

5 Exemplos de validação

5.1. Introdução

No capítulo anterior, metodologias foram apresentadas e sub-rotinas para utilização dos modelos de Duplo Mecanismo e Multi Mecanismo foram aferidas. Isso assegura que as metodologias e rotinas estão funcionando adequadamente do ponto de vista numérico.

Neste capítulo são apresentados exemplos de validação, com intuito de avaliar a representatividade dos modelos constitutivos e dos parâmetros determinados com base em resultados experimentais de ensaios de laboratório e de campo.

São consideradas três aplicações geomecânicas envolvendo rochas salinas brasileiras: ensaios triaxiais de fluência realizados em amostras de halita provenientes da formação Muribeca, em Sergipe, convergência vertical de uma galeria da Mina Taquari-Vassouras, no mesmo estado e fechamento diametral do poço 6-RJS-457, na Bacia de Campos, compreendida entre a costa norte do estado do Rio de Janeiro e a costa sul do Espírito Santo.

5.2. Ensaio triaxial de fluência

5.2.1. Contexto

A primeira aplicação de engenharia para validação dos modelos constitutivos é o ensaio triaxial de fluência. Foram ensaiadas amostras de halita provenientes de testemunhos da formação Muribeca, em Sergipe, região vizinha à da Mina Taquari-Vassouras, aqui denominada “halita brasileira”. Resultados experimentais de três ensaios apresentados por Costa *et al.* (2005) e Poiate Jr. *et al.* (2006) são adotados como referenciais de validação. Esses ensaios constituíram um importante legado para a exploração do pré-sal brasileiro.

Inicialmente, apresentam-se na Tabela 5.1 as especificações de cada ensaio. A nomenclatura (A a D) foi atribuída pelo autor visando melhor identificação das simulações numéricas correspondentes.

Tabela 5.1 – Especificações dos ensaios triaxiais de fluência em halita (Costa *et al.*, 2005 e Poiate Jr. *et al.*, 2006).

Ensaio triaxial de fluência – Halita Brasileira		
Ensaio	Tensão desviadora (MPa)	Duração (h)
A	10.0	350
B	14.0	1000
C	17.0	2200
D	16.0 - 18.0	2200

O ensaio A foi apresentado por Poiate Jr. *et al.* (2006). O ensaio B serviu como referencial de validação do Modelo de Duplo Mecanismo por Costa *et al.* (2005). Essa validação foi reproduzida no ABAQUS[®], como um dos exemplos de aferição, no item 4.2.1. Com relação aos ensaios C e D, é importante esclarecer que ambos são referentes à mesma curva experimental apresentada por Costa *et al.* (2005). A partir da Figura 3 do trabalho citado, verifica-se que a tensão desviadora aplicada pela câmara triaxial variou de 16 a 18 MPa ao longo da duração do ensaio, de aproximadamente 2200 h. Na simulação, adotou-se um modelo considerando uma tensão desviadora média de 17 MPa (ensaio C) e outro considerando a tensão desviadora aumentando linearmente em $9,09 (10^{-4})$ MPa/h (ensaio D).

Pretende-se reproduzir os resultados experimentais da deformação axial ao longo do tempo por meio de simulações numéricas adotando a Lei de Potência, o Modelo de Duplo Mecanismo e o Modelo de Multi Mecanismo.

5.2.2. Propriedades e condições iniciais

A halita é modelada como um material visco-elástico. As propriedades elásticas adotadas foram apresentadas na Tabela 3.2. Com relação aos modelos constitutivos, para a Lei de Potência, foram adotados os parâmetros da Tabela 3.3, para o Modelo de Duplo Mecanismo, os parâmetros da Tabela 3.4 e; por fim, para

o Modelo de Multi Mecanismo foram adotados os parâmetros da Tabela 3.5, nas duas configurações mencionadas no item 3.4.2.3.2.

Com relação às condições iniciais, todas as amostras são confinadas isotropicamente à uma tensão de 10 MPa. Todos os ensaios foram realizados sob temperatura constante de 86°C.

5.2.3. Modelo geomecânico e metodologia

Os modelos numéricos correspondentes aos testemunhos da halita brasileira foram mostrados na Figura 4.6, assim como as especificações de malha. A metodologia para simulação do ensaio foi tratada no item 4.2.1.

5.2.4. Resultados e discussões

Inicialmente, foram simulados os quatro ensaios empregando-se a Lei de Potência como modelo constitutivo do sal. A Figura 5.1 apresenta as curvas de deformação por fluência.

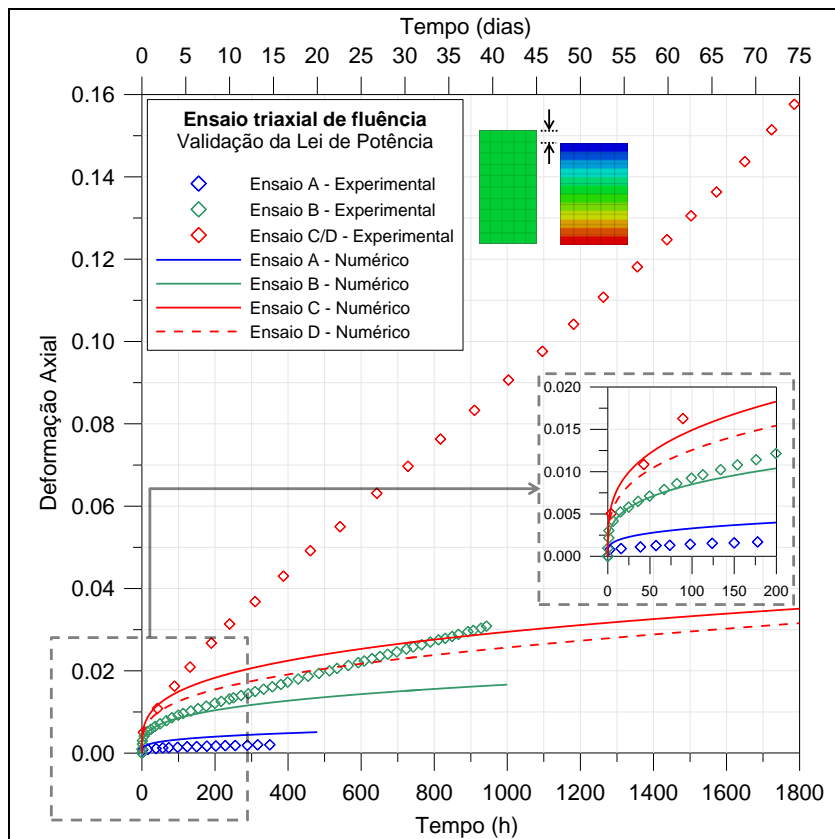


Figura 5.1 – Curvas de fluência em halita brasileira para validação da Lei de Potência.

Verifica-se que esse modelo fornece bons resultados para as curvas de deformação por fluência nas primeiras horas da análise. O endurecimento característico da fase primária da fluência é simulado pela Lei de Potência. Entretanto, nos casos analisados, os resultados não foram satisfatórios após 200 horas. Teoricamente, essa limitação era prevista. O expoente do tempo (m) da Lei de Potência introduzida por Lomenick & Bradshaw (1969) faz com que a curva de deformação tenda a horizontalizar-se para elevados valores de tempo. Com isso, a fase secundária da fluência não é modelada adequadamente.

Sabe-se que após a estabilização dos movimentos de discordâncias, o endurecimento tende a cessar, mas a fluência continua, sob taxa constante. Portanto, observa-se que a Lei de Potência tende a produzir resultados mais representativos em análises de curta duração.

A seguir, foram simulados os ensaios adotando-se o Modelo de Duplo Mecanismo. A Figura 5.2 apresenta as curvas de fluência obtidas.

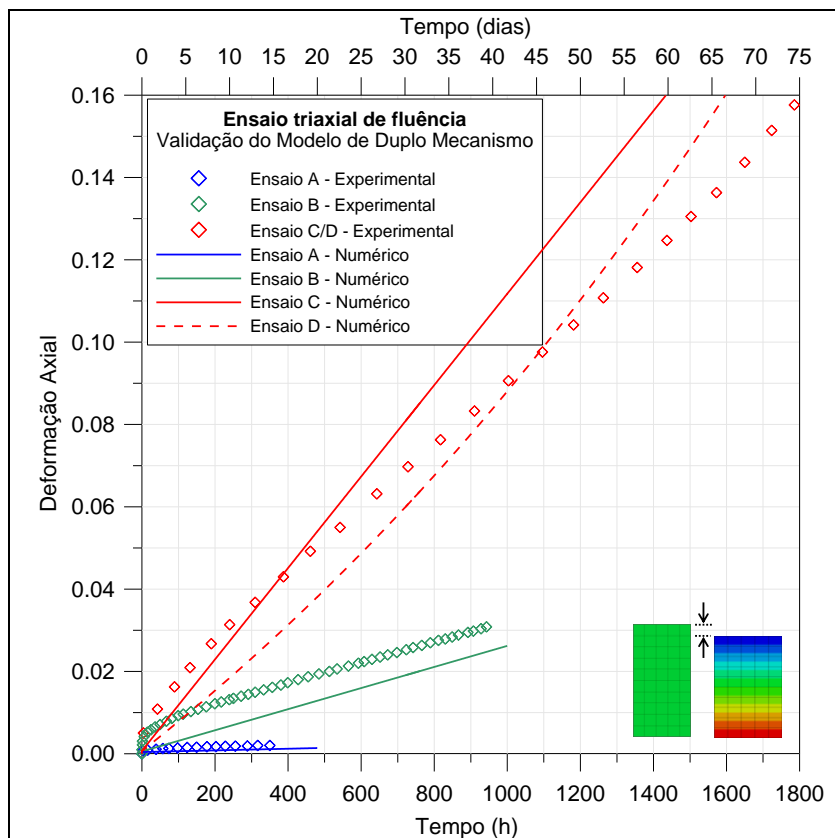


Figura 5.2 – Curvas de fluência em halita brasileira para validação do Modelo de Duplo Mecanismo.

O desempenho desse modelo, por não considerar a fluência primária intrínseca do material, não deve ser avaliado com base no resultado final, mas sim

com base na inclinação da reta gerada, que fisicamente significa a taxa de fluência secundária.

