4
Estudo da Reativação da Falha – Resultados

A partir dos modelos numéricos apresentados no Capítulo 3, realizou-se um estudo sobre a possibilidade de reativação da falha ao longo de 1200 dias de injeção de água no reservatório para o modelo considerando a falha como um plano. Para o caso do modelo numérico que considera uma zona de falha com plasticidade, o tempo de injeção foi de 4000 dias. As análises se concentraram na avaliação das tensões no plano de falha e zona de falha devido ao processo de injeção. No modelo que considera interações de contato, a verificação da reativação foi efetuada a partir da função CSTATUS (disponível no Abaqus) que mapeia as regiões onde ocorre o deslizamento (*slipping*). Já no modelo que considera plasticidade, a verificação da ruptura foi realizada através da análise conjunta entre a trajetória de tensões e a envoltória de ruptura. Os itens a seguir ilustram o comportamento obtido para cada um dos modelos.

4.1.
Modelos numéricos considerando interações de contato

Os subitens a seguir se referem às análises realizadas utilizando a abordagem de interações de contato para estudar o processo de reativação do plano de falha, cuja fundamentação teórica está apresentada no Capítulo 3.

4.1.1.
Modelo com plano de falha inclinada a 80° em relação à horizontal

Os resultados que estão apresentados a seguir se referem às análises realizadas para o modelo que contém o plano de falha inclinado a 80° em relação à horizontal.

A Figura 4.1 apresentada a seguir ilustra a face da falha analisada em relação ao modelo completo. A área foi amplificada e destacada de forma a facilitar a visualização dos pontos onde a reativação da falha foi iniciada. O retângulo amarelo indica o reservatório.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

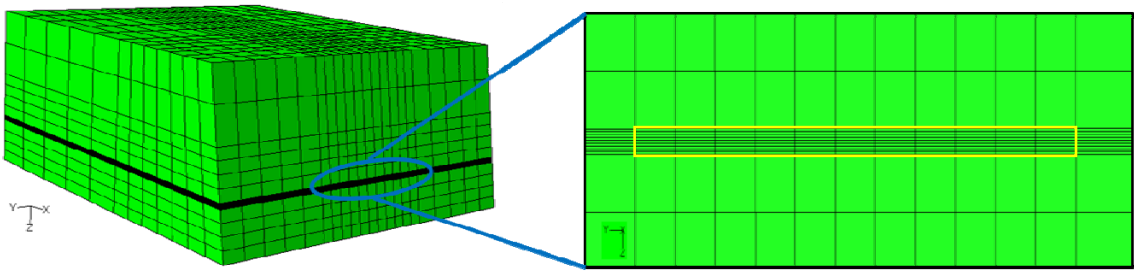

Figura 4.1 – Área amplificada da face do plano de falha de 80° onde foi avaliada a reativação

Para ilustrar a evolução do processo de reativação ao longo do tempo de análise (1200 dias), elencou-se seis tempos, são eles: 1, 113, 363, 663, 963 e 1200 dias. Cabe ressaltar os intervalos de tempo das análises são previamente definidos pelo simulador Eclipse para que seja garantido o balanço de massa do problema de fluxo.

A sequência de Figuras a seguir ilustra a evolução do processo de reativação da falha devido ao processo de injeção de água. A legenda que acompanha cada Figura define duas situações: *sticking* (vermelho) o qual se refere à superfície sem deslocamento e *slipping* (verde) que se refere a ocorrência de deslocamento tangencial. A situação *open* (azul) está relacionada à separação entre as superfícies da falha. Devido ao elevado nível de tensões de compressão, o mecanismo predominante é de cisalhamento, não existindo assim, separação entre as superfícies.

