poço é preenchido pelo fluido de perfuração (ou lama de perfuração), com o objetivo de limitar a deformação do sistema, repondo parte do confinamento retirado. Assume-se que o maciço reage elasticamente ao desconfinamento devido à perfuração. A aferição da solução numérica nessa etapa foi feita com base na solução analítica de Kirsch (1898)<sup>18</sup>.

#### 4.2.2.5. Fluência

Após a reação elástica do maciço à perfuração, inicia-se a fase de fluência. O diferencial de tensões provocado pela perfuração é gradualmente reduzido, até que se atinja uma nova condição de equilíbrio. À medida que a análise avança no tempo, a tensão desviadora reduz-se gradualmente enquanto o material se deforma. Esse efeito é esperado, conforme o capítulo 2. O alívio de tensões (desviadoras) dissipa a energia de deformação gerada pela perturbação de engenharia.

Deseja-se avaliar o fechamento do poço, ou seja, o fechamento diametral ( $\delta$ ) do mesmo. Este valor será o dobro do fechamento radial, que é exibido pelo programa de elementos finitos.

A partir do fechamento ( $\delta$ ), as taxas de fechamento ( $\dot{\delta}$ ) podem ser calculadas de modo explícito, considerando pequenos intervalos de tempo, conforme a expressão (4.4):

$$\dot{\delta} = \frac{\partial \delta}{\partial t} \approx \frac{\Delta \delta}{\Delta t} \quad (4.4)$$

A avaliação do fechamento do poço não revestido é extremamente importante, pois a instalação do revestimento metálico não ocorre imediatamente após a perfuração. Deve-se monitorar o fechamento do diâmetro, uma vez que instrumentos necessitarão transitar pelo poço.

---

<sup>18</sup> Apêndice B.



#### 4.2.2.6. Seção longitudinal

##### 4.2.2.6.1. Introdução

O primeiro tipo de modelagem de poços para aplicações em análises geomecânicas correspondente à seção longitudinal (axissimétrica) atravessando litologia salina. Naturalmente, essa seção é aquela que forma, por revolução, o modelo cilíndrico do poço real e de seu raio de influência. A consideração de que o poço e o revestimento (caso haja) são circulares é inerente a esse tipo de modelagem, assim como a cimentação do anular<sup>19</sup>, que ou é assumida total ou inexistente. Para os modelos longitudinais é adotada a nomenclatura da Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Nomenclatura dos modelos longitudinais (axissimétricos).

Modelo	Perfuração	Observação
1A	Instantânea	Equivalente ao modelo A1 de Gonçalves (2011)
1B	10 m/h	Dimensões e propriedades do modelo 1A
2A	Instantânea	Equivalente ao modelo A2 de Gonçalves (2011)
2B	10 m/h	Dimensões e propriedades do modelo 2A

A litologia representada foi dividida em 10 camadas de 10 metros de espessura, totalizando 100 metros. Essa divisão tem como objetivos aproximar a distribuição de temperatura ao longo da profundidade (Poiate *et al.*, 2006) e viabilizar perfuração por etapas, considerando a velocidade de perfuração típica de 10 m/h, conforme mencionado anteriormente. A Tabela 4.5 apresenta a litologia considerada nos modelos 1A e 1B.

Tabela 4.5 – Litologia dos modelos sintéticos 1A e 1B.

Camadas	Topo (m)	Base (m)	Espessura (m)
Lâmina d'água	0	-750	750
Pós-Sal	-750	-1750	1000
<b>Halita</b>	-1750	-1850	100

Similarmente, a Tabela 4.6 apresenta a litologia considerada nos modelos 2A e 2B.

<sup>19</sup> Espaço entre a parede do poço e o revestimento ou entre revestimentos.

Tabela 4.6 – Litologia dos modelos sintéticos 2A e 2B.

Camadas	Topo (m)	Base (m)	Espessura (m)
Lâmina d'água	0	-1125	1125
Pós-Sal	-1125	-2875	1750
Halita	-2875	-2975	100

#### 4.2.2.6.2. Modelo geomecânico e condições de contorno

Os modelos longitudinais (axissimétricos) são compostos por 13400 elementos CAX8R e 40735 nós. Para a discretização longitudinal, foram adotados 2 elementos por metro. Na direção transversal, 67 elementos, sendo um para o material a ser perfurado e os 66 restantes da parede do poço até a borda externa. A razão entre o primeiro elemento da parede do poço e o último elemento, na borda externa, vale aproximadamente 120.

A Figura 4.16 detalha o modelo geomecânico adotado.

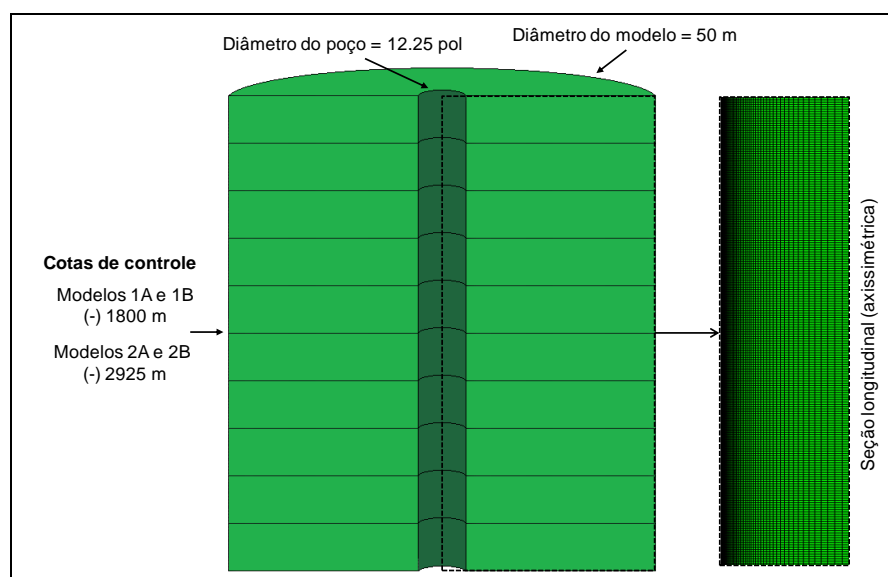


Figura 4.16 – Modelos geomecânicos 1A, 1B, 2A e 2B.

Com relação às condições de contorno, a borda esquerda do modelo (eixo do poço e de simetria do modelo) e a borda direita, afastada do poço (continuidade do maciço) têm os deslocamentos horizontais restringidos. A base tem os deslocamentos verticais restringidos. Quanto ao topo, duas configurações foram avaliadas.

A primeira configuração é mostrada na Figura 4.17, antes e depois da perfuração do poço.

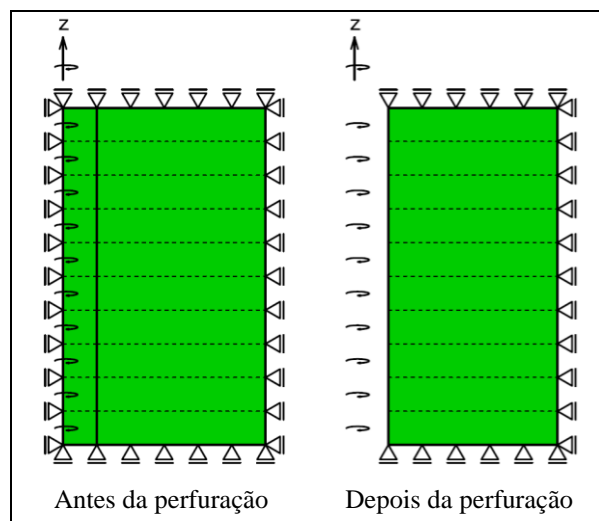


Figura 4.17 – Condições de contorno do modelo longitudinal – configuração com o topo restringido.

Nessa configuração, o topo tem os deslocamentos verticais restringidos, o que pode ser justificado pelo fato de que o modelo retrata uma parte do maciço. Consequentemente, o topo do modelo não representa o topo do maciço, mas sim a litologia sobrejacente. Essa configuração, acrescida da restrição vertical na borda direita, é usualmente empregada em análises geomecânicas de alguns autores brasileiros (Costa, *op. cit.*; Poiate Jr. *op. cit.*; Gonçalves, *op. cit.*).

Por outro lado, na segunda configuração, mostrada na Figura 4.18 para os mesmos instantes, o topo permanece livre.

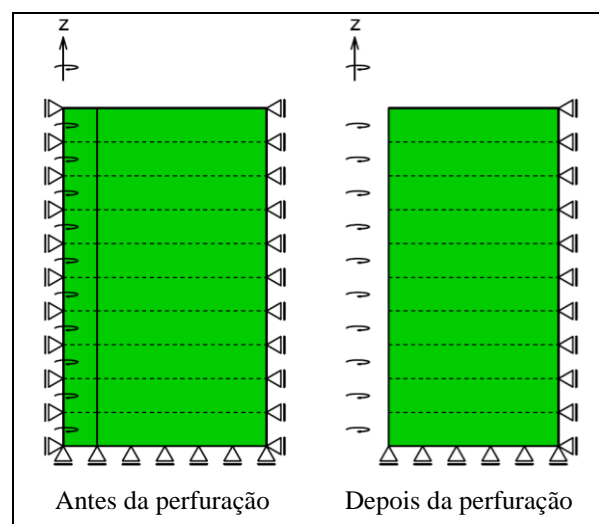


Figura 4.18 – Condições de contorno do modelo longitudinal – configuração com o topo livre.

Essa configuração é típica em problemas geotécnicos de geometria e modelagem análogas, como análises de fundações profundas, túneis e cavernas. A não restrição ao deslocamento vertical no topo confere liberdade ao sistema. Com esse enfoque, entende-se que a rigidez inerente à interface do trecho modelado

com a litologia sobrejacente não deve ser considerada. O modelo é menos rígido do que o anterior (Figura 4.17).

Ambas as configurações são questionáveis quanto à simulação da deformabilidade do trecho do maciço do pré-sal, uma vez que a litologia sobrejacente não restringe completamente qualquer deslocamento vertical (não é completamente rígida), mas, evidentemente, sua grande espessura faz com que ela não deva ser omitida (não é inexistente).

Uma vez que a cota analisada esteja suficientemente afastada dos apoios, os efeitos de borda inerentes a qualquer das configurações exercerão pouca (ou nenhuma) influência nos resultados. A condição isotrópica de tensões também pode ser responsável pela indiferença quanto ao topo livre ou restringido nos resultados. No caso de uma anisotropia de tensões iniciais, o próprio carregamento geostático iria impor tensões desviadoras ao modelo e os resultados poderiam sofrer influência de uma configuração ou de outra.

#### 4.2.2.6.3. Condições iniciais

A metodologia adotada para imposição do estado inicial de tensões apresentado na Figura 4.15 ao modelo geomecânico no ABAQUS® é dividida em duas etapas, conforme mostra a Figura 4.19. Naturalmente, em outros programas, a metodologia para imposição do estado de tensão inicial pode ser diferente.

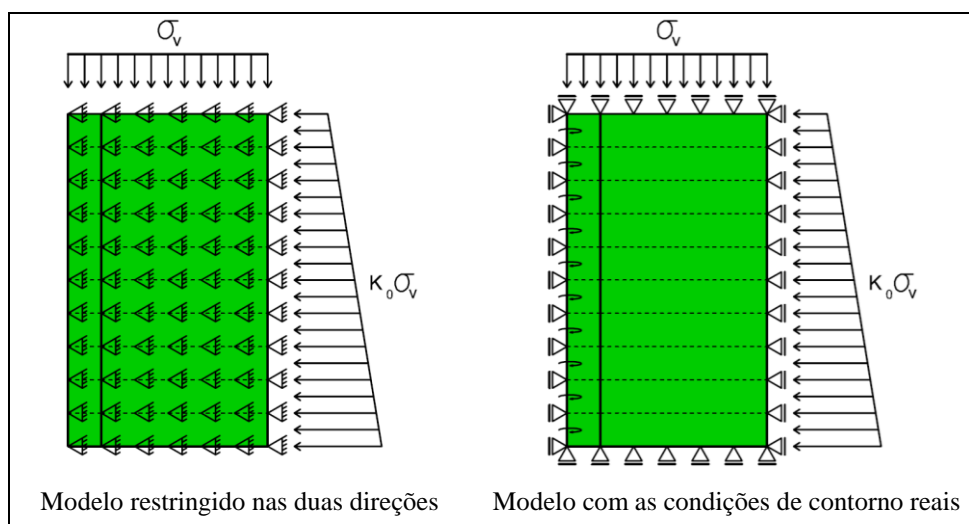


Figura 4.19 – Imposição das condições iniciais ao modelo longitudinal.

Inicialmente, o carregamento geostático é aplicado ao modelo com todos os nós impedidos de se deslocarem nas duas direções. As reações de apoio nodais são exportadas do programa. A seguir, são aplicadas as condições de contorno

reais e as reações de apoio obtidas são aplicadas aos respectivos nós como cargas concentradas. Dessa forma, garante-se que o estado inicial de tensões no modelo geomecânico não provoca deslocamentos iniciais. Esse procedimento foi apresentado por Bostrom & Skomedal (2004) e adotado recentemente, com sucesso, por Rueda (2013).

As temperaturas apresentadas na Figura 4.15 são aplicadas ao modelo geomecânico como parâmetro do modelo constitutivo de fluência por camada.

Foi adotada a configuração de condições de contorno com o topo restringido. A seguir, são mostrados o estado de tensões iniciais prescrito e os deslocamentos verticais iniciais, funcionalmente nulos, nos modelos 1A e 1B (Figura 4.20) e nos modelos 2A e 2B (Figura 4.21).

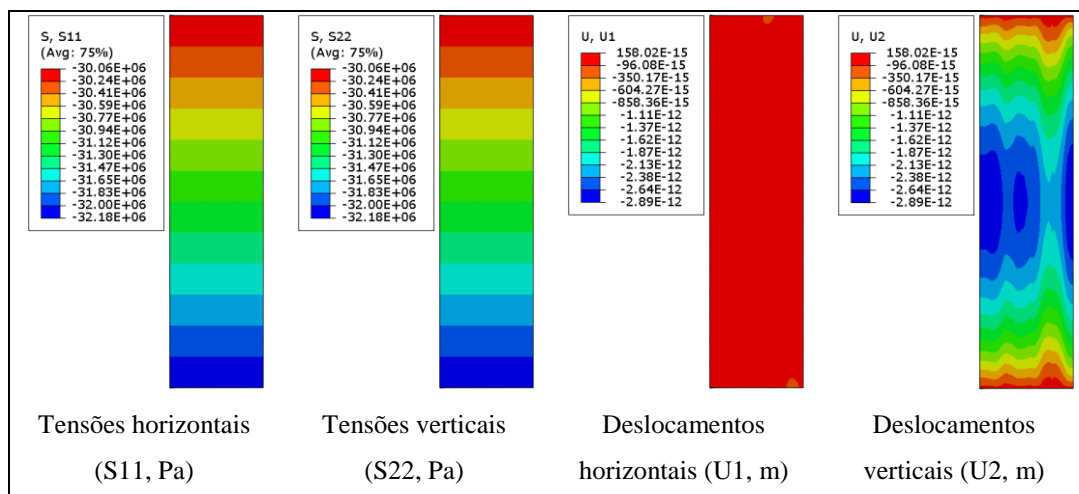


Figura 4.20 – Modelos sintéticos 1A e 1B – Condições iniciais do modelo longitudinal.