Bons resultados de taxa de deformação foram obtidos para os ensaios A e B. Já nos ensaios C e D os resultados não se ajustaram bem aos pontos experimentais após 500 horas. Esse insucesso pode estar relacionado à tensão desviadora variável.

Na Figura 5.3 são apresentadas as curvas de fluência obtidas pelo Modelo de Multi Mecanismo considerando os parâmetros de fluência secundária obtidos a partir da interpretação física de dados experimentais de halitas brasileiras – configuração MMM-A, item 3.4.2.3.2.

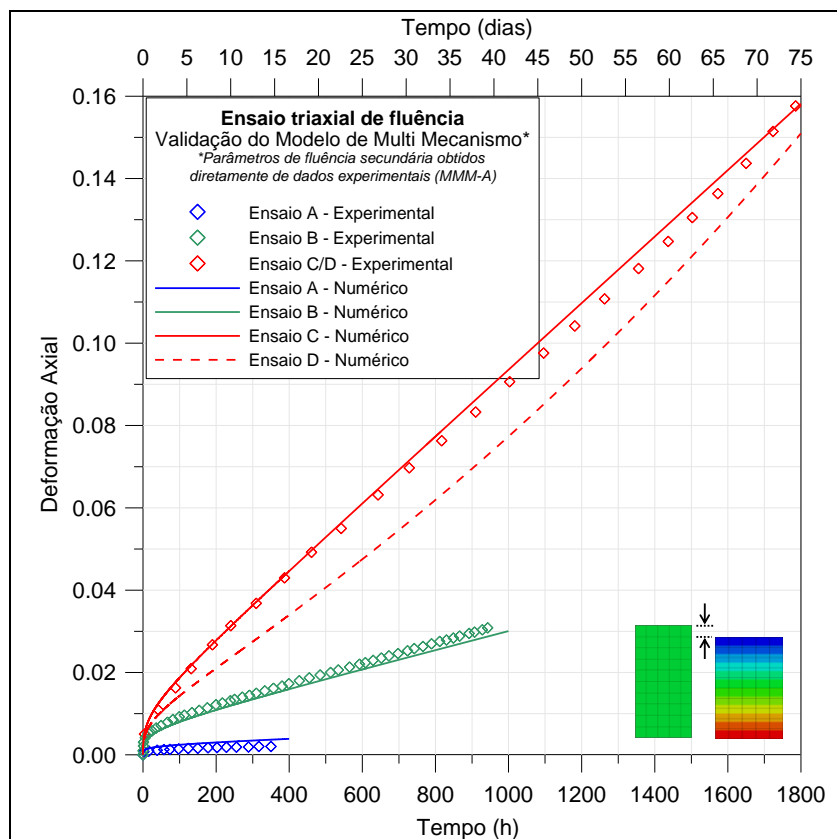


Figura 5.3 – Curvas de fluência em halita brasileira para validação do Modelo de Multi Mecanismo – parâmetros obtidos a partir da interpretação de dados experimentais (MMM-A).

Nesse modelo, as fases primária e secundária da fluência são simuladas. Excelentes resultados foram obtidos nas simulações A, B e C. Já a simulação do ensaio D, com tensão desviadora variável, não produziu bons resultados.

Semelhantemente, na Figura 5.4 são apresentadas as curvas de fluência do mesmo modelo constitutivo considerando os parâmetros de fluência secundária obtidos a partir do ajuste matemático de curvas sobre resultados experimentais de halitas brasileiras – configuração MMM-B, item 3.4.2.3.2.

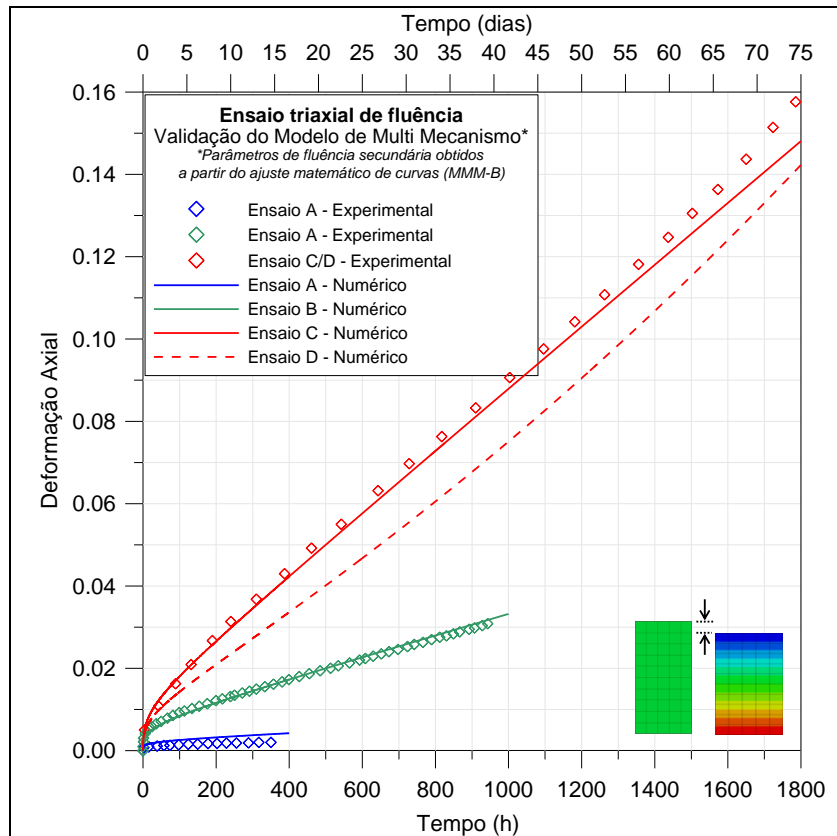


Figura 5.4 – Curvas de fluência em halita brasileira para validação do Modelo de Multi Mecanismo – parâmetros obtidos a partir de ajuste matemático de curvas (MMM-B).

Da mesma forma que a configuração anterior, excelentes resultados foram obtidos nas simulações A, B e C, bem como divergências foram verificadas na simulação do ensaio D.

A validação dos modelos e parâmetros com base nos resultados dos ensaios triaxiais de fluência é uma etapa preliminar, uma vez que os modelos foram calibrados a partir de dados experimentais destes ensaios, ou de ensaios similares.

Situações de campo envolvendo rochas salinas são referenciais de validação mais adequados, uma vez que envolvem materiais idealmente não amolgados e em diferentes estados de tensão e de temperatura.

5.3. Mina Taquari-Vassouras

5.3.1. Contexto

A segunda aplicação engenharia a ser retratada é uma galeria da mina de potássio Taquari-Vassouras, apresentada no item 2.4. Foi considerada uma galeria com seção retangular de 4 metros de largura e 3 metros de altura escavada em um

trecho do maciço rochoso composto predominantemente por halita, denominada E-III-2. Essa galeria foi estudada por Costa (1984) e D'Ellia (1991).

A galeria em questão está posicionada em uma região pouco susceptível à deslocamento, tornando-a ideal para calibração e validação de modelos constitutivos de fluência, uma vez que os deslocamentos são primordialmente induzidos por fluência, e não por movimentos de descontinuidades (Costa, *op. cit.*).

A Figura 5.5 apresenta a litologia e o posicionamento da galeria E-III-2 considerados, a partir do perfil estratigráfico da Mina Taquari-Vassouras apresentado por Costa (*op. cit.*).

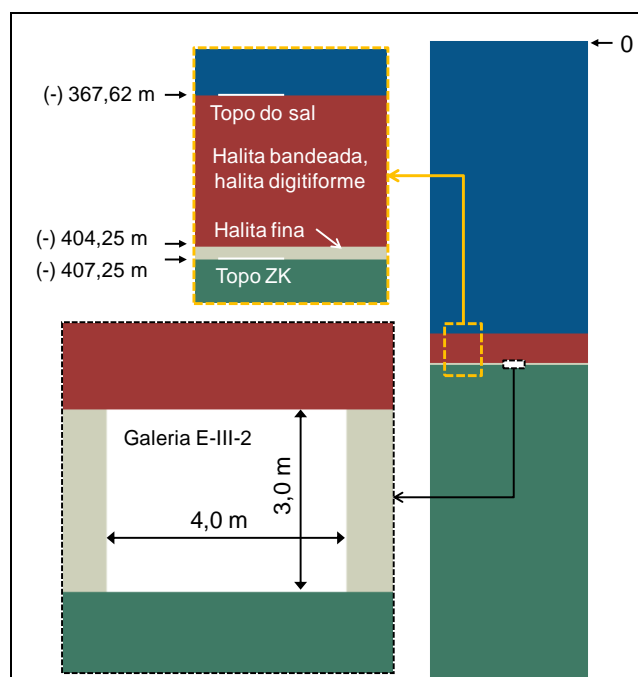


Figura 5.5 - Galeria E-III-2 – Litologia e posicionamento da galeria E-III-2.

A cota do topo da camada de halita fina foi aproximada para -404,25 m, com o intuito de facilitar a modelagem da galeria na litologia. No perfil apresentado por Costa (*op. cit.*), esse valor é -404,37 m, resultando em uma pequena diferença de 12 cm que não introduz erro à análise, uma vez que todo o maciço, para fins de fluência, é considerado homogêneo.

Deseja-se simular a convergência vertical ($\Delta\delta$) da galeria. Essa grandeza é dada pela soma dos deslocamentos em módulo medidos no topo (δ_t) e na base (δ_b) da seção, conforme a expressão (5.1):

$$\Delta\delta = |\delta_t| + |\delta_b| \quad (5.1)$$

A partir de D'Ellia (*op. cit.*), medições de convergência vertical ao longo de aproximadamente seis anos foram obtidas. A Figura 5.6 apresenta uma galeria da Mina Taquari-Vassouras, esquematizando a medição da convergência.