Deve ser salientado que a verificação de tensões cisalhantes realizada pelo Abaqus para a definição das situações *sticking/slipping* é feita através dos condicionais apresentados no final do Capítulo 3, e que estão apresentados novamente neste capítulo por conveniência.

$$\begin{cases} \tau_{eq} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} < \tau_{crit} = \min(\mu p, \tau_{\max}) \rightarrow condição\, stick \\ \tau_{eq} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} = \tau_{crit} = \min(\mu p, \tau_{\max}) \rightarrow condição\, slip \end{cases}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

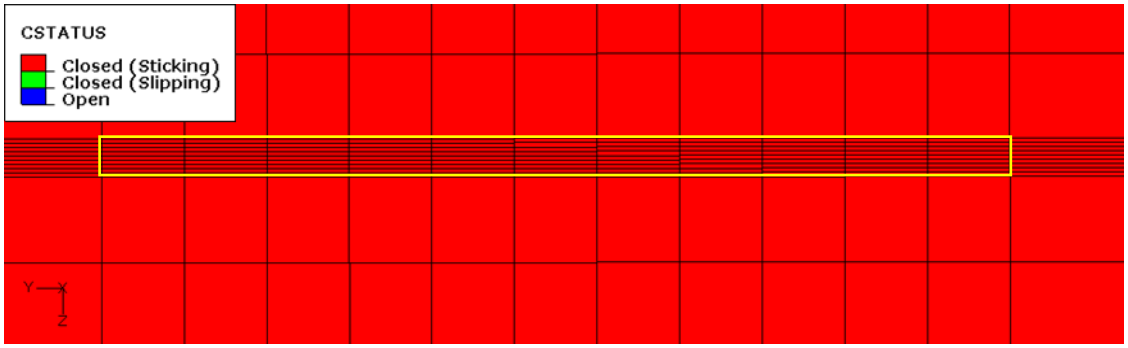

Figura 4.2 – Deslocamento tangencial da falha de 80° para t = 1 dia

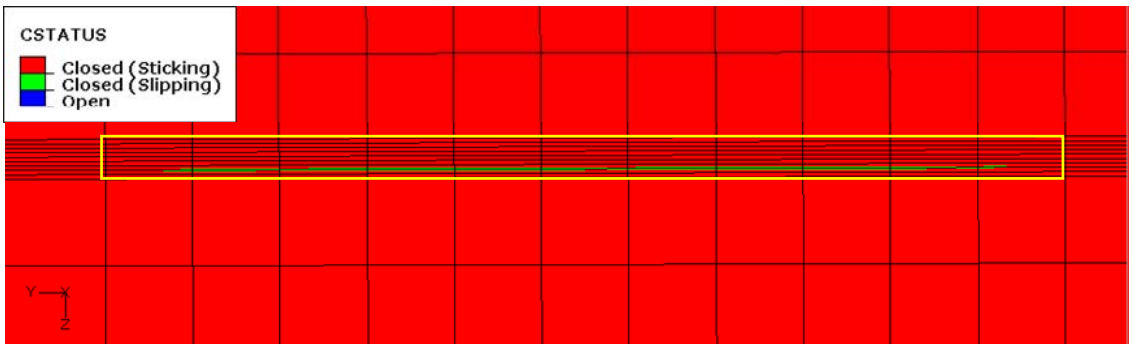

Figura 4.3 – Deslocamento tangencial da falha de 80° para t = 113 dias

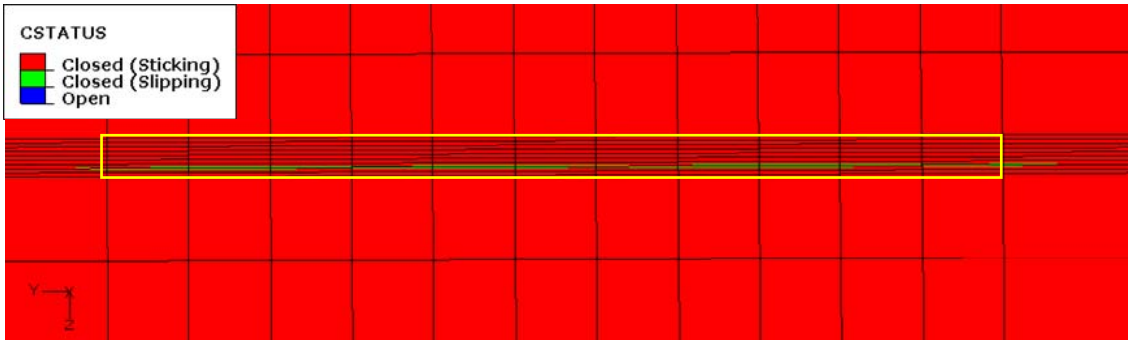

Figura 4.4 – Deslocamento tangencial da falha de 80° para t = 363 dias

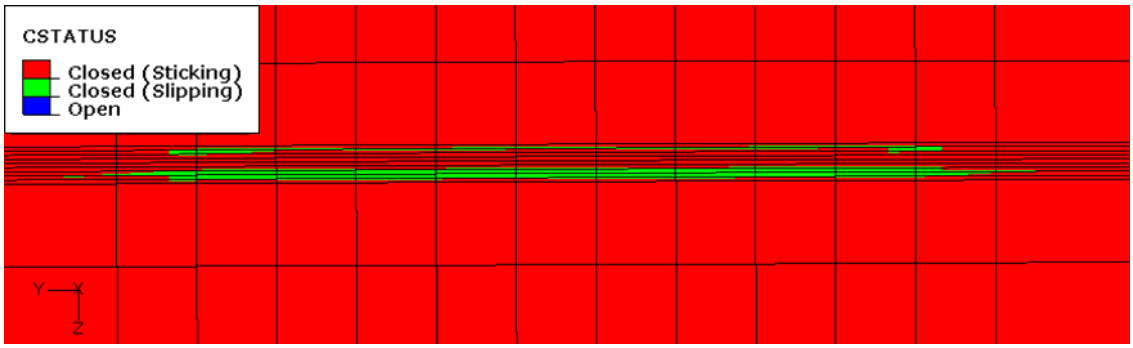