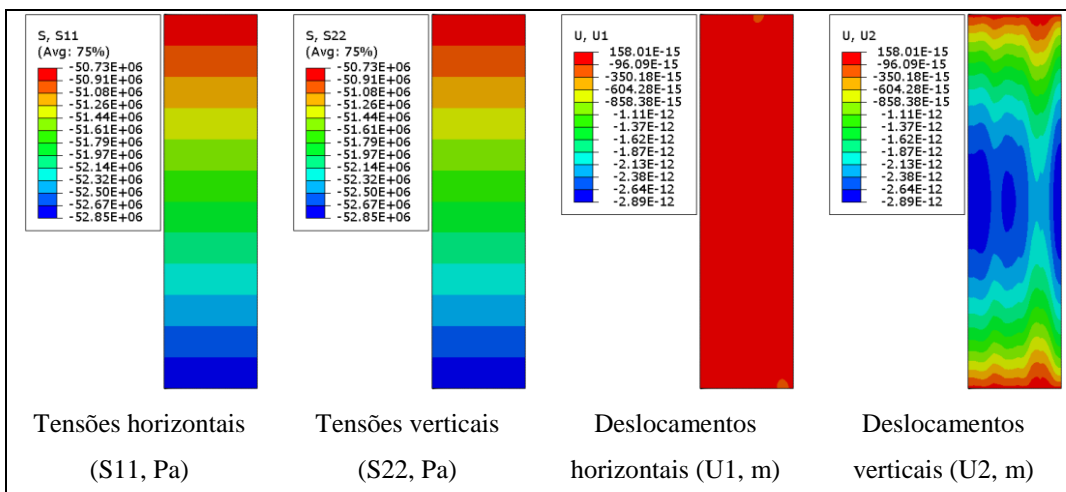


Figura 4.21 – Modelos sintéticos 2A e 2B – Condições iniciais do modelo longitudinal.

#### 4.2.2.6.4. Perfuração

A Figura 4.22 mostra a representação da perfuração no modelo de elementos finitos. Em uma única etapa ou nas etapas de perfuração, os elementos correspondentes ao material removido pela coluna de perfuração são desativados e simultaneamente a pressão devida ao fluido de perfuração é imposta à parede do poço.

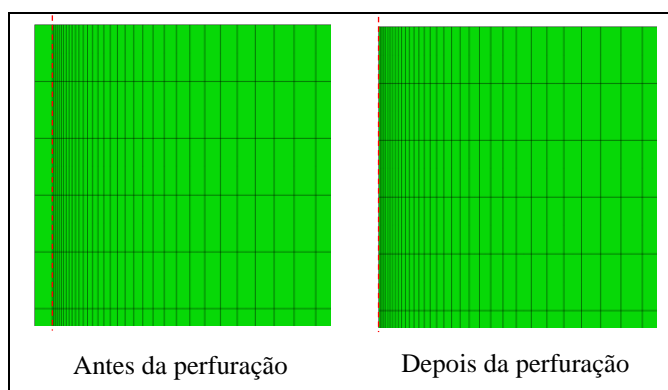


Figura 4.22 - Detalhe para a perfuração em modelos longitudinais.

A Figura 4.23 e a Figura 4.24 apresentam respectivamente os contornos de deslocamento horizontal e tensão equivalente (desviadora) dos modelos 2A e 2B<sup>20</sup>. Poucas diferenças são verificadas nos contornos, senão quando próximo à base do trecho perfurado.

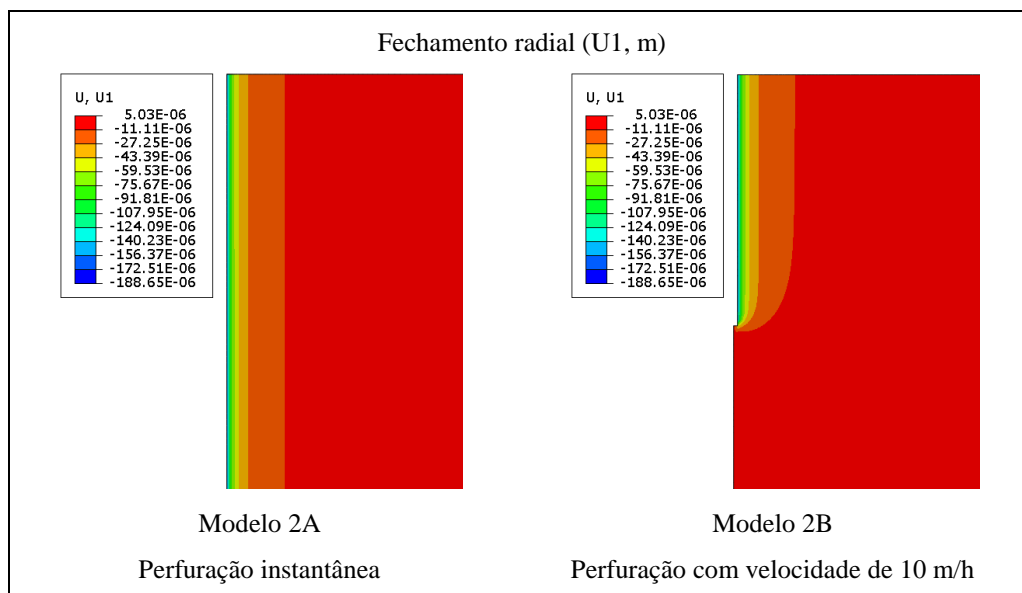


Figura 4.23 – Fechamento radial por deformação elástica após a perfuração entre as cotas -2875 e -2885 m.

<sup>20</sup> Neste item, somente são apresentados as saídas gráficas dos resultados do modelo 2A, por estar associado a níveis de tensão superiores ao modelo 1A, ressaltando os efeitos a serem exibidos.

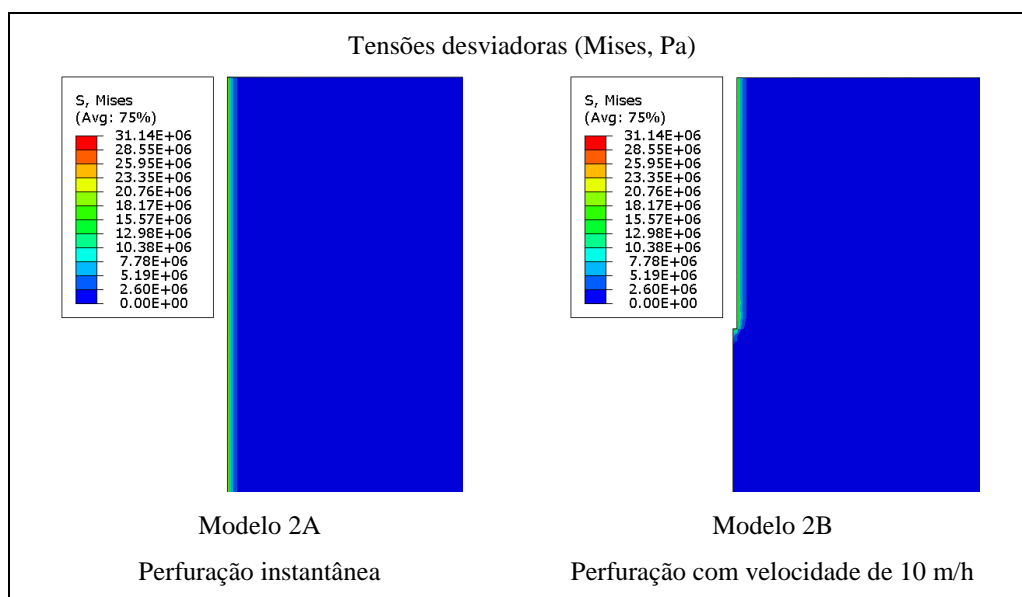


Figura 4.24 – Tensões desviadoras na reação elástica à perfuração a perfuração entre as cotas - 2875 e -2885 m.

Com o intuito de aferir a solução elástica obtida pelo ABAQUS®, delimitou-se a seção AB, correspondente à faixa central de elementos do modelo, onde A é a parede do poço e B é borda do modelo, conforme mostra a Figura 4.25.

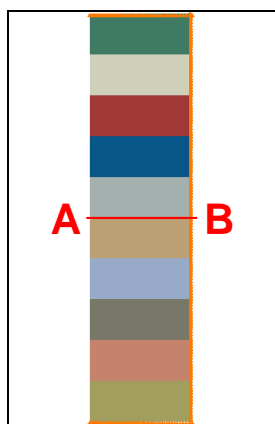


Figura 4.25 – Seção média (AB) do modelo geomecânico para validação das tensões na fase elástica.

A Figura 4.26 mostra os contornos da tensão radial no entorno da seção AB, tanto para o modelo com perfuração instantânea quanto para o modelo com perfuração por etapas.

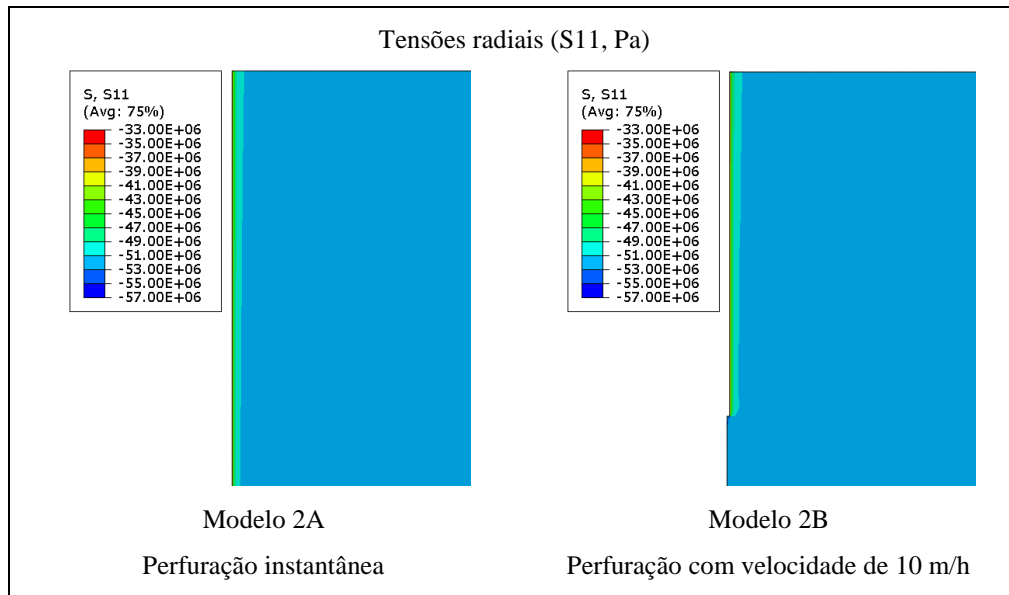


Figura 4.26 – Tensões radiais no entorno da seção AB.

Similarmente, a Figura 4.27 mostra os contornos da tensão tangencial no entorno da seção AB para os mesmos modelos.

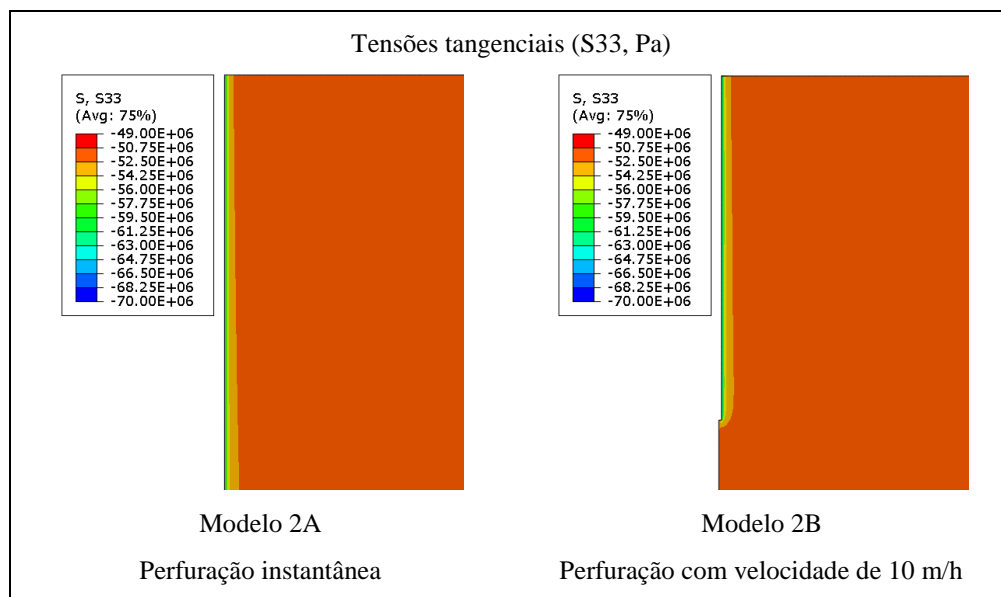


Figura 4.27 – Tensões tangenciais no entorno da seção AB.

As tensões radial e tangencial dos modelos 1A e 2A obtidas pelo método dos elementos finitos foram extrapoladas dos pontos de integração para os nós da seção AB e plotadas junto com os valores analíticos, ao longo da coordenada radial normalizada em relação ao raio do poço. Verifica-se que após cerca de 20 vezes o raio do poço, o estado de tensões retoma a condição hidrostática, conforme mostram a Figura 4.28 e a Figura 4.29.



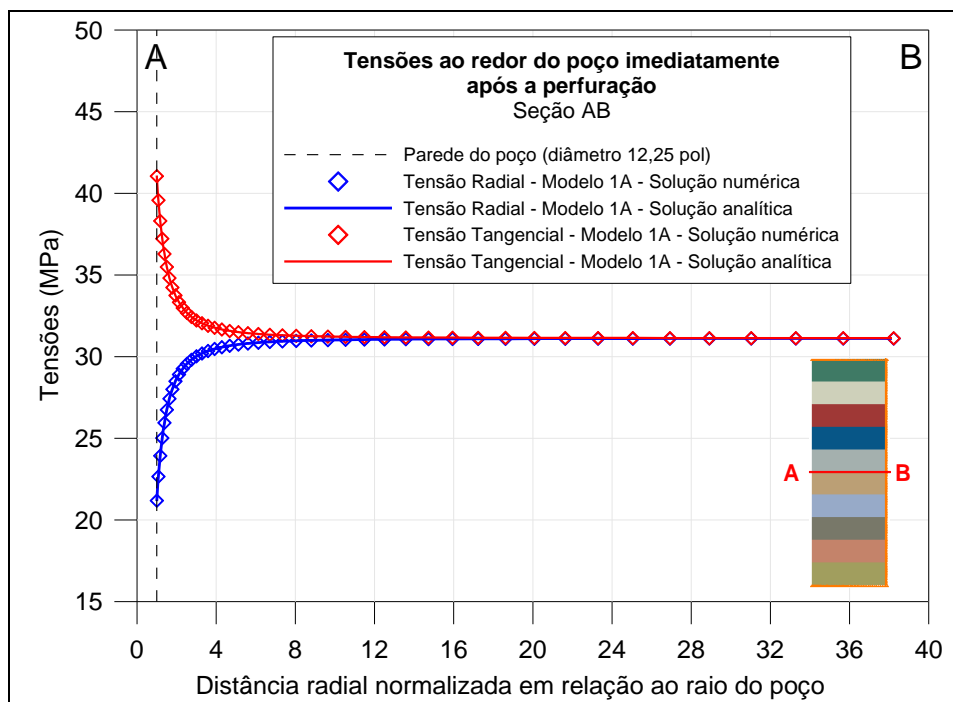


Figura 4.28 – Tensões ao redor do poço imediatamente após a perfuração do entorno da seção AB do modelo 1A – cota -1800 m.