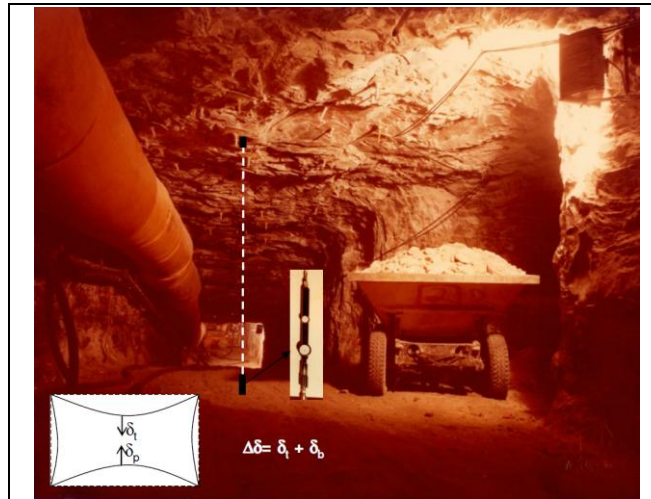


Figura 5.6 – Medição típica de convergência vertical em galeria de mineração (Costa *et al.*, 2010).

5.3.2. Propriedades e condições iniciais

A halita foi simulada como um material visco-elástico, conforme descrito no primeiro parágrafo do item 5.2.2. Foi adotado o peso específico de 21,29 kN/m³, a partir do valor médio de densidade medida em ensaios de laboratório (Tabela 3.1).

A camada acima do sal foi considerada como um material elasto-plástico, sem comportamento de fluência, representado pelo Modelo de Mohr-Coulomb. Foram adotadas propriedades de folhelho, conforme mostra a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Propriedades do folhelho.

	E (GPa)	ν	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Folhelho	19,10 *	0,15 *	22,56 **	4800 *	22 *
* Medeiros (1999); ** Costa <i>et al.</i> (2012).					

onde E é o módulo de elasticidade, ν é o coeficiente de Poisson, γ é o peso específico, c é a coesão e ϕ é o ângulo de atrito da rocha. Os dois últimos parâmetros são do Modelo de Mohr-Coulomb.

O estado de tensão inicial foi calculado conforme a expressão (4.2), considerando a isotropia de tensões. Segundo Costa (*op. cit.*), a temperatura na

mina pode ser assumida constante no valor de 43°C. A Figura 5.7 mostra as condições iniciais determinadas.

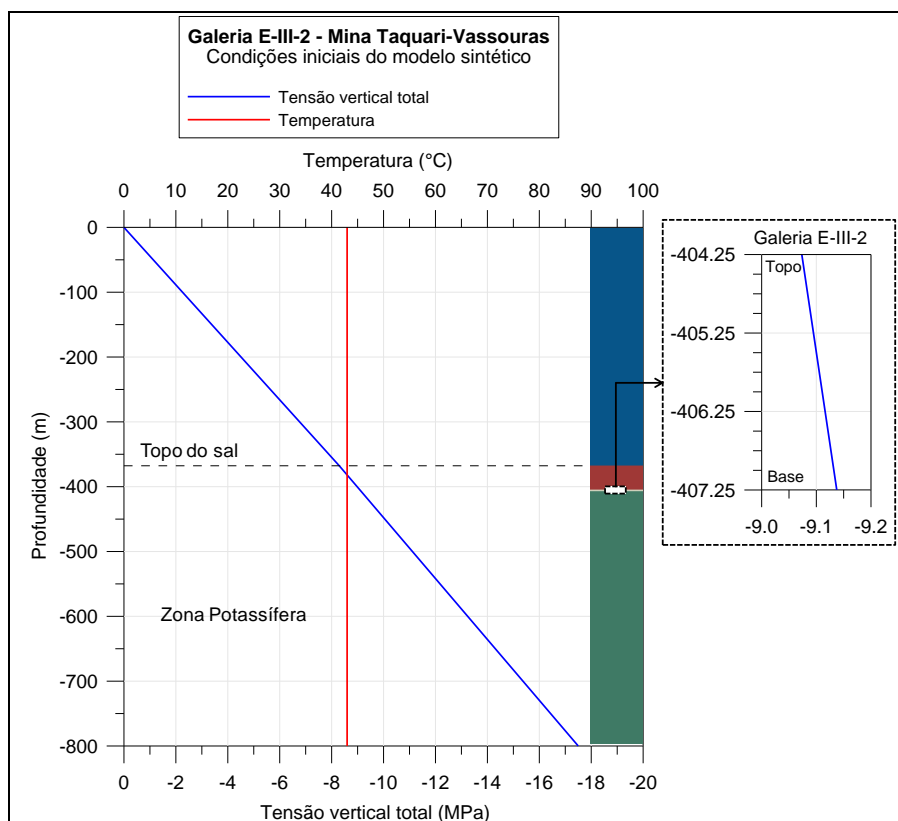


Figura 5.7 – Condições iniciais: carregamento geostático e temperatura.

5.3.3. Modelo geomecânico e metodologia

A análise de convergência vertical da galeria de mineração adotando um modelo bidimensional configura um estado plano de deformações. Ao longo seção típica da galeria, idealmente, o carregamento não varia. É possível valer-se da simetria, modelando-se metade da seção transversal da galeria.

A malha de elementos finitos é composta por 22200 elementos tipo CPE8R, totalizando 67223 nós. O modelo é simplesmente apoiado na borda direita e na base, representando a continuidade do maciço, bem como na borda esquerda, representando o eixo de simetria. O topo é livre, tratando-se do nível do terreno. A base do modelo foi considerada na cota -800,0 m, com o intuito de minimizar efeitos de borda. Foi considerada uma borda lateral com 100 vezes a largura da galeria, com o mesmo intuito. O estado de tensão inicial foi imposto ao modelo conforme descrito no item 4.2.2.6.3.

A escavação é considerada instantânea, de modo que nessa etapa todos os elementos correspondentes à galeria são desativados do modelo, de modo análogo ao apresentado para poços, no capítulo 4.

A Figura 5.8 apresenta o modelo de elementos finitos adotado.

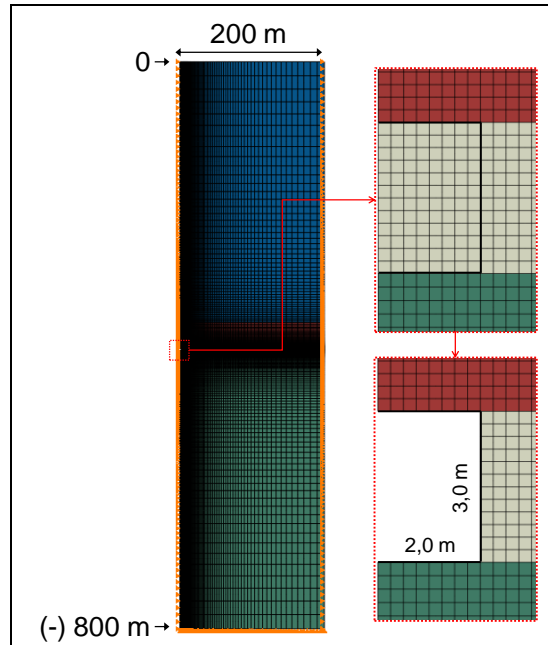


Figura 5.8 - Modelo de elementos finitos.

O tempo de simulação da convergência vertical foi de 3000 dias (8,2 anos).

5.3.4. Resultados e discussões

Inicialmente, apresenta-se na Figura 5.9 o estado de tensão inicial imposto ao modelo geomecânico, com deslocamentos funcionalmente nulos.

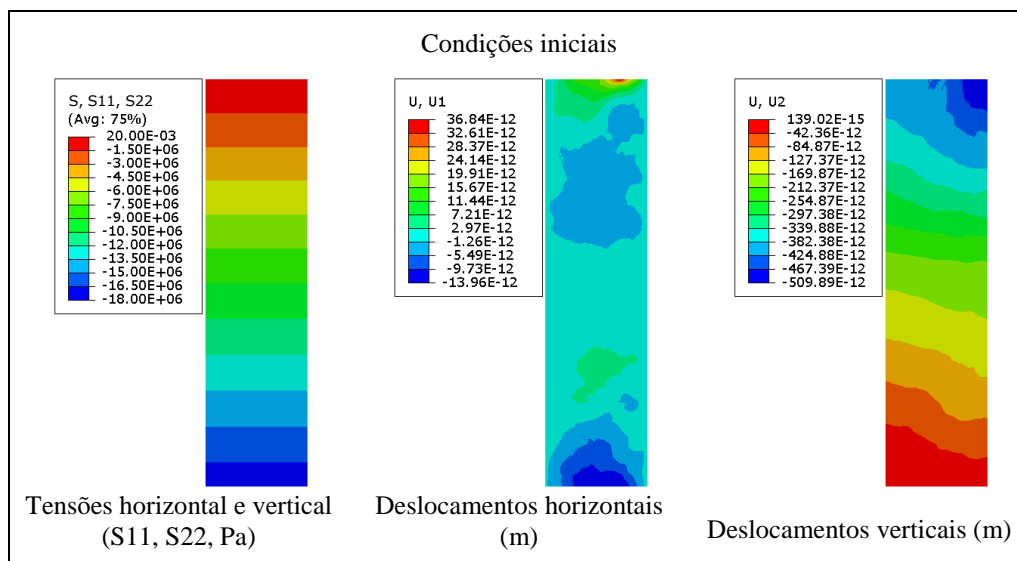


Figura 5.9 – Condições iniciais aplicadas ao modelo geomecânico.

A Figura 5.10 apresenta a evolução dos contornos da tensão vertical antes da escavação, após a escavação e após 3000 dias de simulação.

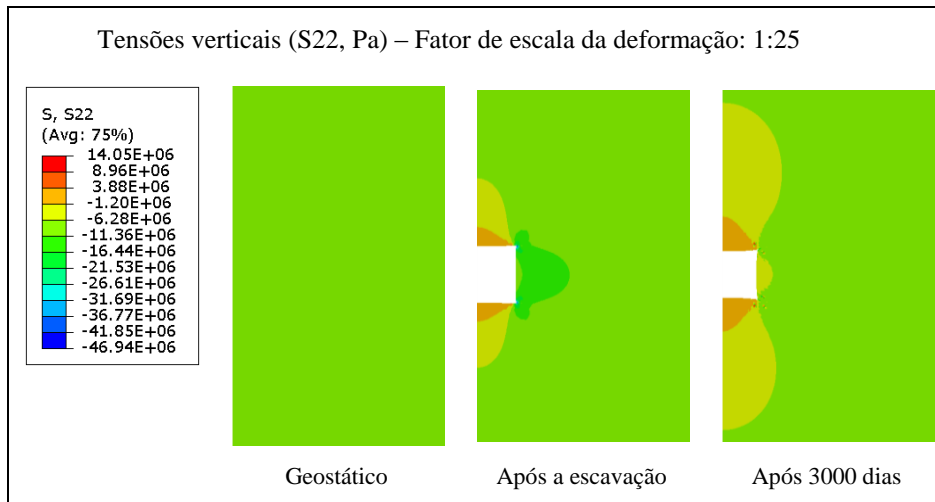


Figura 5.10 - Tensões verticais antes e depois da escavação da galeria e após 3000 dias – Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

Similarmente, a Figura 5.11 apresenta a evolução dos contornos da tensão horizontal para os mesmos intervalos de tempo.