Figura 4.5 – Deslocamento tangencial da falha de 80° para t = 663 dias

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

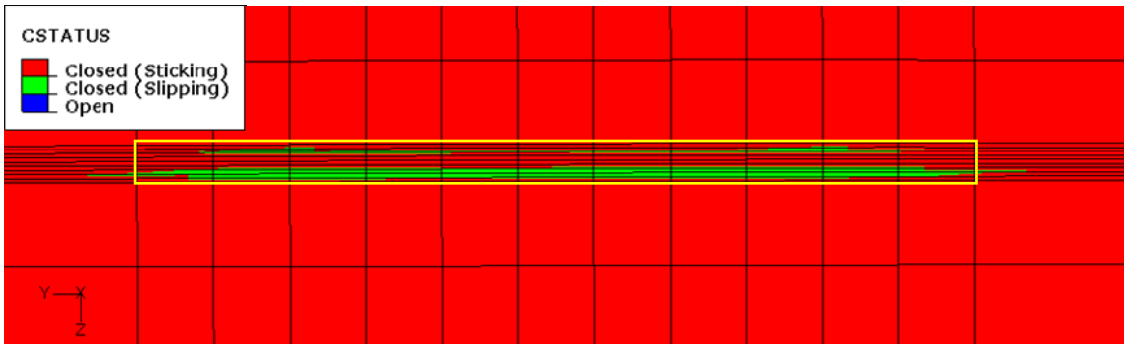

Figura 4.6 – Deslocamento tangencial da falha de 80° para t = 963 dias

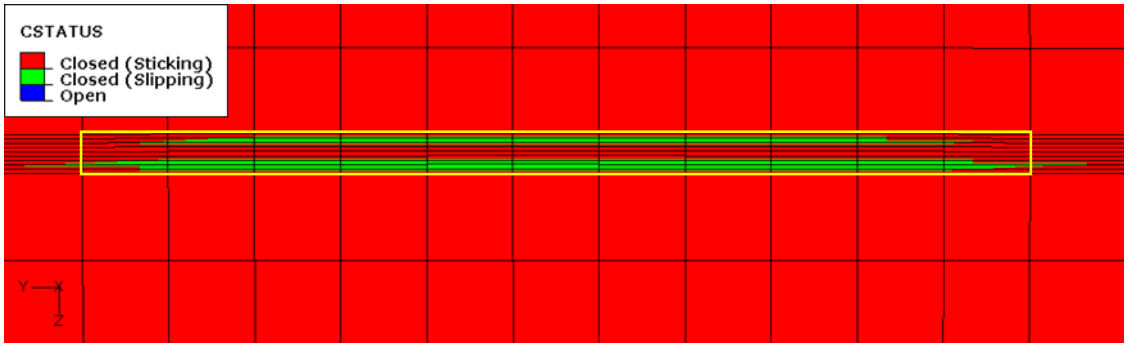

Figura 4.7 – Deslocamento tangencial da falha de 80° para t = 1200 dias

Pode ser observado pela análise das Figuras 4.2 – 4.7 que a falha inicia o processo de reativação de maneira localizada no reservatório após 113 dias de injeção de água. Aos 363 dias, o critério de cisalhamento definido foi atingido em uma área maior do reservatório. Para 663 dias de injeção, observa-se que a reativação se apresenta em uma extensão maior, abrangendo boa parte do reservatório. Para 963 dias, percebe-se uma evolução da reativação para mais camadas do reservatório. Já para 1200 dias, observa-se que a reativação ocorre em grande parte do reservatório, permanecendo apenas a porção central sem deslocamento tangencial. Em relação ao tempo de simulação, para este grau de refinamento, a simulação hidromecânica parcialmente acoplada teve duração de aproximadamente 2.5 horas.