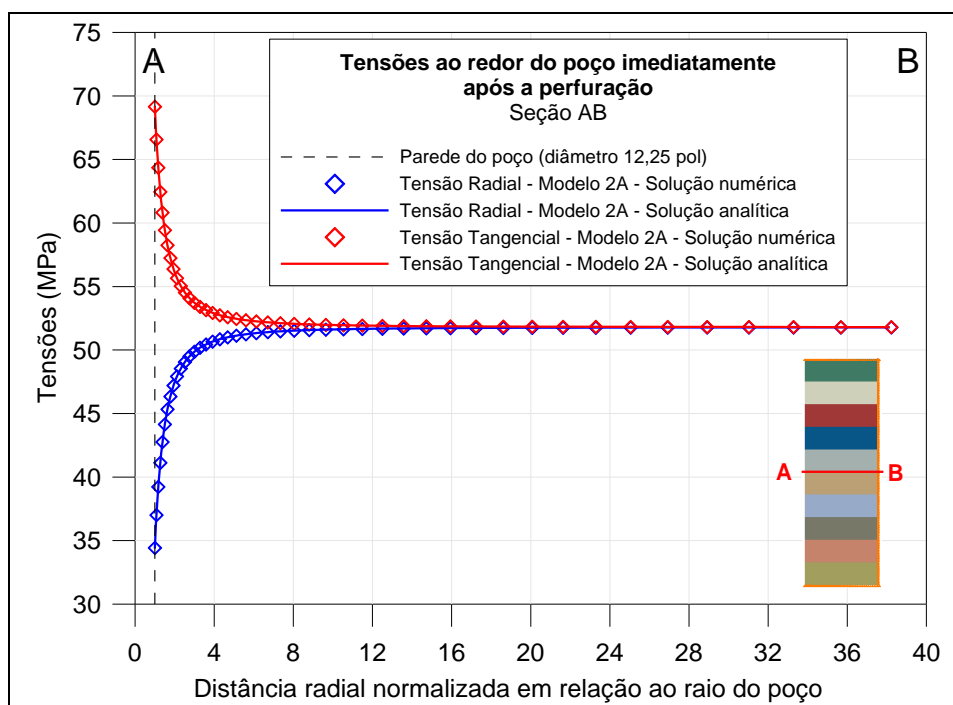


Figura 4.29 – Tensões ao redor do poço imediatamente após a perfuração do entorno da seção AB modelo 2A – cota -2925 m.

#### 4.2.2.6.5. Fluência

Nos modelos em questão, a medição para estimativa do fechamento radial do poço é o deslocamento horizontal do nó central da parede do poço, situado no

meio da espessura do trecho modelado. Normalmente, é preferível controlar os nós centrais de camadas moveis do que os extremos, evitando-se efeitos de borda ou de transição de camadas.

A Figura 4.30 apresenta os históricos de fechamento diametral do poço ao longo de 480 horas de fluência dos modelos 1A e 2A. Para aferição da sub-rotina do Modelo de Duplo Mecanismo, foram plotadas no mesmo espaço as soluções numéricas dos modelos A1 e A2 de Gonçalves (2011)<sup>21</sup>. Como pode ser verificado, foi possível reproduzir quase exatamente a solução numérica apresentada por Gonçalves (2011), verificando-se o funcionamento da sub-rotina do Modelo de Duplo Mecanismo.

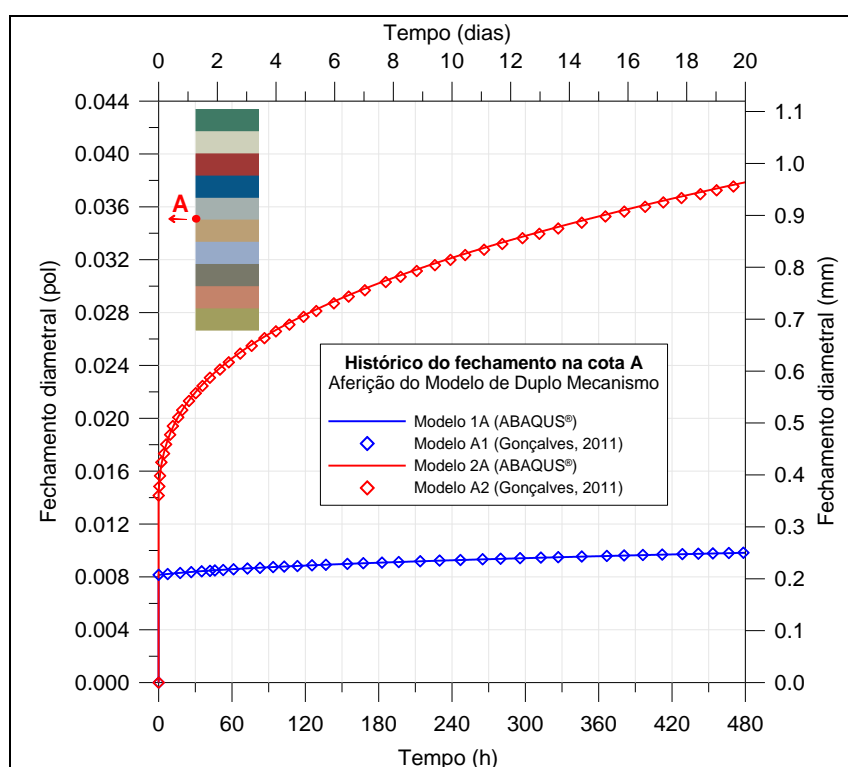


Figura 4.30 – Histórico do fechamento diametral na cota A dos modelos 1A e 2A.

A seguir, foi avaliado o efeito da velocidade de perfuração nos históricos de fechamento diametral do poço, com base nos resultados obtidos considerando a perfuração instantânea. Na Figura 4.31, é possível verificar que a consideração da velocidade de perfuração de 10 m/h conduziu a fechamentos ligeiramente inferiores, o que é teoricamente previsto (item 4.2.3.4).

<sup>21</sup> No trabalho de Gonçalves (2011), a fluência analisada com enfoque termomecânico e simulada a partir de implementações numéricas no ambiente MATLAB. O Modelo de Duplo Mecanismo foi empregado. As soluções isotérmicas desse autor (variação de temperatura = 0°C) podem ser empregadas como referencial numérico do presente estudo, que por definição também é isotermal em cada camada.

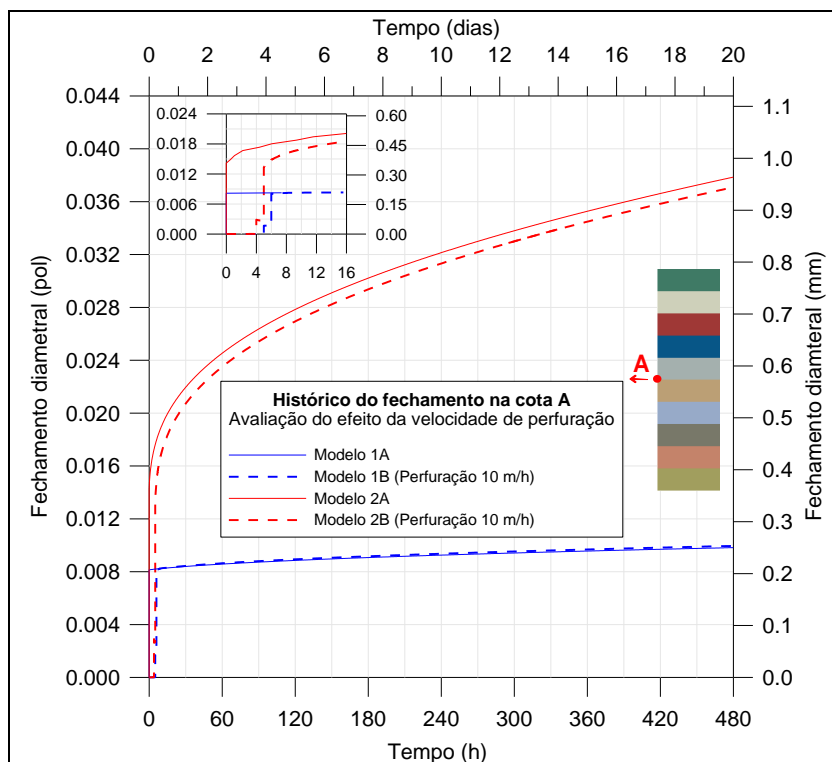


Figura 4.31 – Histórico do fechamento diametral na cota A dos modelos 1A, 1B, 2A e 2B.

A Figura 4.32 mostra os históricos das taxas de fechamento dos modelos nas mesmas cotas, calculadas a partir da expressão (4.4).

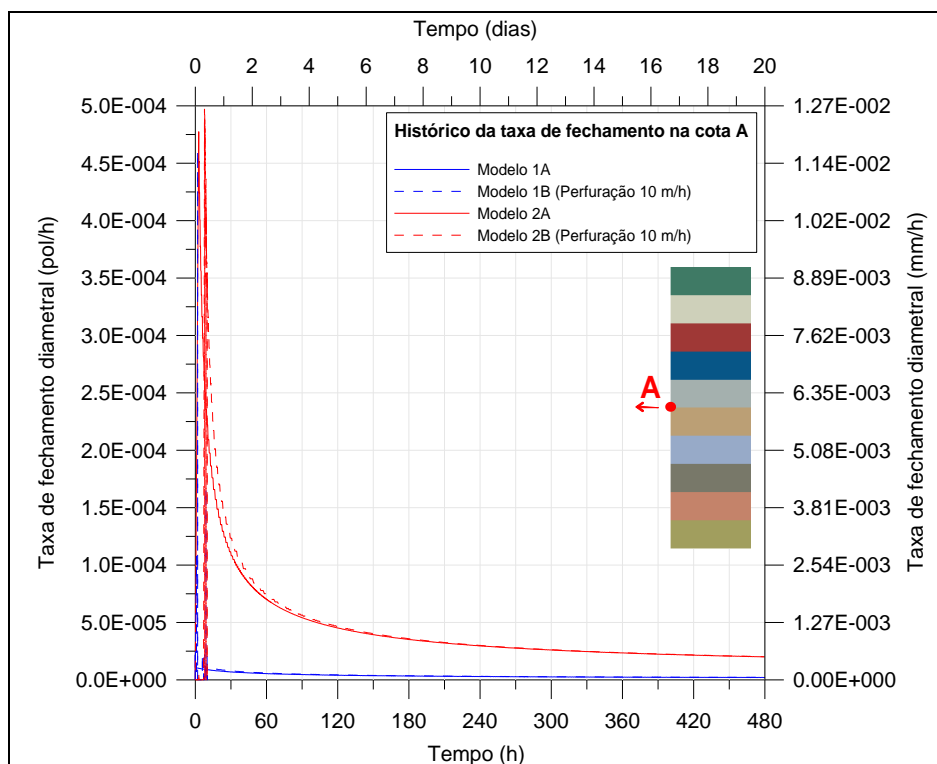


Figura 4.32 – Histórico da taxa de fechamento diametral na cota A dos modelos 1A, 1B, 2A e 2B.

Pode-se verificar que a energia de deformação vai sendo dissipada com o avanço do tempo, com isso a taxa de fechamento tende a tornar-se constante.

A seguir, as tensões desviadoras nos mesmos modelos ao longo do mesmo período foram comparadas na Figura 4.33. É possível verificar que o alívio de tensões desviadoras ocorre à medida que o sal se deforma (fecha) e a taxa de deformação (fechamento) se reduz.

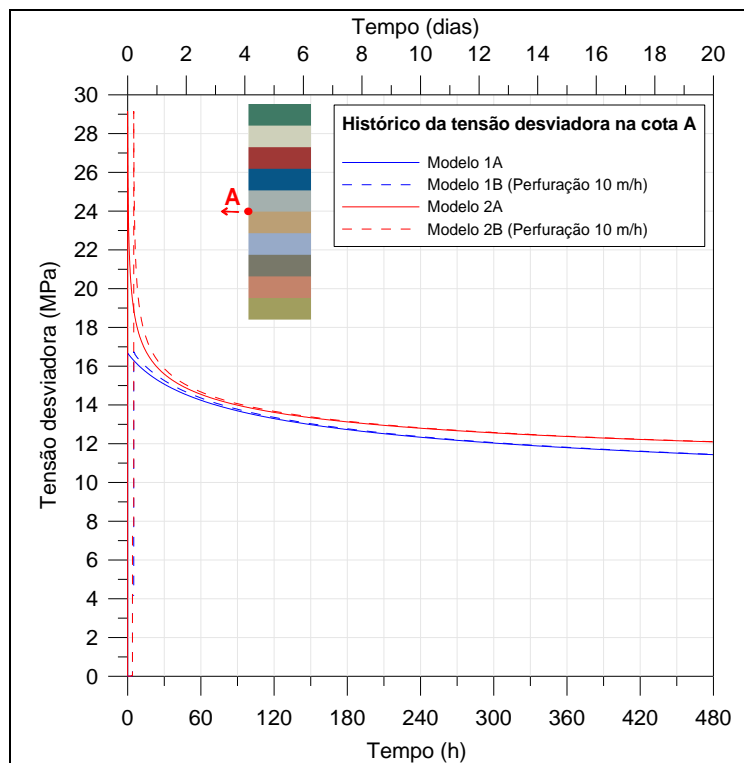


Figura 4.33 – Histórico da tensão desviadora na cota A dos modelos 1A, 1B, 2A e 2B.

#### 4.2.2.7. Seção transversal

##### 4.2.2.7.1. Introdução

Um segundo modo de simular numericamente a fluência em poços é considerar a seção transversal da perfuração. Essa configuração tem como principal vantagem a possibilidade de avaliar, além da fluência, a influência de irregularidades na perfuração, cimentação e no revestimento do poço na integridade da estrutura. Entretanto, tem como desvantagens os fatos de não considerar a influência da litologia sobre e subjacentes, de modo que seus resultados são locais e representativos no entorno da cota avaliada – não representa o comportamento geral ao longo do seu comprimento.

Eventualmente, tratando-se de um poço com seção transversal perfeita ou da ocorrência de irregularidades simétricas, é possível valer-se da simetria vertical e horizontal do problema, modelando-se um quarto do maciço. Isto representa uma

economia computacional considerável no tempo de processamento da análise e no armazenamento de arquivos de saída.