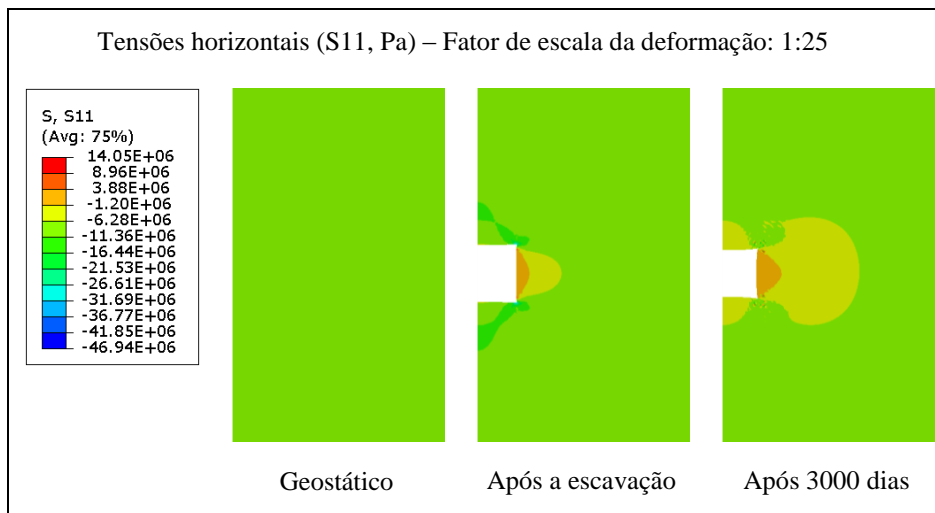


Figura 5.11 - Tensões horizontais antes e depois da escavação da galeria e após 3000 dias – Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

Em ambos os casos, domos de decompressão devido a escavação são observados, evidenciados em laranja. Verifica-se que à medida que o topo, base e parede da galeria se deslocam, a extensão do alívio de tensões verticais e horizontais aumenta.

A Figura 5.12 apresenta a evolução dos contornos da tensão desviadora antes da escavação, após a escavação e após 3000 dias de simulação.

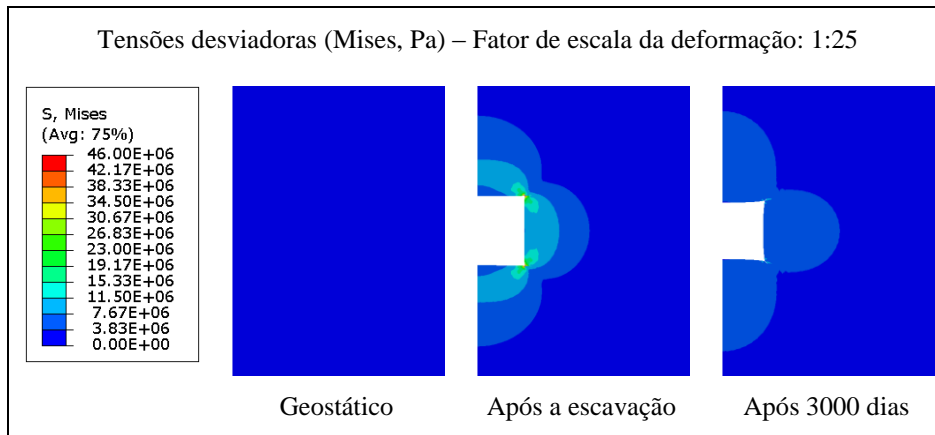


Figura 5.12 - Tensões desviadoras antes e depois da escavação da galeria e após 3000 dias – Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

Pode-se verificar que a tensão desviadora (ou equivalente de von Mises) atinge valores máximos imediatamente após a escavação. A escavação da galeria gera energia de deformação, ativando o mecanismo de fluência. Durante o período de 3000 dias, ocorre o alívio de tensões desviadoras pela fluência do sal, conforme idealizado pela mecânica das rochas salinas.

A Figura 5.13 apresenta a evolução dos contornos do deslocamento vertical antes da escavação, após a escavação e após 3000 dias de simulação.

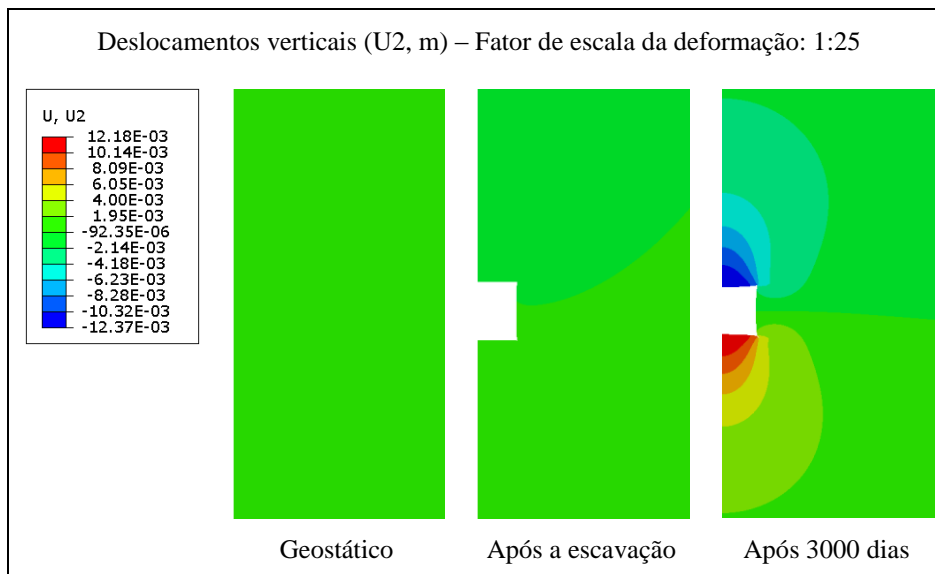


Figura 5.13 – Deslocamentos verticais antes e depois da escavação da galeria e após 3000 dias – Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

Observado-se os deslocamentos verticais e comparando as tensões desviadoras (Figura 5.12) verifica-se-se o efeito de dissipação de energia de deformação. À medida que o sal se deforma por fluência, o diferencial de tensões (tensões desviadoras) é reduzido.

Com relação aos dados experimentais para validação dos modelos constitutivos, deve-se considerar que os pinos de convergência foram instalados na galeria após a escavação. Desse modo, as medições em regime elástico (resposta do maciço à escavação), bem como durante parte da fluência primária podem ter sido prejudicadas. Naturalmente, isso pode comprometer a qualidade das estimativas no trecho primário da fluência em qualquer modelo constitutivo.

Foram consideradas duas alternativas para as curvas obtidas pelas simulações numéricas de convergência vertical da galeria. A primeira alternativa representa a condição ideal, contemplando deslocamentos devido à reação elástica à escavação, fluência primária e secundária, conforme mostrado na Figura 5.14.

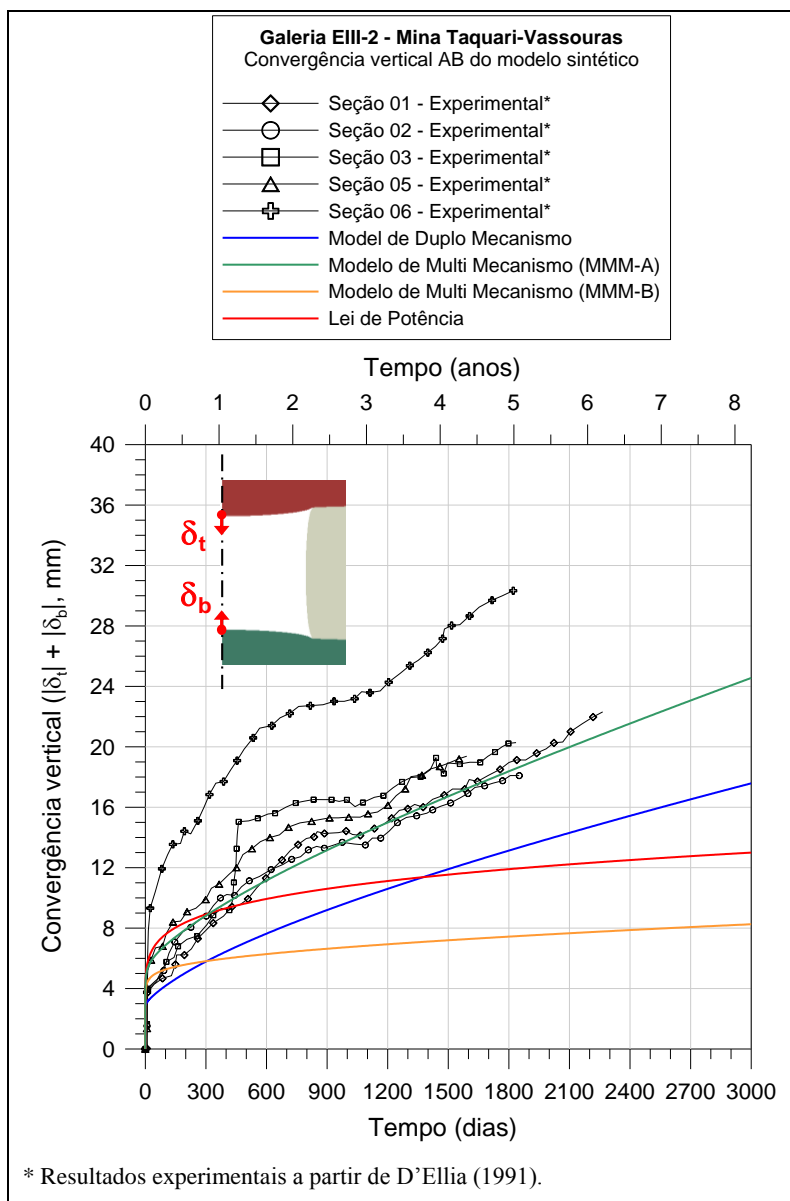


Figura 5.14 – Convergência vertical do modelo sintético da galeria E-III-2 considerando os deslocamentos elásticos.