Portanto, para o caso apresentado, pode-se afirmar que a configuração de poços injetores bem como suas vazões de 1100 m³/dia resultou no início do processo de reativação de falha com 113 dias de injeção.

Visando confirmar os resultados apresentados a respeito da localização da reativação de falha, apresentado nas Figuras 4.2 – 4.7, compilaram-se os resultados da tensão cisalhante equivalente (τ_{eq}) e da tensão cisalhante critica

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

(τ_{crit}), de forma que quando a razão entre elas atinge a unidade, ocorre o início do processo de deslizamento, conforme pode ser observado na Figura 4.9. Os nós avaliados estão apresentados na Figura 4.8. Cabe ressaltar que os nós escolhidos fazem parte do plano da falha.

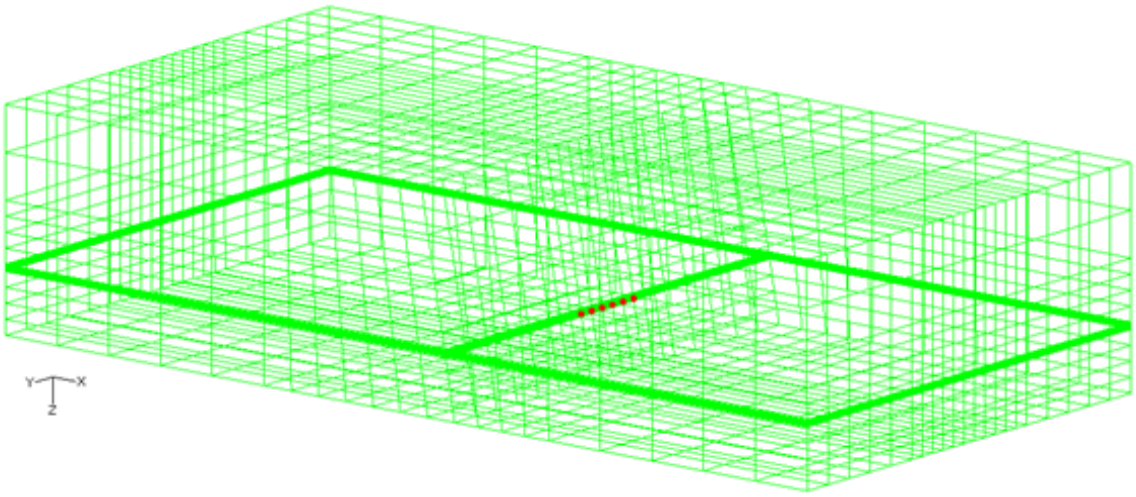

Figura 4.8 – Conjunto de nós onde foram avaliadas as tensões cisalhantes e normais no plano de falha de 80°