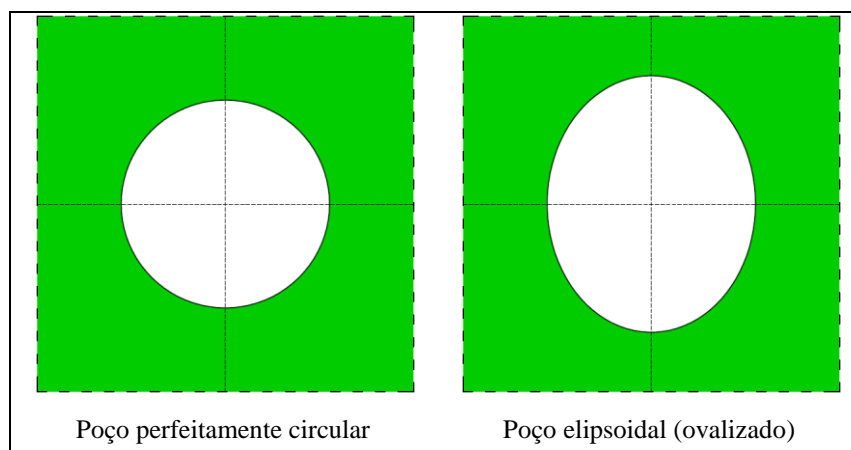


Figura 4.34 – Poço não revestido – cenários com dupla simetria possíveis.

A Figura 4.34 apresenta dois cenários típicos para análise de fechamento de poço não revestido adotando modelos transversais em que é possível valer-se de dupla simetria.

#### 4.2.2.7.2. Modelo geomecânico e condições de contorno

Os modelos geomecânicos deste item correspondem às seções transversais nas cotas analisadas nos modelos 1A/B e 2A/B (-1800,0 m e -2925,0 m, respectivamente). Foi adotada a nomenclatura apresentada na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Nomenclatura dos modelos transversais (estado “pseudo-plano” de deformações).

Modelo	Observação
1C	Dimensões e propriedades do modelo 1A na cota -1800,0 m
2C	Dimensões e propriedades do modelo 2A na cota -2925,0 m

A malha de elementos finitos é composta por 1460 elementos CPE8R e 4557 nós. Para a discretização circunferencial da parede do poço, foram adotados 80 elementos (20, no modelo que simula um quarto do poço), de modo que cada elemento é um quadrado com aproximadamente 1,2 cm de lado. A razão entre o primeiro elemento (parede do poço) e o último elemento (borda do modelo) vale aproximadamente 160.

A Figura 4.35 detalha o modelo geomecânico adotado.

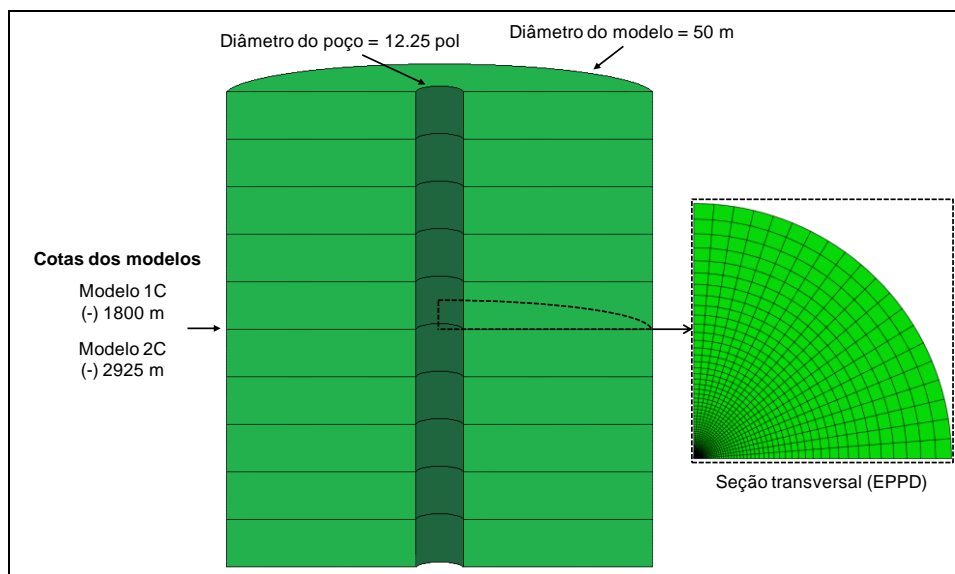


Figura 4.35 – Modelos geomecânicos 1C e 2C.

Em modelos transversais, dois formatos de contorno de modelos (bordas) são usuais: circular e retangular. No caso das tensões horizontais não serem iguais nas duas direções, é necessário empregar bordos retos. Esta pesquisa adotou borda circular, pressupondo a isotropia de tensões horizontais. As condições de contorno são compostas somente por apoios do segundo gênero na borda externa do modelo, representando a continuidade do maciço, de modo que os deslocamentos nas duas direções do plano são impedidas.

#### 4.2.2.7.3. Condições iniciais

A imposição das condições iniciais em modelos transversais é feita diretamente, aplicando-se a sobrecarga da litologia sobrejacente e as tensões horizontais. Os deslocamentos iniciais são funcionalmente nulos. Não há necessidade de restringir o modelo para prescrever deslocamentos nulos – isto já ocorre. Similarmente, é adotada a temperatura da cota analisada, assumindo-se que não há gradiente geotérmico no domínio horizontal da seção transversal. Foram adotados os valores de tensão e temperatura da Figura 4.15 nas cotas correspondentes.

A Figura 4.36 apresenta o esquema de carregamento empregado nos modelos transversais antes e depois da perfuração do poço, na qual  $P_{Fluido}$  é a pressão do fluido de perfuração.

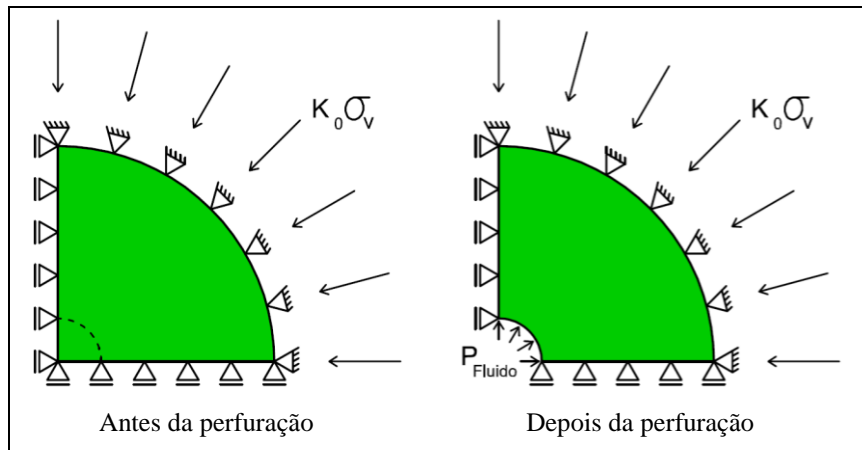


Figura 4.36 – Esquema de carregamento em modelo transversal parcial antes e depois da perfuração.

A Figura 4.37 e a Figura 4.38 mostram a prescrição das condições iniciais nos modelos transversais 1C e 2C, respectivamente.

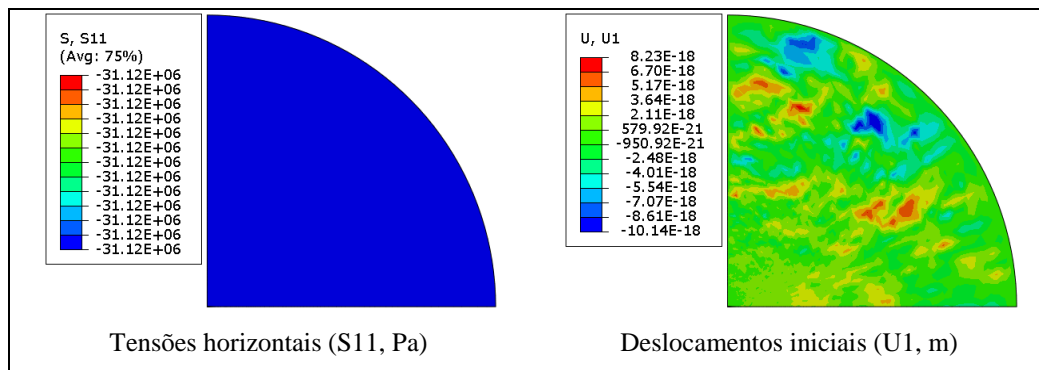


Figura 4.37 – Modelo sintético 1C – Seção transversal parcial na cota -1800,0 m com condições iniciais impostas.

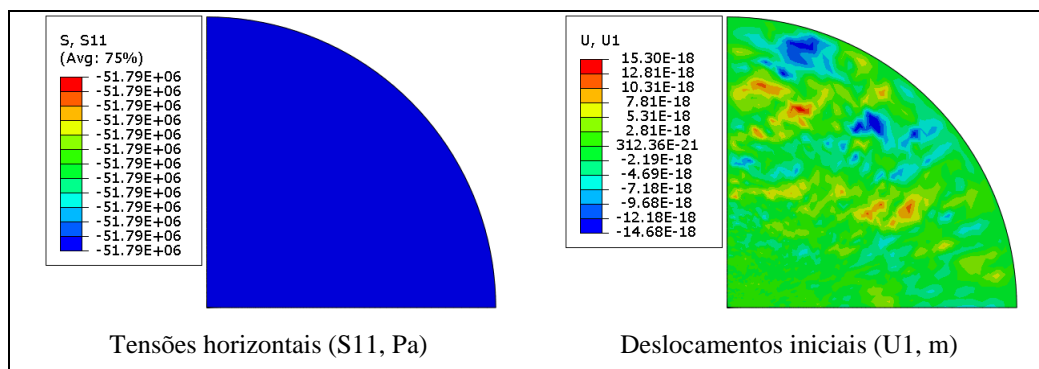


Figura 4.38 – Modelo sintético 2C – Seção transversal parcial na cota -2925,0 m com condições iniciais impostas.

#### 4.2.2.7.4. Perfuração

A utilização de um modelo transversal ao eixo do poço não permite considerar a velocidade de perfuração, ou seja, a perfuração ocorre um único

instante da análise (Figura 4.39). Conforme demonstrado nos modelos longitudinais, a consideração da perfuração instantânea representa um considerável ganho computacional e influencia pouco o valor final do fechamento.

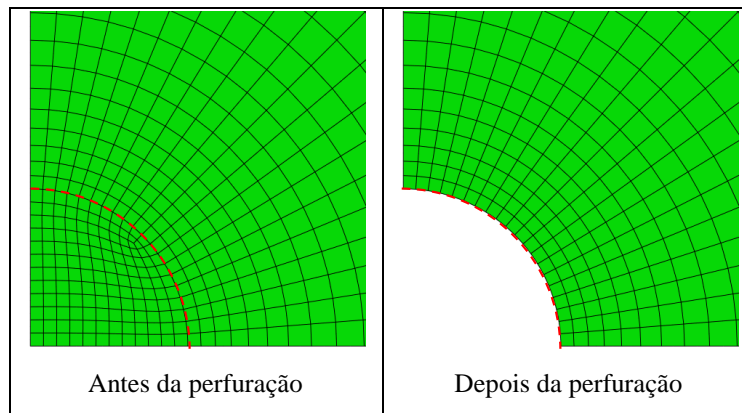


Figura 4.39 – Detalhe para a perfuração.

A Figura 4.40 e a Figura 4.41 mostram os contornos das tensões radiais e tangenciais ao redor do poço, nos modelos 1C e 2C, respectivamente, imediatamente após a perfuração.

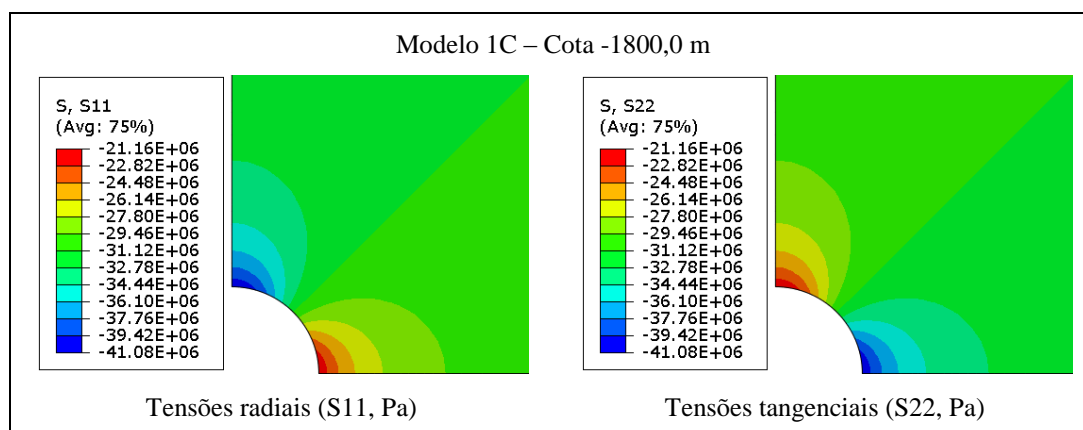


Figura 4.40 – Modelo 1C – Tensões radiais e tangenciais na cota -1800,0 m em seção transversal parcial.

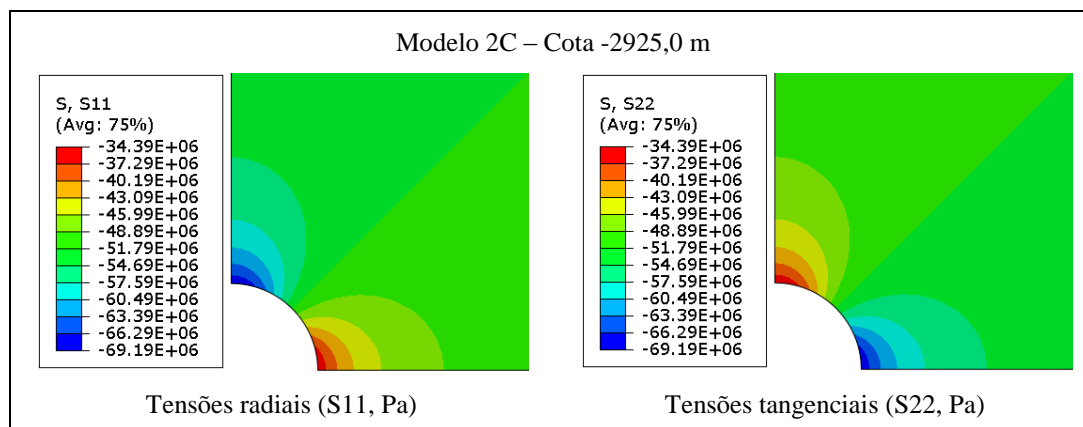


Figura 4.41 – Modelo 2C – Tensões radiais e tangenciais na cota -2925,0 m em seção transversal parcial.



A aferição do estado de tensão na fase elástica foi feita do mesmo modo que para os modelos longitudinais, na seção AB equivalente, conforme mostra a Figura 4.42.

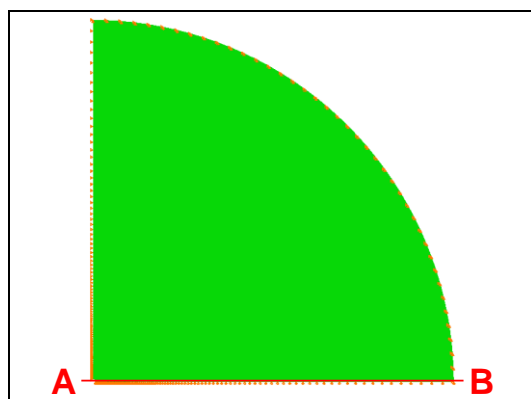


Figura 4.42 – Seção média (AB) do modelo geomecânico para validação das tensões na fase elástica.