A segunda alternativa considera somente os deslocamentos provocados pela fluência primária e secundária, conforme apresentado na Figura 5.15.

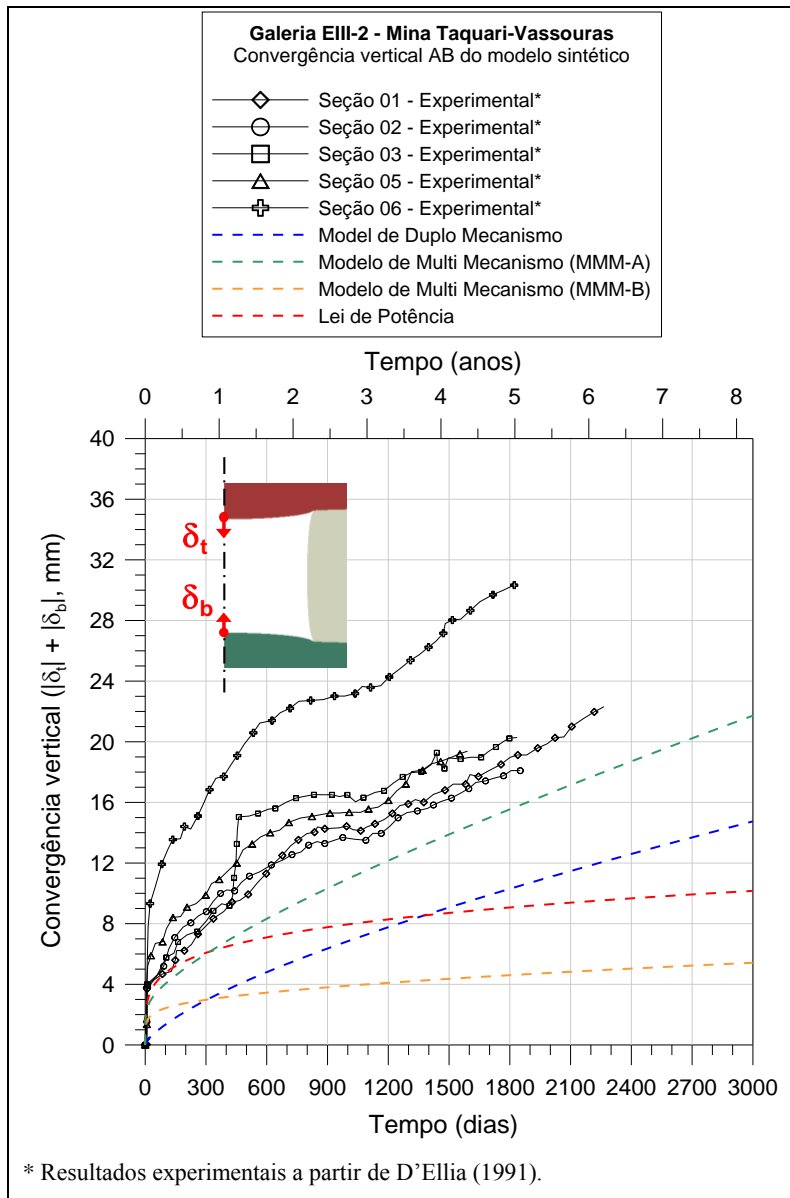


Figura 5.15 - Convergência vertical do modelo sintético da galeria E-III-2 desconsiderando os deslocamentos elásticos.

A partir da Figura 5.14 e da Figura 5.15, pode-se verificar que:

- Não houve concordância entre a curva simulada pela Lei de Potência e os dados experimentais após 300 dias, tanto na convergência vertical quanto na taxa de fechamento;
- O Modelo de Duplo Mecanismo produziu excelente ajuste aos dados experimentais em termos de taxa de fechamento, especialmente após o primeiro ano;

- O Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A) produziu excelente ajuste aos dados experimentais em termos de taxa de fechamento. Em termos de convergência vertical, um excelente ajuste às medições foi verificado na Figura 5.14, ao considerar os deslocamentos devidos à reação elástica da galeria à escavação;
- O Modelo de Multi Mecanismo (MMM-B) não se ajustou aos dados experimentais.

5.4. Poço 6-RJS-457

5.4.1. Contexto

A terceira aplicação de engenharia para validação dos modelos constitutivos é o poço 6-RJS-457, perfurado na Bacia de Campos em 1997 (Falcão, 2009). Esse poço foi objeto de estudo na dissertação de mestrado de Fernando Medeiros (Medeiros, 1999), na qual as análises numéricas foram realizadas adotando o simulador ANVEC® (Costa, 1984).

A Figura 5.16 esquematiza o poço na litologia característica do pré-sal.

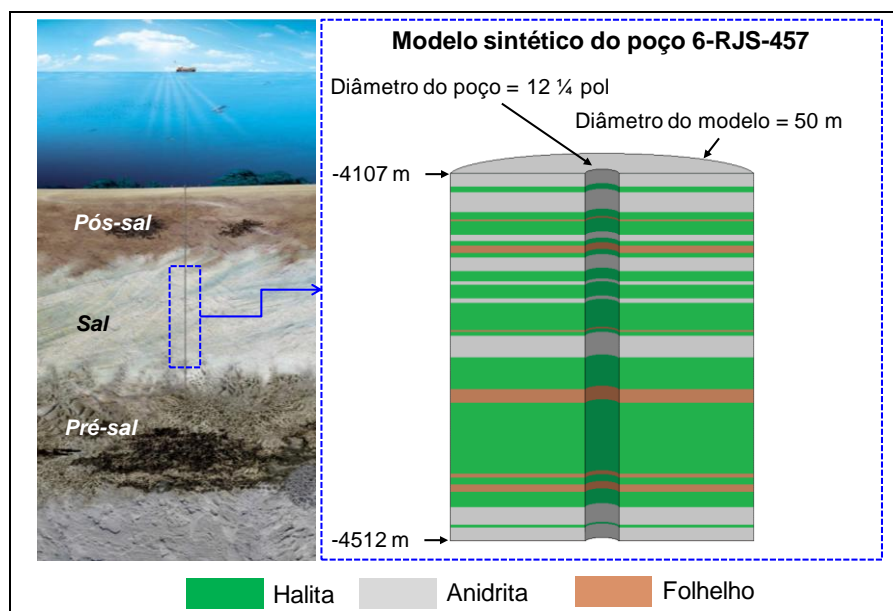


Figura 5.16 - Representação do poço 6-RJS-457 no contexto do pré-sal. Adaptação a partir do perfil representativo do pré sal (Christante, 2009).

O poço é considerado circular com diâmetro nominal de 12,25 polegadas ($\approx 31,25$ cm). É adotado um fluido de perfuração com peso específico de 14,3 lb/gal (≈ 16.8025 kN/m³). A temperatura da litologia na cota do topo (-4107 m) é de aproximadamente 117°C, conforme estimado por Medeiros (*op. cit.*). Foi adotada

uma lâmina d'água de 345 m. A camada Pós-sal é considerada homogênea para fins mecânicos, para a qual foi adotado o mesmo peso específico do folhelho (Tabela 5.2).

O poço 6-RJS-457 atravessa uma litologia evaporítica de cerca de 400 metros de espessura, composta por intercalações de anidrita, halita e folhelho. Para o modelo sintético, foi adotada a litologia apresentada por Medeiros (*op. cit.*) com ajustes do autor, conforme apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Litologia considerada no modelo sintético do poço 6-RJS-457.

Camadas	Topo (m)	Base (m)	Espessura (m)
Lâmina d'água	0	-345	345
Pós-Sal	-345	-4107	3762
Anidrita	-4107	-4122	15
Halita	-4122	-4128	6
Anidrita	-4128	-4150	22
Halita	-4150	-4158	8
Folhelho	-4158	-4160	2
Halita	-4160	-4175	15
Anidrita	-4175	-4182	7
Halita	-4182	-4187	5
Folhelho	-4187	-4195	8
Halita	-4195	-4200	5
Anidrita	-4200	-4215	15
Halita	-4215	-4226	11
Anidrita	-4226	-4230	4
Halita	-4230	-4245	15
Anidrita	-4245	-4250	5
Halita	-4250	-4280	30
Folhelho	-4280	-4282	2
Halita	-4282	-4286	4
Anidrita	-4286	-4310	24
Halita	-4310	-4345	35
Folhelho	-4345	-4360	15
Halita	-4360	-4438	78
Folhelho	-4438	-4442	4
Halita	-4442	-4450	8
Folhelho	-4450	-4458	8
Halita	-4458	-4475	17
Anidrita	-4475	-4494	19
Halita	-4494	-4497	3
Anidrita	-4497	-4512	15

A última camada de anidrita, cujo topo está na cota -4497 m foi adicionada como condição de contorno, com a mesma espessura da primeira camada de anidrita, cujo topo está na cota -4107 m. A consideração de camadas rígidas como condição de contorno é usual nesse tipo de análise (Poiate *et al.*, 2006).

5.4.2. Propriedades e condições iniciais

A halita foi modelada conforme descrito no primeiro parágrafo do item 5.2.2. Com relação à Lei de Potência, cabe mencionar que o parâmetro \bar{A} foi calculado para cada camada conforme descrito em 3.4.2.1. Anidrita e folhelho foram modelados como materiais elasto-plásticos, sem comportamento de fluência, adotando o Modelo de Mohr Coulomb. As propriedades do folhelho foram apresentadas na Tabela 5.2. As propriedades da anidrita são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Propriedades da anidrita.

	E (GPa)	ν	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Anidrita	55,11 *	0,36 *	28,63 *	900 **	37 **

* Calculado pelo autor a partir de dados experimentais apresentados por Poiate Jr. (2012);
** Medeiros (1999).