As tensões radiais e tangenciais de ambos os modelos numéricos foram plotadas nos gráficos da Figura 4.43 e da Figura 4.44, sobre as soluções analíticas correspondentes. Foi verificada a solução obtida pelo ABAQUS® na etapa elástica.

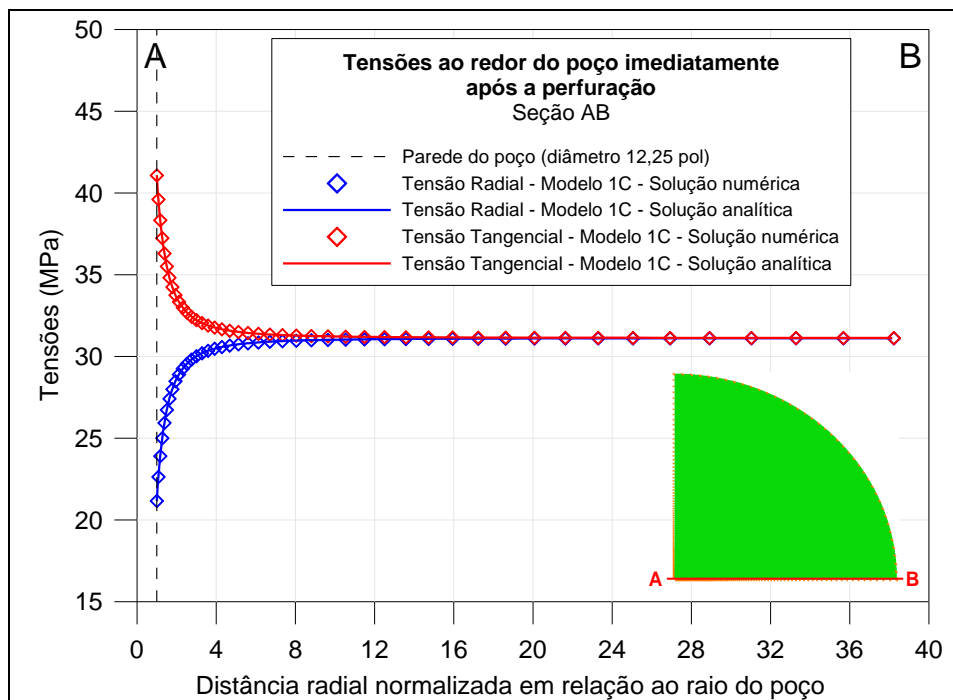


Figura 4.43 – Tensões ao redor do poço imediatamente após a perfuração do entorno da seção AB do modelo 1C – cota -1800 m.

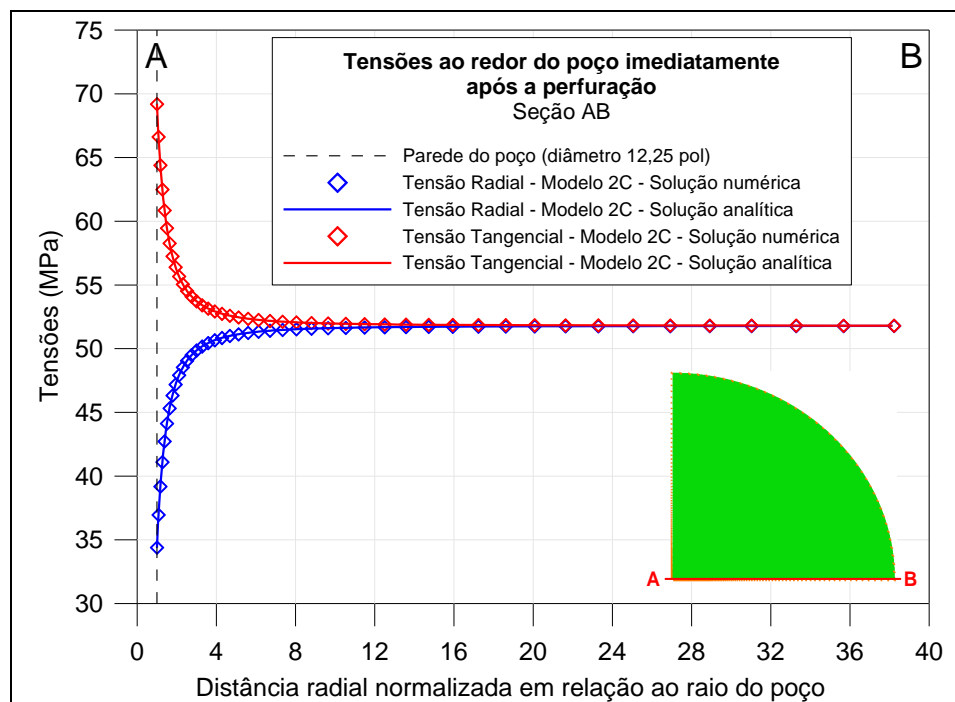


Figura 4.44 – Tensões ao redor do poço imediatamente após a perfuração do entorno da seção AB do modelo 2C – cota -2925 m.

#### 4.2.2.7.5. Fluência

Assim como no modelo longitudinal, após a resposta elástica instantânea da perfuração, o maciço inicia o comportamento de fluência. São medidos os deslocamentos horizontais dos nós extremos da esquerda ou direita ou os verticais dos nós extremos superior ou inferior para o cômputo do fechamento por fluência.

Apresenta-se na Figura 4.45, a distribuição das tensões desviadoras e do fechamento horizontal (radial) do poço do modelo 2C, após a perfuração e após 20 dias (480 horas) de fluência. É verificado, conforme previsto teoricamente, a redução gradual das tensões desviadoras à medida que a rocha salina se deforma.

A Figura 4.46 mostra fechamentos diametrais ao longo de 480 horas de fluência dos poços dos modelos transversais 1C e 2C, comparando-os com os seus correspondentes modelos longitudinais, 1A e 2A, respectivamente.

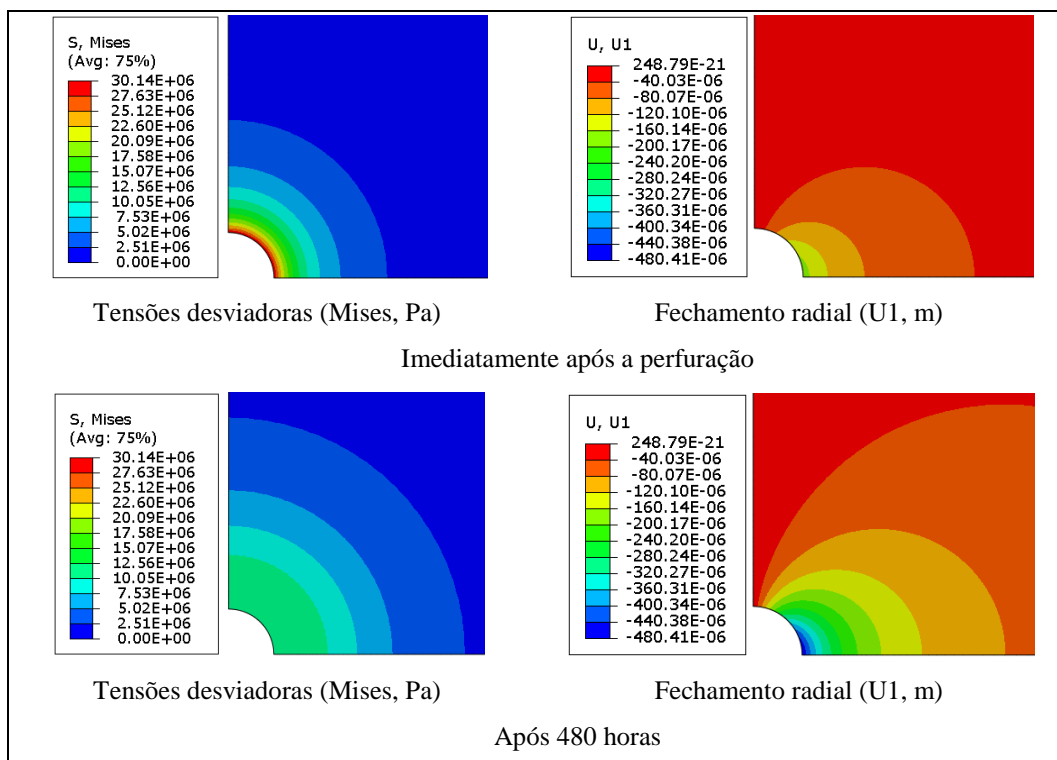


Figura 4.45 – Modelo sintético 2C – Tensões desviadoras e fechamentos radiais do modelo transversal após a perfuração e após 480 horas.

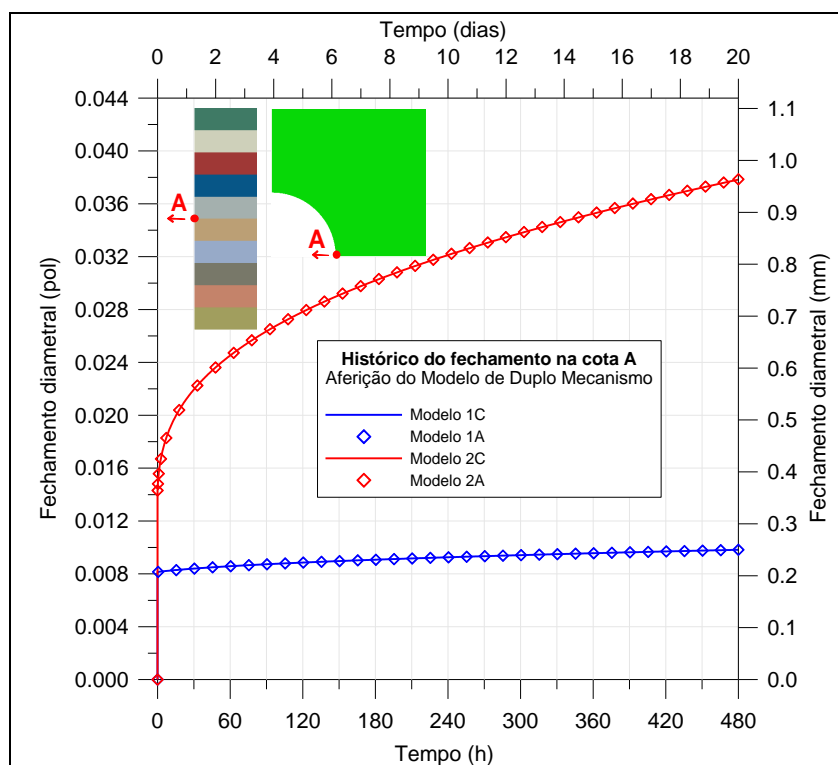


Figura 4.46 – Simulação do fechamento diametral em modelo sintético de poço – comparação entre modelo longitudinal e modelo transversal.

A Figura 4.47 apresenta o histórico da taxa de fechamento diametral, calculada por meio da equação (4.4).

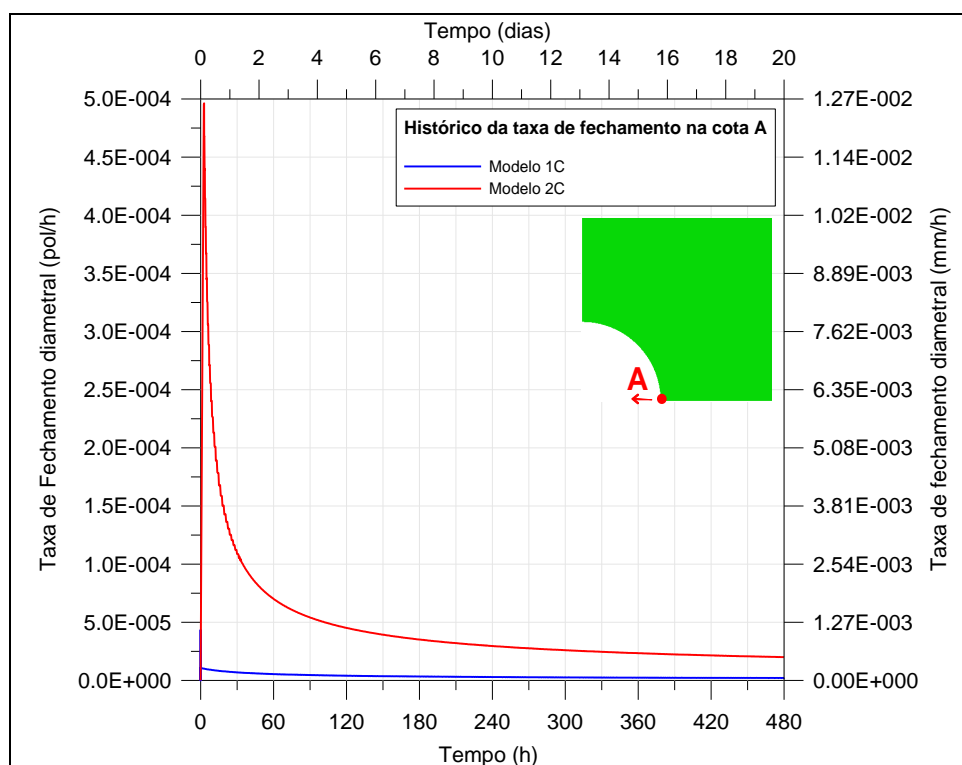


Figura 4.47 – Taxa de fechamento diametral.

A Figura 4.48 apresenta o histórico da tensão desviadora. Com a dissipação da energia de deformação, o alívio de tensões desviadoras ocorre.

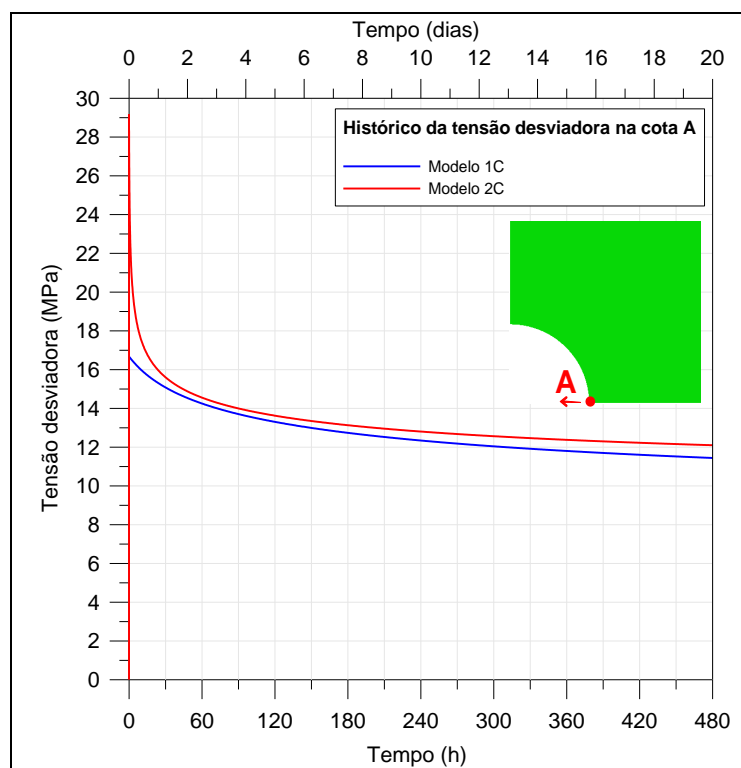


Figura 4.48 – Tensão desviadora.

Foram verificados comportamentos idênticos aos dos modelos longitudinais correspondentes.

#### 4.2.2.8. Resumo e considerações finais sobre a análise de fechamento de poço

A simulação de fechamento de poço considerando modelos longitudinais e transversais equivalentes possibilitou ainda uma aferição relativa entre modelos geomecânicos, isto é, permitiu a comparação de soluções numéricas diferentes (tipos de análise e modelos geomecânicos), mas o mesmo modelo constitutivo. Não se trata, ainda, de uma validação, pois os resultados não estão sendo comparados com dados reais de laboratório ou de campo. Todavia, verifica-se que em situações em que o maciço for considerado intacto e a influência das camadas sobre e subjacentes puder ser desprezada, modelos longitudinais e transversais tendem para os mesmos resultados. A Tabela 4.8 resume os resultados dos modelos 1A, 1B e 1C em 480 horas.

Tabela 4.8 – Resultados de fechamento e de taxa de fechamento dos modelos 1A, 1B e 1C.

Modelo	Fechamento ( $10^{-3}$ pol)	Taxa de fechamento ( $10^{-5}$ pol/h)
1A	9,82	0,205
1B	9,95	0,213
1C	9,81	0,205

A Tabela 4.9 resume os resultados dos modelos 2A, 2B e 2C em 480 horas.

Tabela 4.9 - Resultados de fechamento e de taxa de fechamento dos modelos 2A, 2B e 2C.

Modelo	Fechamento ( $10^{-3}$ pol)	Taxa de fechamento ( $10^{-5}$ pol/h)
2A	37,85	2,000
2B	37,07	2,008
2C	37,82	2,000

Pode-se verificar o efeito da profundidade – conseqüentemente do estado de tensão e da temperatura – no fechamento por fluência do poço, tanto em valores absolutos quanto em taxas.

#### 4.2.3. Modelo sintético de poço revestido

A simulação de poço revestido pode ser feita com modelos 2D transversais ou 3D, em situações que não podem ser aproximadas por um modelo bidimensional. O uso de modelos longitudinais (axissimétricos) não é usual para

esse tipo de análise, pois impossibilita o estudo de irregularidades na seção perfurada, na cimentação e avaliação do efeito de carregamentos não uniformes na plastificação do revestimento.

A metodologia para essa simulação decorre da metodologia para análise de fechamento do sal, uma vez que no contexto analisado, a ovalização e eventual plastificação do revestimento ocorrerão como consequências da fluência. A análise de plastificação é uma continuação natural da análise de fechamento.

Na prática da engenharia, o poço não é perfurado e revestido instantaneamente. O tempo de exposição do poço não revestido pode ultrapassar 30 dias. O fechamento antes da instalação do revestimento pode influenciar o efeito da plastificação, por reduzir o espaço anular para cimentação do revestimento. Entretanto, o fechamento pode ser contrabalançado pela abertura de cavidades devidas a efeitos de dissolução do sal<sup>22</sup> na seção durante a perfuração.

O preenchimento do anular com cimento promove a interação rocha-estrutura e a vedação do meio, evitando a migração de fluido. Inicialmente, quando lançada, a pasta de cimento comporta-se como fluido, impondo uma pressão hidrostática. Após o endurecimento, essa pressão permanece, mas o cimento torna-se um material sólido que deve ser incorporado ao modelo através de elementos finitos e não apenas representado pela pressão imposta. Devido à irregularidade da seção perfurada e a efeitos de dissolução do sal, a bainha de cimento que preenche o anular poderá ter imperfeições, chamadas de falhas de cimentação, canais ou vazios<sup>23</sup>. O estudo das anomalias relacionadas à cimentação do anular entre a rocha e o revestimento foge ao escopo desta pesquisa. Sugere-se ao leitor interessado os trabalhos de Berger *et al.* (2004) e Fleckenstein *et al.* (2005) e, no caso específico de rochas salinas, Grainger (2012).

Outras anomalias relacionadas à completação do poço devem ser mencionadas. Uma delas é a descentralização do revestimento<sup>24</sup>, isto é, o eixo do revestimento estar transladado do eixo da perfuração. Existe ainda a possibilidade do poço não ser perfeitamente circular, bem como do revestimento sofrer efeitos semelhantes.

---

<sup>22</sup> Fenômeno de dissolução, conhecido na literatura técnica como *washout*.

<sup>23</sup> Fenômeno conhecido na literatura técnica como *voids*, *cement channels* ou *channelling*.

<sup>24</sup> Fenômeno de excentricidade, conhecido na literatura técnica como *stand off*.

As configurações com falhas de cimentação e com poços ou revestimentos ovalizados podem representar situações críticas, pois implicam em carregamentos não uniformes no aço. A descentralização do revestimento em relação à perfuração tem pouco efeito no colapso, sobretudo em modelos com cimentação perfeita (Berger *et al.*, *op. cit.*; Fleckenstein *et al.*, *op. cit.*, Poiate Jr., 2012).

A Figura 4.49 apresenta de modo ilustrativo um poço com seção elipsoidal, com falha na cimentação do anular e descentralização do revestimento.

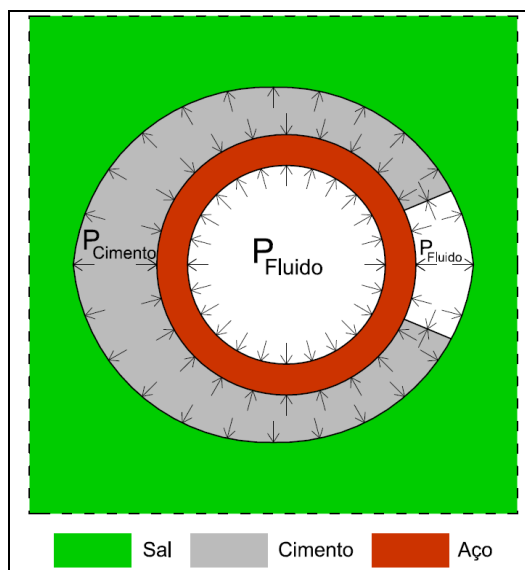


Figura 4.49 – Poço elipsoidal com falha na cimentação do anular e descentralização do revestimento.

#### 4.2.3.1. Modelo geomecânico e condições iniciais

Para demonstrar a metodologia empregada e aferir o funcionamento da sub-rotina do Modelo de Multi Mecanismo, foi reproduzido o modelo transversal sintético de poço com revestimento metálico apresentado por Fossum & Fredrich (2007), representativo do pré-sal brasileiro, angolano e do Golfo do México.

O poço tem diâmetro nominal de 18 ¼ polegadas. A geometria é elipsoidal, com 5% de deformação diametral, de modo que o diâmetro na direção vertical é 0,6% maior do que o nominal e na direção horizontal é 4,4% menor do que o mesmo. O revestimento metálico (aço) tem diâmetro nominal de 13 5/8 polegadas, 0,625 polegadas de espessura e tensão de escoamento de 63,5 ksi ( $\approx 438$  MPa). Ele é modelado como um material elástico perfeitamente plástico. A Figura 4.50 mostra o modelo do poço. É também apresentada a malha de elementos finitos, com 2745 elementos CPE8R e 8464 nós.

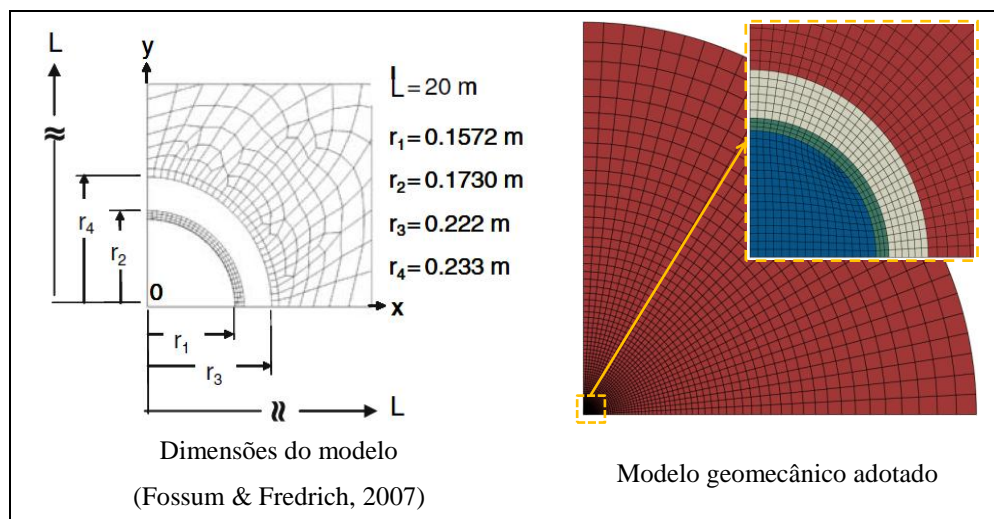


Figura 4.50 – Geometria da seção transversal do modelo.

O modelo geomecânico 2D para as análises de poço revestido é análogo aos modelos transversais de poços não revestidos, para estimativa de fechamento diametral. As condições iniciais são impostas da mesma forma, uma vez que antes da instalação do revestimento, não há qualquer diferença entre uma análise e outra. No contexto da modelagem numérica, alguns detalhes são importantes. Inicialmente, é conveniente estruturar a malha de modo que os elementos que compreenderão o revestimento e o cimento (que no caso retratado, não é considerado) já estejam devidamente delimitados

A seguir, deve-se atentar para a atribuição de propriedades. Antes da perfuração, o maciço é composto somente por sal. Após a perfuração e a reconstrução, etapa a ser descrita a seguir, os elementos que correspondem ao revestimento e ao cimento serão reativados como tais materiais e não mais como sal.

Programas voltados para geotecnia têm funcionalidades de troca de material durante a análise, já o programa adotado nesta pesquisa, ABAQUS®, não possui um dispositivo prático para esse procedimento, sendo apenas possível por meios indiretos, que não são recomendáveis para problemas não lineares, como é o caso.

Portanto, um modo simplificado de inicializar as tensões é assumir as propriedades de seus respectivos materiais, impondo-se o estado de tensões da cota retratada. Essa é uma simplificação numérica, uma vez que o correto seria adotar as propriedades do sal para todos os elementos, visto que é o maciço salino que está sendo retratado.



A Figura 4.51 mostra a imposição das condições iniciais às análises de plastificação de revestimento, de modo simplificado e do modo correto (do ponto de vista geotécnico). Verifica-se que os deslocamentos iniciais em ambos os casos são iguais e funcionalmente nulos. Entende-se que a simplificação para inicialização de tensões não inseriu erros na solução, sendo numericamente aceitável.

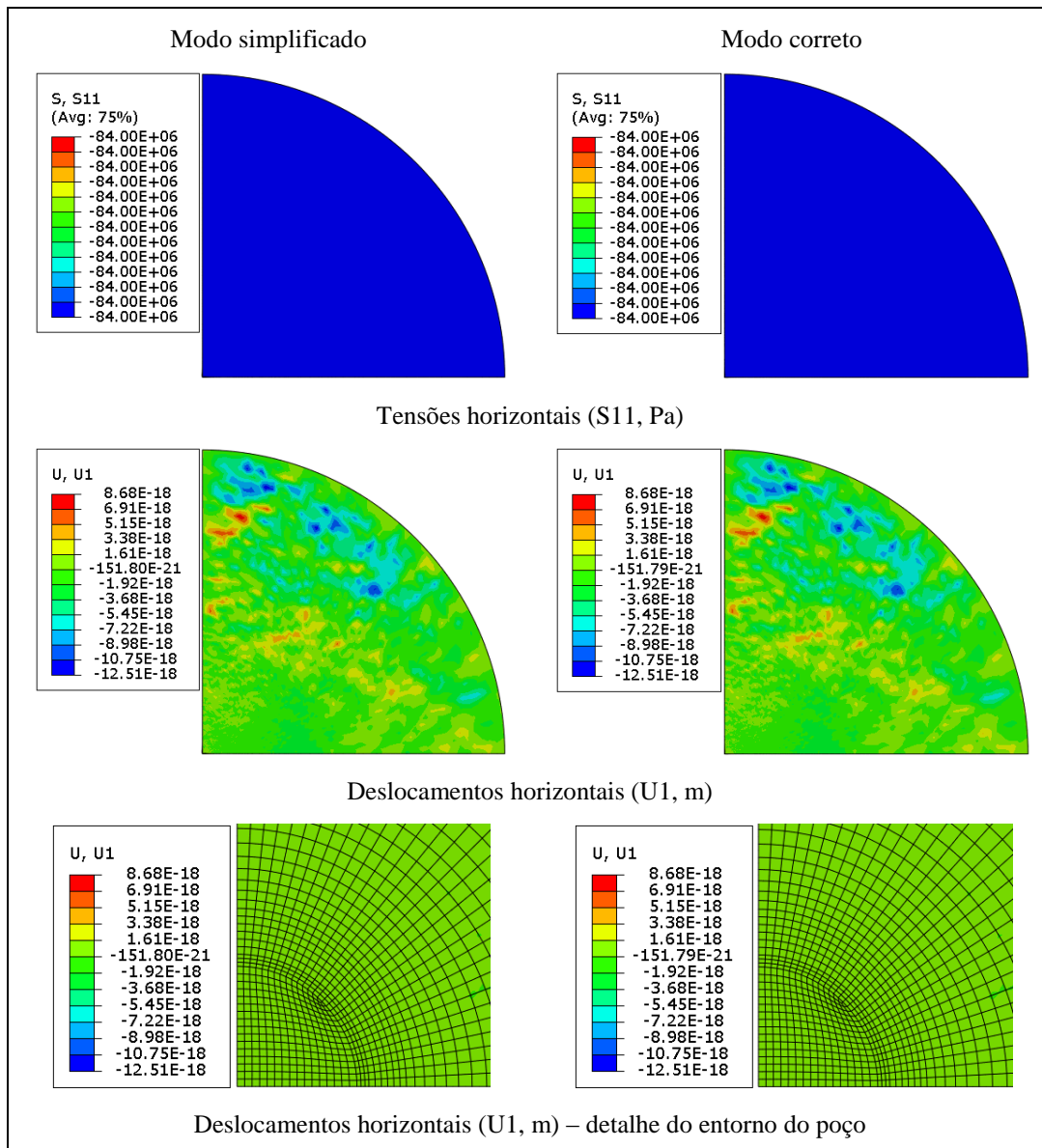


Figura 4.51 – Imposição das condições iniciais às análises de plastificação de revestimento – modo simplificado e modo correto.

#### 4.2.3.2. Condições de contorno e perfuração

As condições de contorno em modelos para análise de plastificação são as mesmas dos modelos transversais para análise de fechamento, assim como a perfuração – ver itens 4.2.2.7.2 e 4.2.2.7.4.