Para fins de estimativa de tensões horizontais, assume-se que todo o intervalo analisado encontra-se em estado isotrópico de tensões iniciais. No contexto da litologia evaporítica analisada, entende-se que essa aproximação é aceitável também para a anidrita e para o folhelho, pois essas rochas atuam como carregamento e condição de contorno das camadas salinas.

A temperatura é considerada constante em cada camada do modelo, sendo calculada pela expressão (4.3), adotando-se os parâmetros geotérmicos considerados são mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Parâmetros geotérmicos típicos (Costa *et al.*, 2012).

Parâmetros geotérmicos típicos		
TFM (°C)	Temperatura do Fundo do Mar	4.0
GTPOS (°C/km)	Gradiente Geotérmico no Pós Sal	30.0
GTS (°C/km)	Gradiente Geotérmico no Sal	12.0

Camadas espessas de sal foram subdivididas com o intuito de melhorar a aproximação da temperatura. Os valores obtidos são compatíveis com a estimativa inicial de 390 K no topo do modelo.

O carregamento geostático e a temperatura ao longo da profundidade são apresentados na Figura 5.17.

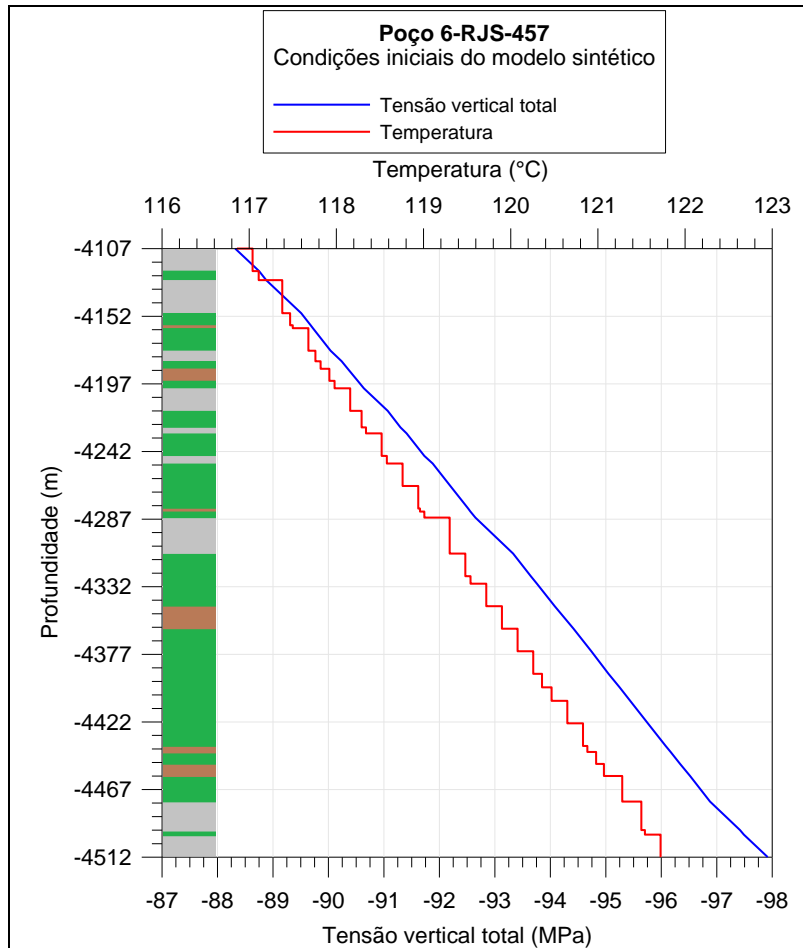


Figura 5.17 – Condições iniciais: carregamento geostático e temperatura.

5.4.3. Modelo geomecânico e metodologia

Adotou-se um modelo longitudinal (axissimétrico). A malha de elementos finitos tem 65312 nós e 21465 elementos tipo CAX8R. Foram consideradas as duas configurações de condições de contorno descritas em 4.2.3.2, ou seja, um modelo com o topo livre e outro com os deslocamentos restringidos no topo. A Figura 5.18 apresenta a malha de elementos finitos.

A metodologia de análise é a descrita no item 4.2.2.6. O estado de tensão inicial foi imposto ao modelo conforme descrito no item 4.2.2.6.3. Foi considerada a perfuração instantânea do poço, conforme descrito no item 4.2.2.4.

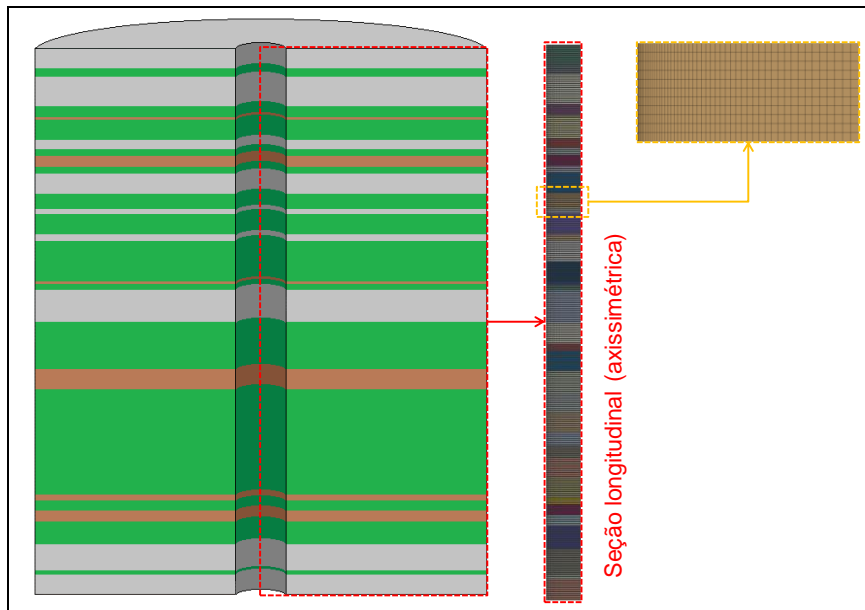


Figura 5.18 – Modelo de elementos finitos.

5.4.4. Resultados e discussões

A Figura 5.19 apresenta o estado de tensões inicial isotrópico. O modelo exibido tem o topo livre, representando a configuração menos rígida e, portanto, mais deslocável.

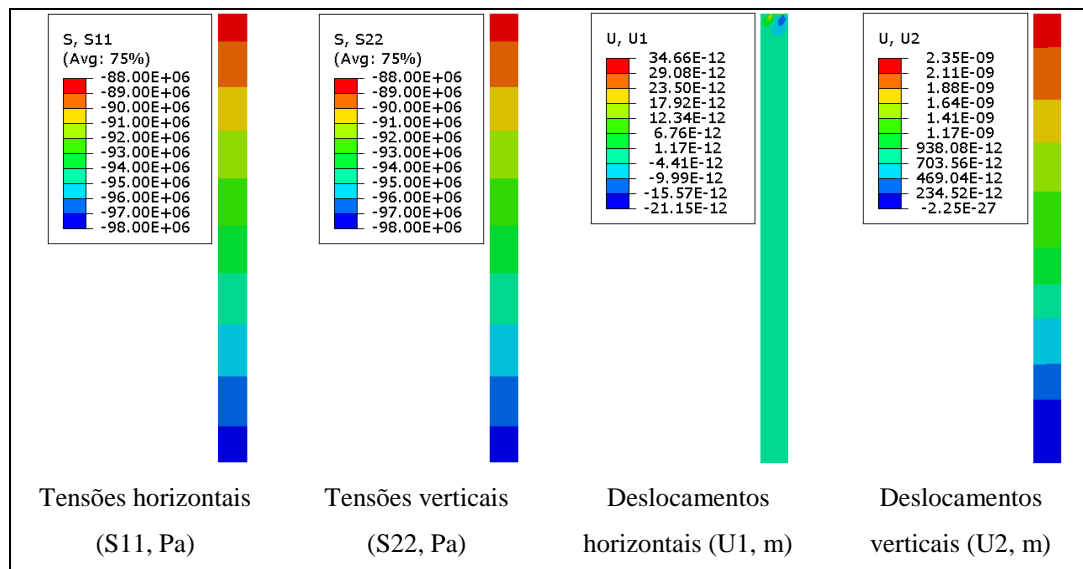


Figura 5.19 – Modelo geomecânico do poço 6-RJS-457 – Condições iniciais do modelo com topo livre.

A seguir, o poço é perfurado, reagindo com deslocamentos elásticos e, por conta do diferencial de tensões imposto, inicia-se o comportamento de fluência.

A Figura 5.20 apresenta o fechamento radial dos modelos com topo restrigido e livre, imediatamente após a perfuração e após 10 horas de simulação.

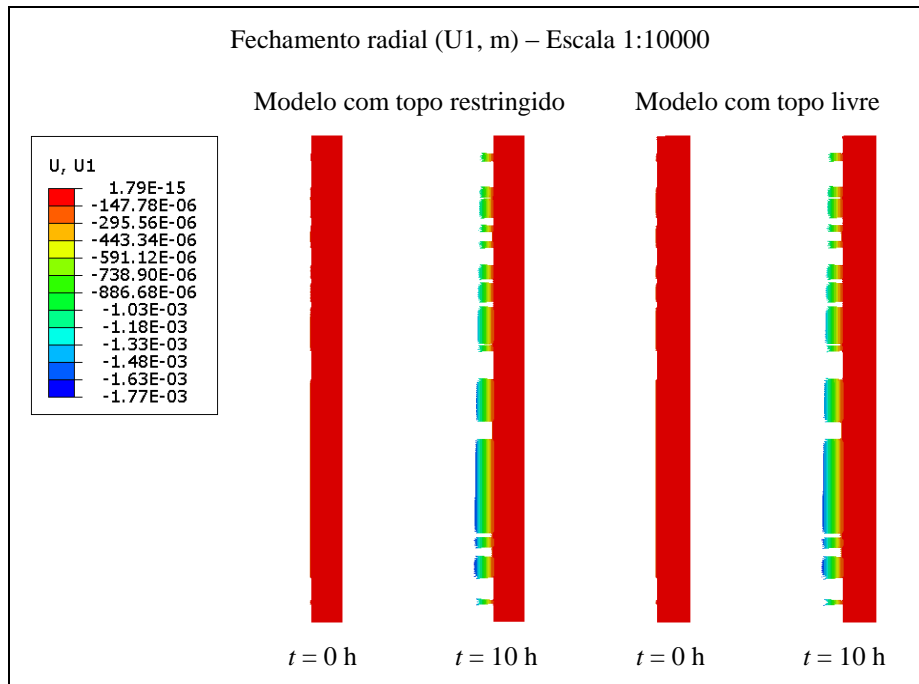


Figura 5.20 – Mapas de contorno do fechamento radial após a perfuração e após 10 horas de fluência dos modelos com topo restringido e livre – Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

Ao término da análise, após 10 horas de fluência, foi avaliada também a distribuição de deslocamentos verticais em ambos os modelos, com o intuito de observar a influência (ou não) do topo restringido nos resultados, que notoriamente ocultaria efeitos de subsidência. A Figura 5.21 apresenta os deslocamentos verticais dos modelos com topo restringido e topo livre.

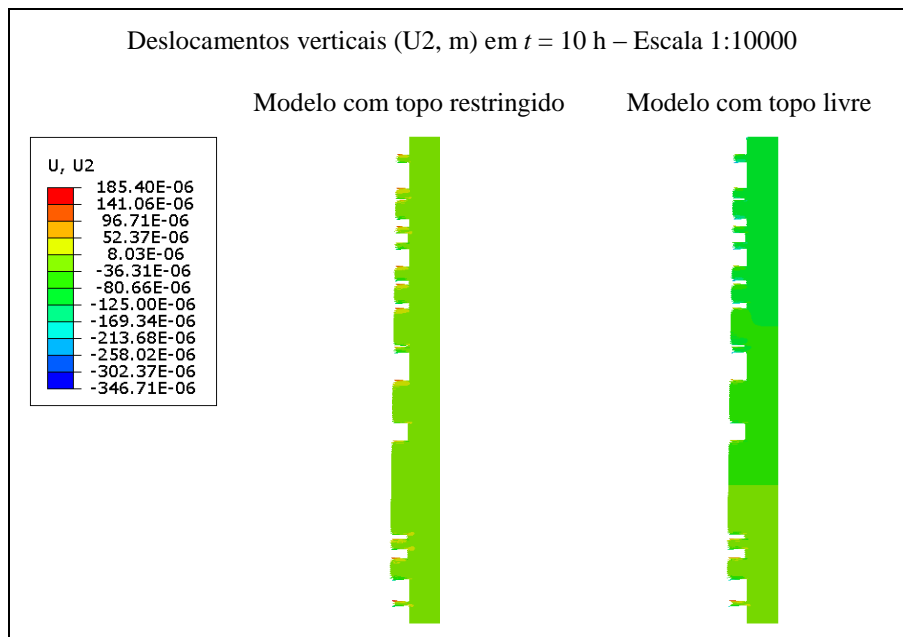


Figura 5.21 – Mapas de contorno do deslocamento vertical após 10 horas de fluência dos modelos com topo restringido e livre – Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

No modelo com topo restringido, os deslocamentos são nulos conforme prescrito. Já no modelo com topo livre, os deslocamentos observados não chegam à grandeza de milímetros. Portanto, o topo restringido não enrijeceu o sistema a ponto de influenciar os resultados.

A seguir, na Figura 5.22, apresenta-se o perfil de fechamento do poço (simulação numérica do perfil *caliper*) obtido com os três modelos constitutivos estudados, após a perfuração e após 10 horas de simulação, tanto para o modelo com topo restringido quanto para o com topo livre.

Conforme mostram os perfis, as configurações de apoio não influenciam os resultados, senão em um curto raio de influência próximo ao topo. Esse efeito ainda é atenuado pela presença de uma camada rígida de anidrita no topo (intervalo de -4107 m a -4122 m). Observa-se que a consideração ou não do apoio no topo não influenciou sequer o resultado da primeira camada salina.

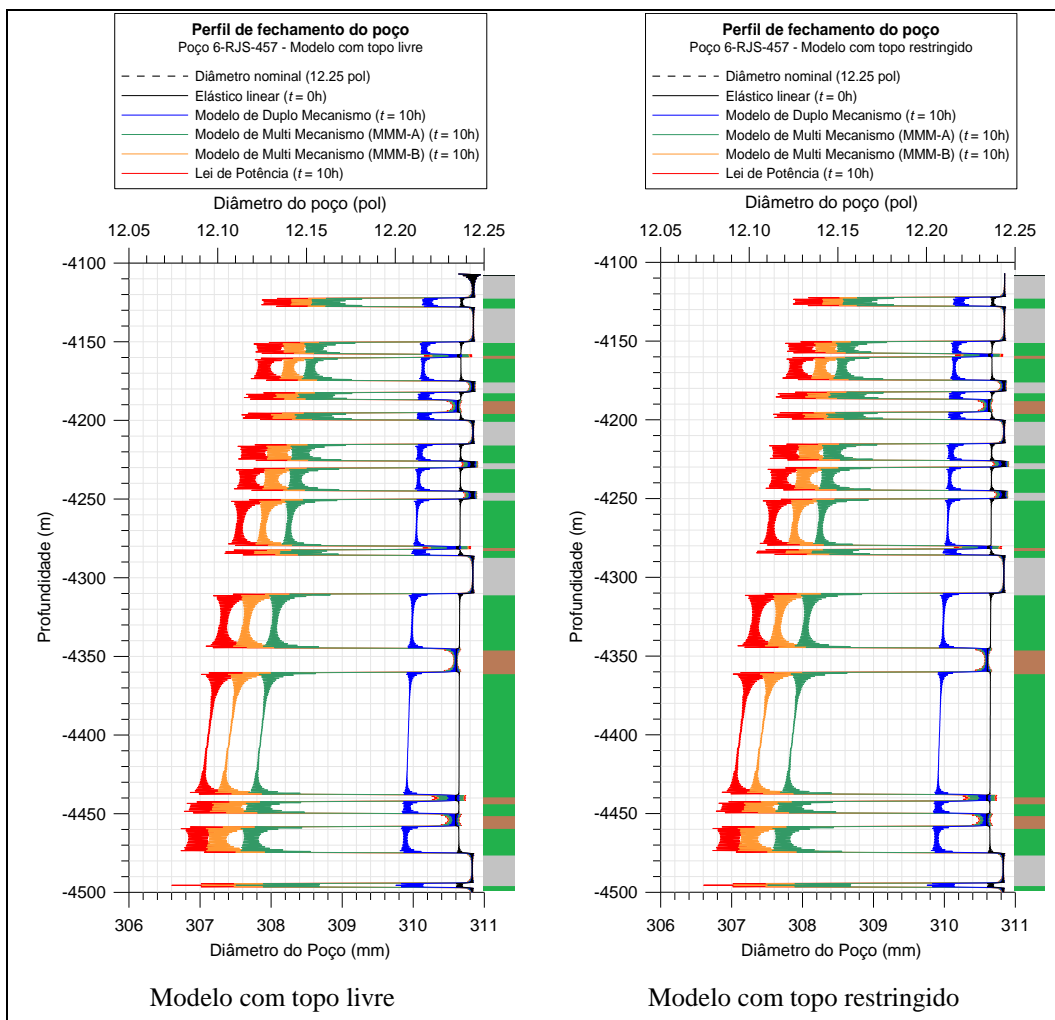


Figura 5.22 – Perfil de fechamento do poço (simulação numérica do perfil *caliper*).

Nos mapas de contorno e gráficos apresentados da Figura 5.20 a Figura 5.22 foram verificados trechos ruidosos nas curvas (efeito serrilhado). Isto ocorre devido à utilização de integração reduzida. Para certificar-se da qualidade da estimativa, bem como para validação com os resultados experimentais, novas análises foram realizadas considerando integração completa.

Medeiros (*op. cit.*) apresentou resultados de campo do poço – perfil *caliper*²⁵ –, com duas perfilagens, uma realizada após a perfuração e outra dez horas depois. Pretende-se, portanto, validar os modelos constitutivos simulando a perfilagem realizada.

Uma vez que os resultados experimentais foram apresentados dentro do intervalo -4100 a -4250 m, o mesmo intervalo será destacado no modelo numérico. As tensões desviadoras e do fechamento radial no poço após a perfuração e após 10 horas de fluência são mostrados na Figura 5.23.

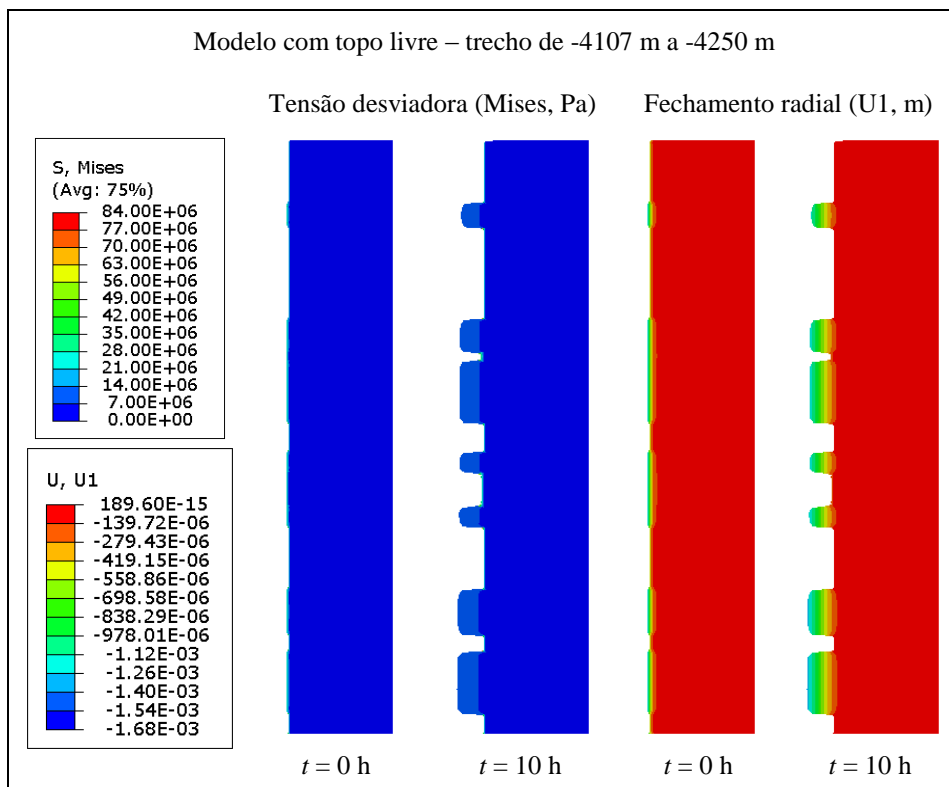


Figura 5.23 – Tensões desviadoras e fechamento radial no trecho -4107 m a -4250 m do modelo geomecânico adotando integração completa – Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

Para validação da solução numérica, é importante fazer a correta associação dos tempos (etapas) da análise numérica com os tempos de medição do *caliper*, no

²⁵ O perfil *caliper* é um tradicional ensaio de campo utilizado para avaliar a qualidade do poço e na detecção de *breakouts*, reconhecer a formação como um todo e estimar o volume de cimento necessário para o revestimento do poço (Reinecker *et al.*, 2003).

campo. A primeira medição foi realizada após a perfuração, conseqüentemente, o diâmetro inicial do *caliper* refere-se ao diâmetro numérico após a perfuração. A segunda medição do *caliper*, após 10 horas, corresponde a $t = 10$ h das análises numéricas.