#### 4.2.3.3. Reconstrução

A fase de reconstrução se refere à instalação do revestimento e ao preenchimento do anular com cimento. Na análise numérica, os elementos correspondentes ao aço (revestimento) são reativados, assim como os do cimento, caso esteja sendo simulada a fase já solidificada do cimento. Caso contrário, se o cimento for considerado como pasta, aplica-se a pressão a ele devida, mas sem usar elementos finitos. Os materiais reativados voltam a fazer parte do modelo e interagir com o sal em movimento devido à fluência.

Conforme mostrado na Figura 4.49, são aplicadas pressões nas paredes interna e externa do revestimento, bem como na do poço. A pressão interna do revestimento pode ser devida ao fluido de completação e usualmente é menor (ou igual) à pressão imposta pelo fluido de perfuração e pelo cimento. Nesse exemplo o mesmo valor é adotado, de 64 MPa.

A aplicação das pressões nas paredes externa e interna do revestimento garante que ele seja reinicializado com um estado de tensões compatível com a cota analisada.

Em modelos em que o cimento é considerado como pasta, ou com falhas na cimentação, deve ser empregado um dispositivo de contato entre as superfícies mais externas do sal e do revestimento, para que o contato entre o sal e o revestimento seja numericamente considerado. Caso contrário, os elementos do sal atuarão de modo independente dos elementos do revestimento, mesmo após interceptá-los. Nesta pesquisa foi empregado o contato entre superfícies do tipo *master/slave*, disponibilizado no ABAQUS®.

A Figura 4.52 mostra os contornos de tensão horizontal (S11) e de fechamento radial (U1) do modelo analisado, imediatamente antes e depois da reconstrução do revestimento. Os elementos do revestimento retornam ao modelo já com o estado de tensões resultante das pressões de fluido interna e externa.

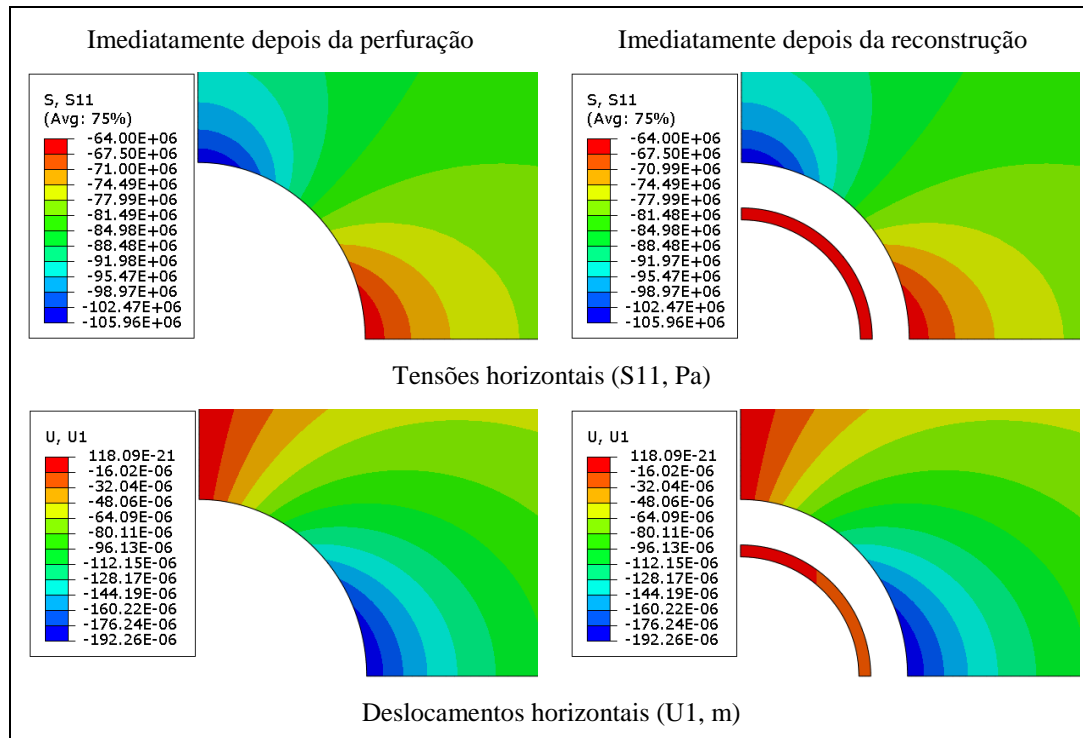


Figura 4.52– Tensões horizontais e deslocamentos horizontais após a perfuração do sal e a reconstrução do revestimento.

#### 4.2.3.4. Plastificação do revestimento

A plastificação do revestimento (aço) é um fenômeno diretamente decorrente da fluência do sal. A movimentação do sal tendendo a fechar a perfuração é resistida pelo tubo de aço. Consequentemente, carregamentos são impostos ao aço e esse também começa a se deformar. Falhas na cimentação são responsáveis por carregamentos não lineares no revestimento em decorrência fluência.

Em análises de plastificação de revestimento, o aço é considerado um material elástico perfeitamente-plástico, regido pelo Critério de von Mises. Não havendo endurecimento, uma vez que o limite elástico é excedido, considera-se que o revestimento escoar, ou sofre plastificação. Embora o aço tenha um alto módulo de elasticidade, cerca de 10 vezes superior ao do sal, as deformações contínuas podem levá-lo a essa condição – fato que, para projeto de poços é proibitivo.

Segundo o Critério de von Mises, o material entra em escoamento (plastifica) quando a tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_{eq,Mises}$ ), função do

segundo invariante de tensões desviadoras ( $J_{2D}$ ), se iguala à tensão de escoamento ( $\sigma_y$ ) do mesmo, conforme a expressão (4.5).

$$\sigma_y = \sqrt{3J_{2D}} = \sigma_{eq,Mises} \quad (4.5)$$

Dessa forma, a análise de plastificação consiste em verificar a cada intervalo da análise, a razão entre a tensão equivalente de Von Mises (desviadora) e a tensão de escoamento do aço, aqui denominada razão de plastificação, em cada ponto de integração de cada elemento do revestimento. A primeira ocorrência de valor unitário para essa razão dá-se o nome de plastificação.

Neste exemplo, deseja-se estimar o tempo em que ocorre o primeiro contato entre o sal e o revestimento ( $t_{c,i}$ ), o tempo em que ocorre a primeira região plastificada no aço ( $t_{y,i}$ ) e a distribuição da plastificação no mesmo ao término da simulação, cujo tempo ( $t$ ) é de 30 anos, vida útil do poço.

A Figura 4.53 apresenta os contornos da tensão equivalente de von Mises do revestimento. É apresentada também a razão de plastificação correspondente. As cores laranja e vermelho evidenciam as regiões plastificadas.

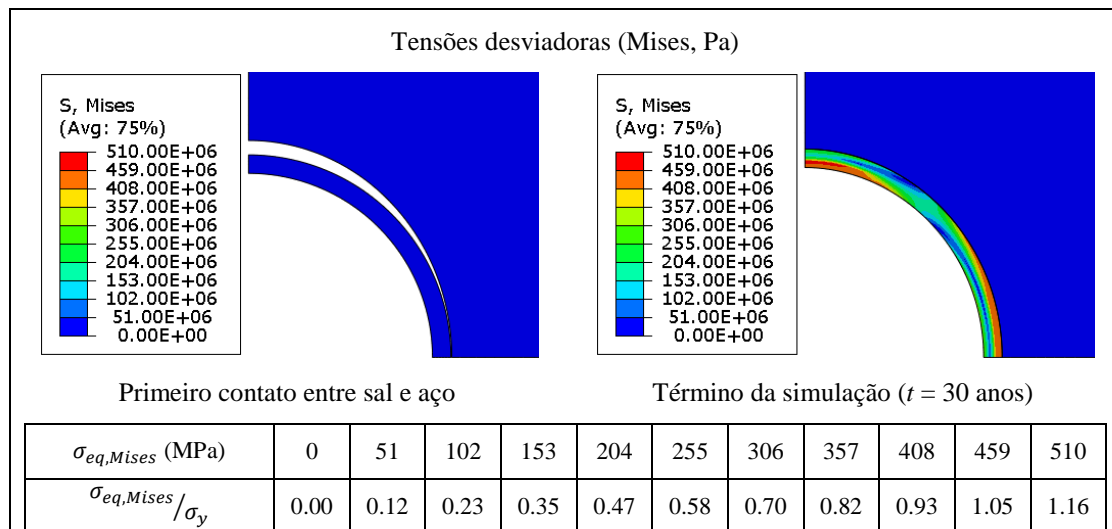


Figura 4.53 – Tensão desviadora (Mises, Pa) no revestimento após o primeiro contato entre sal e aço e ao término da simulação.

A Figura 4.54 apresenta a comparação entre os resultados publicados por Fossum & Fredrich (2007) e os obtidos pelo autor com o ABAQUS®, adotando-se as mesmas propriedades. Foram comparados os mapas de contorno da tensão desviadora (equivalente de von Mises) com a mesma escala de cores.

Comparando os mapas de contorno em  $t = 30$  anos, verifica-se que uma mesma tendência de resultados foi obtida. A distribuição de cores diverge pouco,

embora fique visível que na simulação realizada no ABAQUS®, as regiões plastificadas são ligeiramente menores.

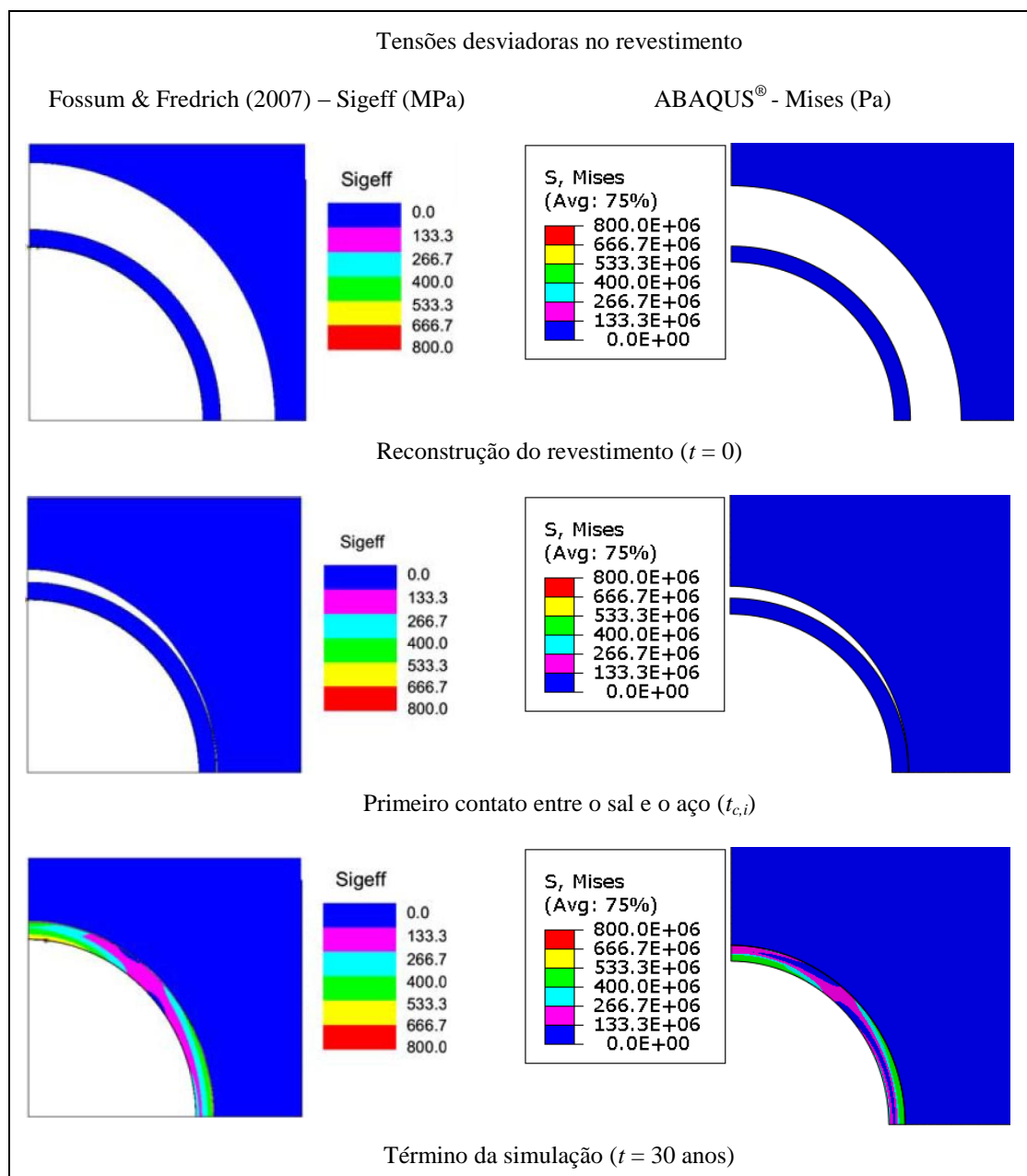


Figura 4.54 – Simulação da evolução da plastificação no revestimento metálico em modelo transversal.

Com relação ao tempo em que ocorre o primeiro contato entre sal e aço ( $t_{c,i}$ ), Fossum & Fredrich (2007) reportam o intervalo de 4 anos, com nível de probabilidade de 50%. Com o ABAQUS®, foi verificado que o primeiro contato ocorre em pouco mais de 7 anos. Diante de uma diferença considerável, o funcionamento do contato foi verificado.

A Figura 4.55 apresenta histórico de fechamento do sal ao longo do menor anular (A/A'). São indicados os tempos do primeiro contato entre sal e aço ( $t_{c,i}$ ) e do envolvimento total do revestimento pelo sal ( $t_{c,f}$ ).

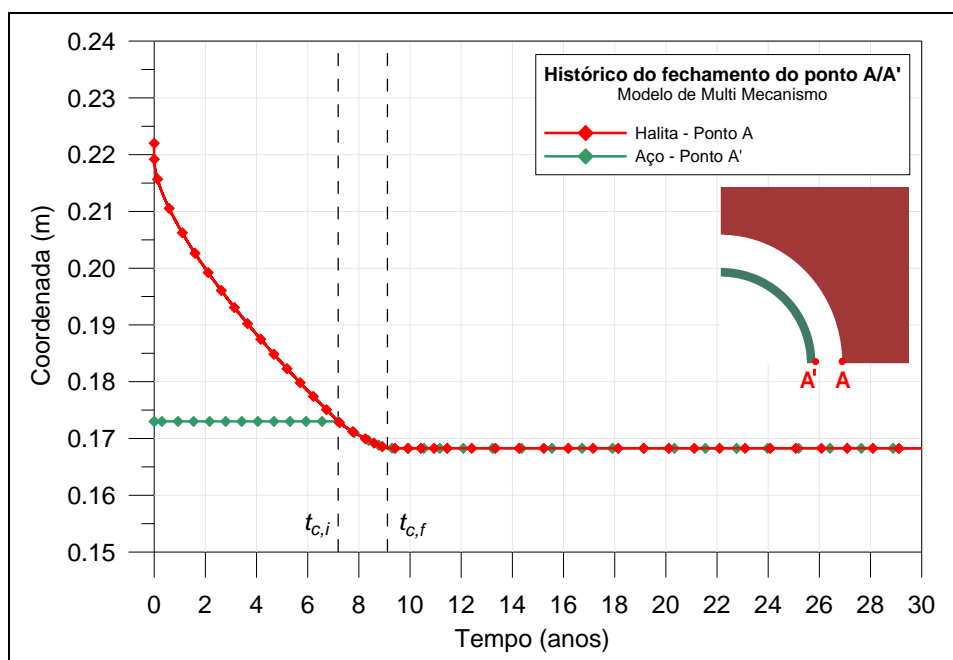


Figura 4.55 – Histórico do fechamento do sal no ponto A e do aço no ponto A' em 30 anos.