Outro fato importante a considerar é que o *caliper* mede o diâmetro do poço independente dos mecanismos atuantes, de modo que a fragmentação da formação, efeitos de dissolução, heterogeneidades e outros mecanismos durante a perfuração que implicam em deformação são contabilizados nas medições. Dessa forma, a validação deve ser feita com base nas diferenças entre as medições em 0 h e 10 h do *caliper* real, e não com base em valores absolutos, assumindo-se que a fluência governe o fechamento durante esse intervalo. A Figura 5.24 apresenta os resultados de campo, reproduzidos de Medeiros (*op. cit.*).

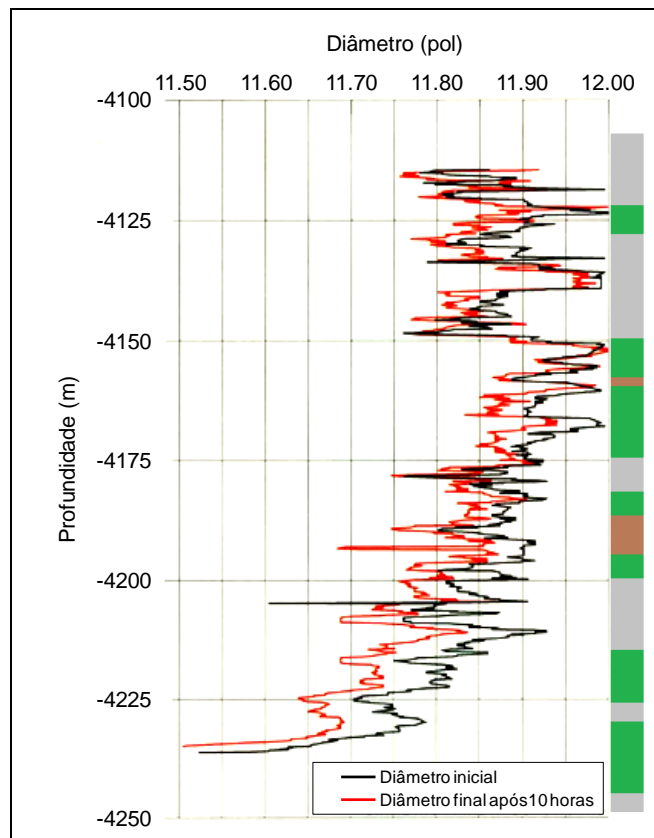


Figura 5.24 – Perfil *caliper* do poço 6-RJS-457 (adaptado de Medeiros, 1999).

A Figura 5.25 apresenta os perfis de fechamento diametral (análogos ao perfil *caliper*, mas obtidos numericamente) tanto considerando integração reduzida quando integração completa.

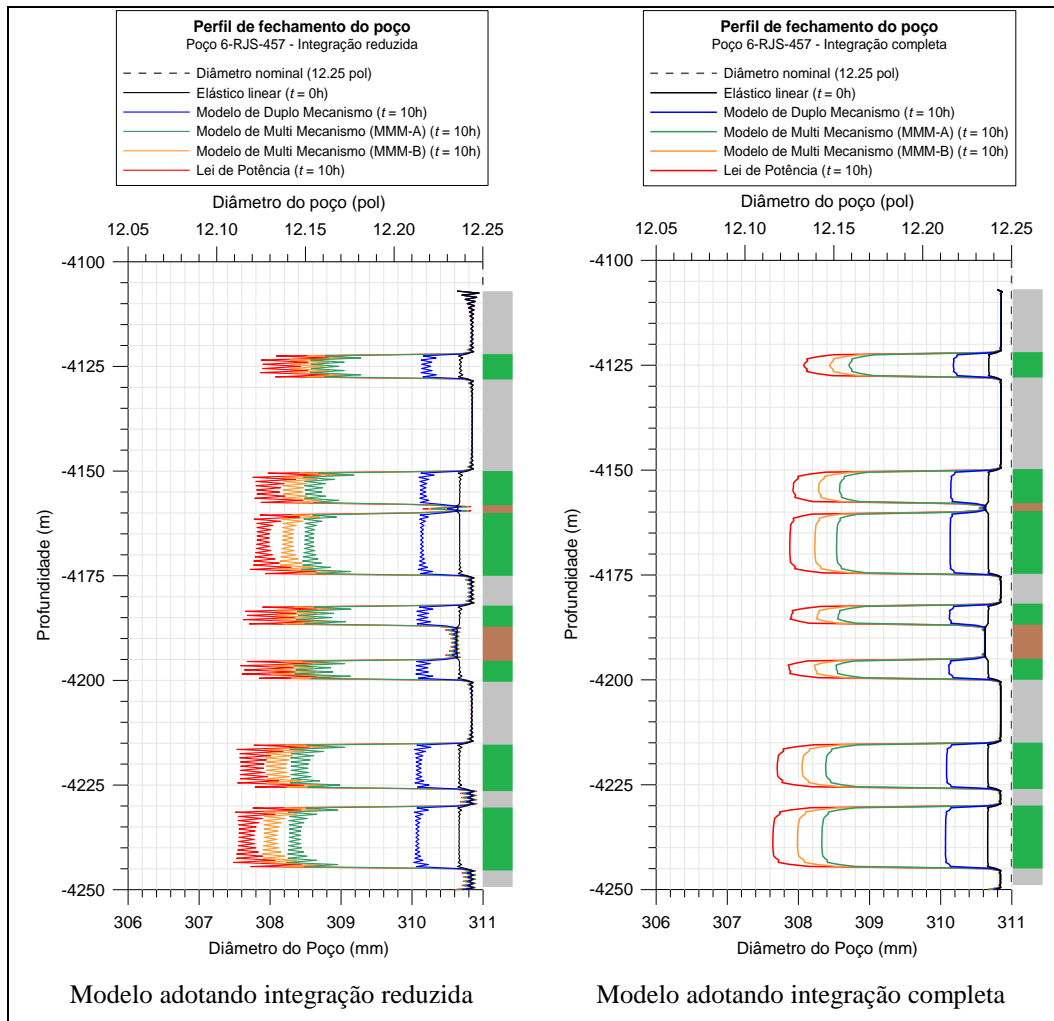


Figura 5.25 – Perfil de fechamento diametral do poço ao longo do intervalo (-) 4100,0 m a (-) 4250,0 m.

A Tabela 5.6 apresenta o resumo dos resultados obtidos a partir da Figura 5.25, considerando as camadas mais superior e mais inferior nos modelos, adotando integração completa.

Tabela 5.6 - Comparação de resultados considerando os modelos geomecânicos com integração completa.

Modelo	Fechamento diametral (pol)	
	Autor	Valores de referência (Medeiros, <i>op. cit.</i>)
Perfil <i>Caliper</i> (experimental)	-	0,050 – 0,100
Lei de Potência	0,104 – 0,121	0,120
Modelo de Duplo Mecanismo	0,020 – 0,024	0,026 – 0,032
Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A)	0,079 – 0,099	-
Modelo de Multi Mecanismo (MMM-B)	0,090 – 0,107	-

Da Tabela 5.6, pode-se verificar que:

- Pela Lei de Potência, foi verificado um intervalo de fechamento entre 0,104 e 0,121 polegadas. Com base no intervalo medido no perfil *caliper*, observa-se que os resultados excederam sutilmente o limite superior, contudo, forneceram uma boa aproximação. A simulação também está em concordância com o resultado numérico apresentado por Medeiros (*op. cit.*);
- Pelo o Modelo de Duplo Mecanismo, foi verificado fechamento de 0,020 a 0,024 polegadas – inferior, mas com a mesma ordem de grandeza dos resultados dos outros modelos. Esse modelo não deve ser avaliado com base no fechamento absoluto (e sim com base na taxa de fechamento). Comparando-se a solução obtida com a apresentada por Medeiros (*op. cit.*), valores próximos são verificados, aferindo a solução numérica. Deve-se verificar que o conjunto de parâmetros adotado nesta pesquisa foi determinado a partir de amostras da formação Muribeca, ao passo que a solução numérica de referência foi baseada em parâmetros determinados a partir de amostras da Mina Taquari-Vassouras. A taxa de deformação de referência ($\dot{\epsilon}_0$) de Medeiros (*op. cit.*) é superior, justificando resultados de referência superiores aos obtidos aqui;
- Para o Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A), verificou-se fechamento de 0,079 a 0,099 polegadas, estando dentro do intervalo de fechamento medido pelo *caliper*.
- Para o Modelo de Multi Mecanismo (MMM-B), foram verificados fechamentos entre 0,090 a 0,107, tendendo para o limite superior dos resultados experimentais.

Portanto, em termos de validação dos modelos constitutivos com base em resultados experimentais, verifica-se que tanto a Lei de Potência quando o Modelo de Multi Mecanismo produziram resultados concordantes com o intervalo de fechamento medido pelo *caliper*, especialmente o segundo.