A Figura 4.56 mostra o histórico das forças nodais dos nós extremos do sal e do aço no mesmo anular, que entram em contato decorrido algum tempo da análise.

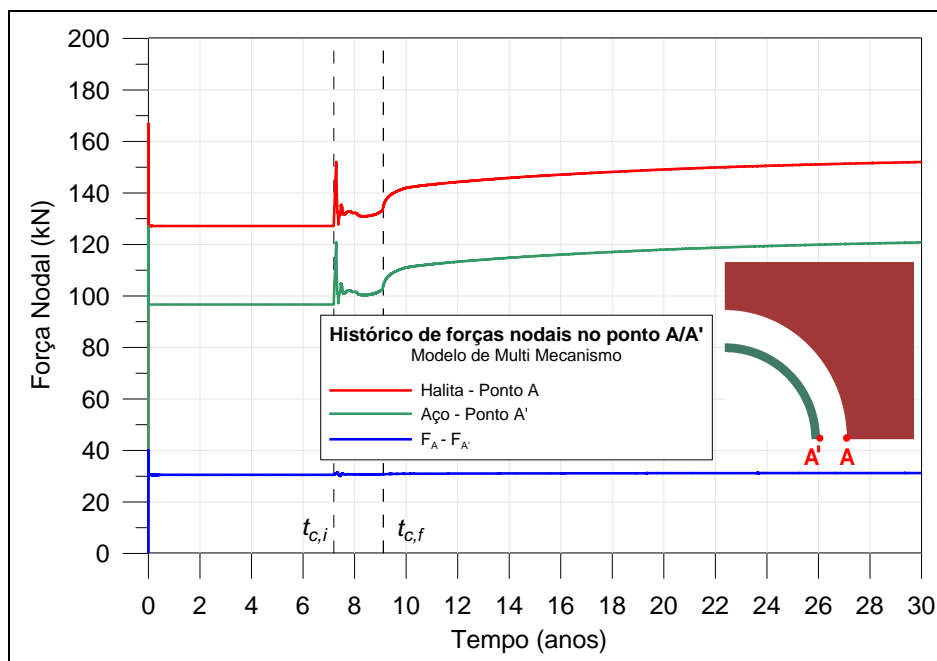


Figura 4.56 – Histórico das forças nodais nos nós extremos do sal e do aço, A e A', respectivamente.

Figura 4.57 idem a Figura 4.55, ao longo do maior anular (B/B').

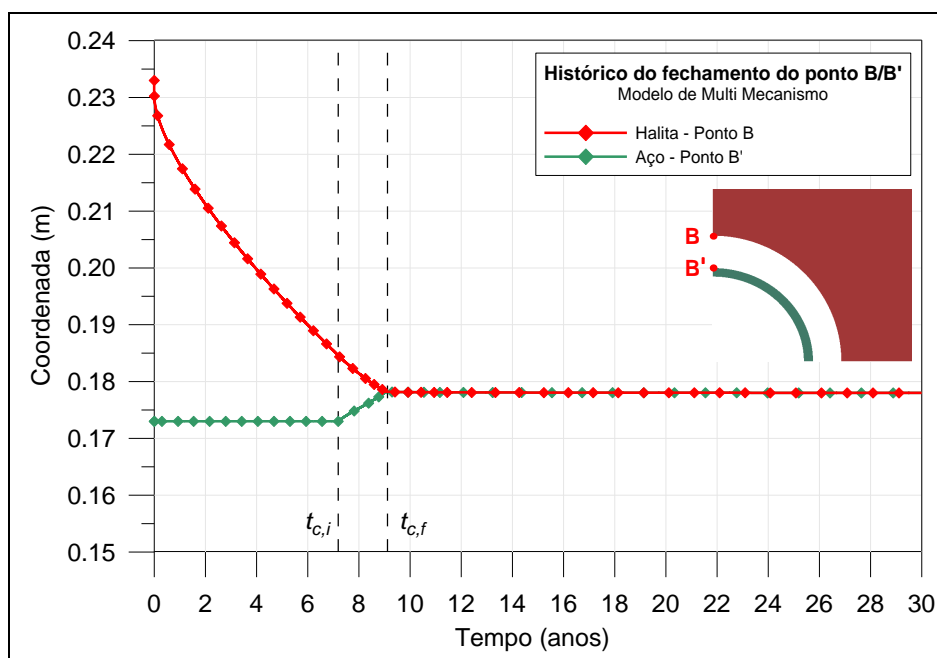


Figura 4.57 – Histórico do fechamento do sal no ponto B e do aço no ponto B' em 30 anos.

Figura 4.58 idem a Figura 4.56, ao longo do mesmo anular.

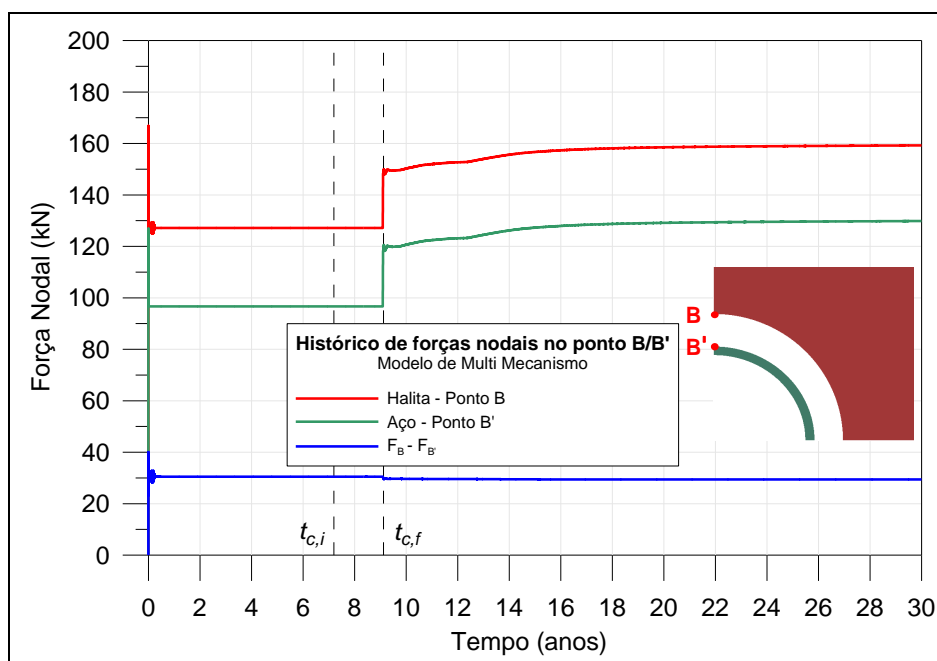


Figura 4.58 – Histórico das forças nodais nos nós extremos do sal e do aço, B e B', respectivamente.

Do ponto de vista de deslocamentos, verifica-se que o contato está atuando corretamente na análise. Quanto as forças nodais, no sal e no aço, a evolução das forças segue a mesma tendência, com uma defasagem inicial de aproximadamente 30 kN mantida em todo o tempo de simulação e em ambas as direções analisadas.

Embora o equilíbrio de forças seja garantido pelo Método dos Elementos Finitos, a defasagem não denuncia desequilíbrio no sistema, mas sim que a pressão do fluido de perfuração, ao ser aplicada como equivalente nodal, não assumiu valores iguais, tendo em vista que a superfície do elemento do sal é ligeiramente maior do que a do aço. A Figura 4.59 elucida a questão para ambos os casos. Entende-se, portanto, que o contato está funcionando corretamente.

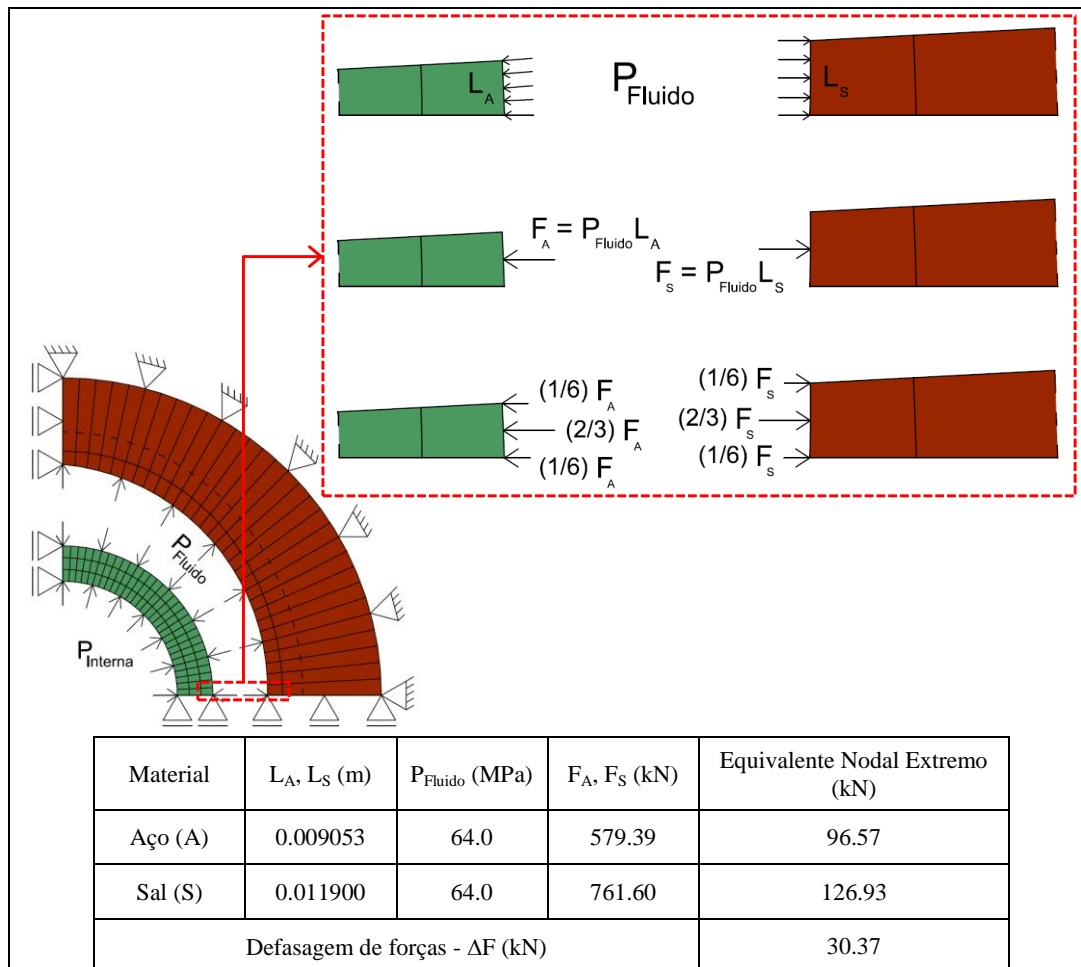


Figura 4.59 – Forças equivalentes nodais na aplicação da pressão do fluido de perfuração.

A diferença entre resultados de fechamento e, consequentemente, de plastificação, pode ser devida ao fato de que Fossum & Fredrich (2007) consideram a tensão equivalente de Tresca no sal, ao passo que o ABAQUS® considera a de von Mises.

Foi verificado por autores do modelo de Multi Mecanismo que a tensão de von Mises tende a provocar fechamentos significativamente inferiores aos de tensão de Tresca, para os mesmos parâmetros de fluência (Figura 4.60), visto que a tensão de Von Mises considera a contribuição da tensão intermediária – vide apêndice A.



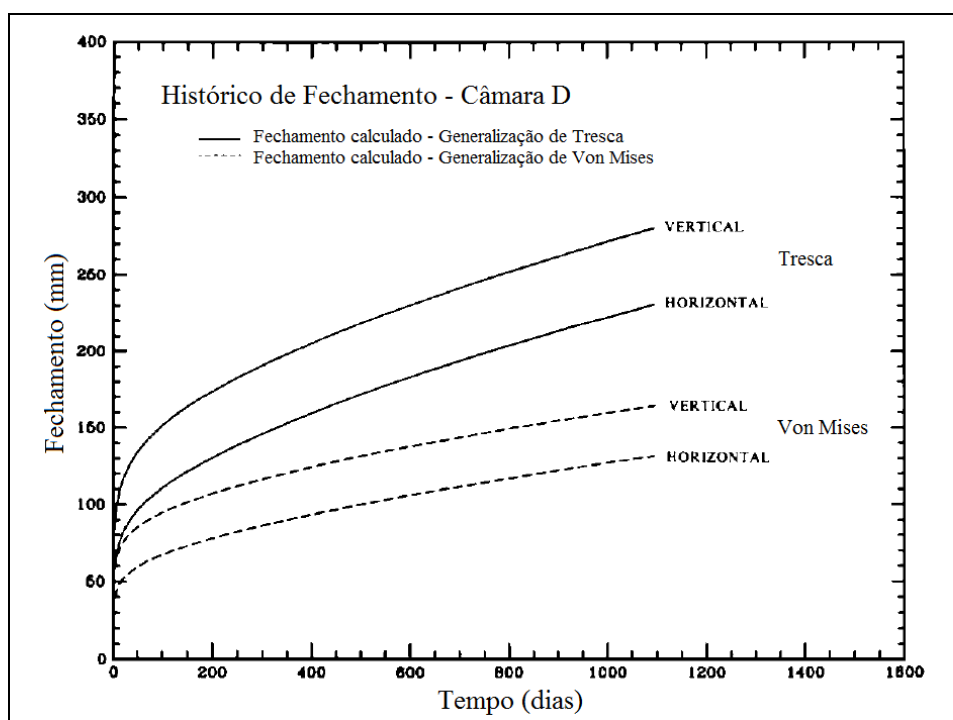


Figura 4.60 – Comparação do fechamento da câmara D do repositório WIPP obtido pelas generalizações de Tresca e von Mises (Munson *et al.*, 1989, tradução nossa).

Em problemas axissimétricos, como o caso dos ensaios triaxiais do item 4.2.1, os resultados são os mesmos, pois a tensão de von Mises passa a ser a máxima diferença entre as tensões, assim como a de Tresca.

Dessa forma, neste exemplo em estado “pseudo-plano” de deformações, resultados inferiores de fechamento e uma menor zona plastificada eram esperados, entendendo-se que a sub-rotina do Modelo de Multi Mecanismo está funcionando corretamente.

Por fim, cabe também ressaltar que mesmo antes de ultrapassar o limite elástico, situações indesejáveis e até proibitivas podem ocorrer com o revestimento. Por resistir ao fechamento do sal, o revestimento deforma-se elasticamente – e a depender da magnitude dessa deformação, o acesso de equipamentos ao longo do poço pode ser impedido. Esse é mais um critério de desempenho no projeto de poços após a instalação do revestimento.