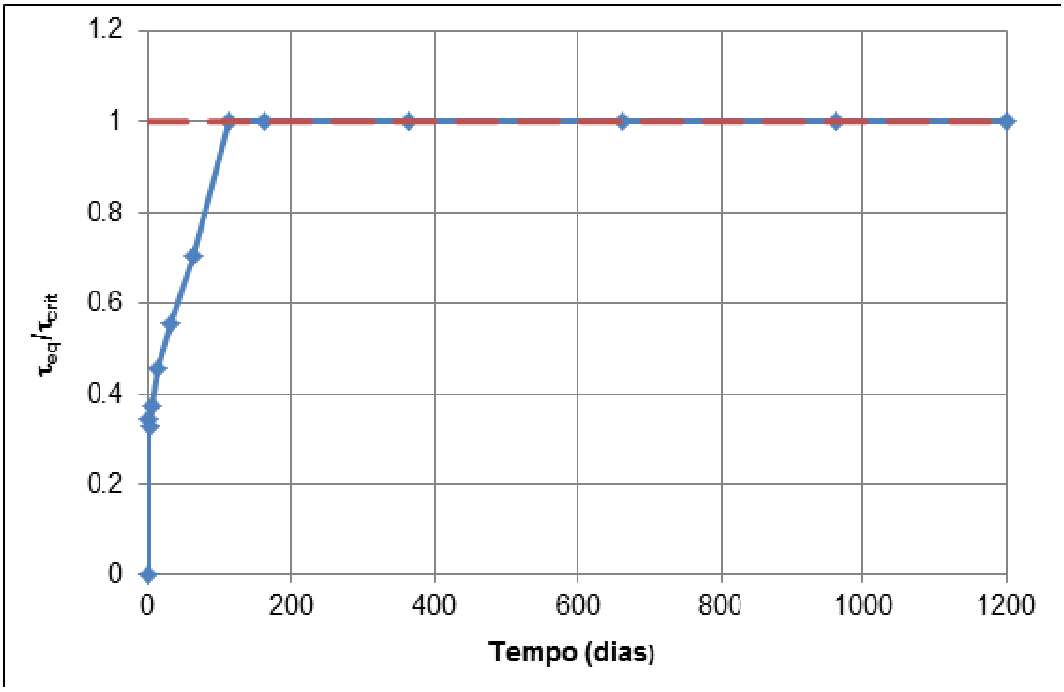

Figura 4.9 – Razão entre as tensões cisalhantes equivalente (τ_{eq}) e crítica (τ_{crit}) em função do tempo de análise para o plano de falha de 80°

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

Pela análise da Figura 4.9 pode ser observado que as relações entre as tensões cisalhantes equivalente e crítica corroboram os resultados gráficos fornecidos pelo CSTATUS, isto é, o início do processo de reativação ocorreu após 113 dias de injeção de água no reservatório. Embora tenha sido adotada uma tensão cisalhante limite (τ_{max}) de forma a evitar pressões de contato elevadas que gerem tensões de cisalhamento não realísticas, notou-se pela análise dos resultados que a reativação da falha ocorreu pela igualdade entre τ_{eq} e $\tau_{crit} = \mu p$.

Foram avaliados, também, o desenvolvimento de pressões de contato (CPRESS) e de tensões cisalhantes (CSHEAR 1) no plano de falha na porção do reservatório, conforme apresentado na Figura 4.10 e 4.11 respectivamente.

Pode ser observado que o aumento da pressão de poros implica em um aumento da pressão de contato com o tempo. Isto se deve ao fato de que a porção que contém os poços injetores tende a levantar a porção sem os poços, fazendo com que a pressão de contato entre as superfícies aumente.

Em relação à tensão cisalhante no contato, observa-se que ela apresenta um valor máximo após 113 dias de injeção. Posteriormente, o valor apresenta pouca variação. Este comportamento pode ser explicado pela consideração de apenas um coeficiente de atrito estático, ou seja, antes e durante o movimento relativo entre as superfícies, o coeficiente foi mantido constante.

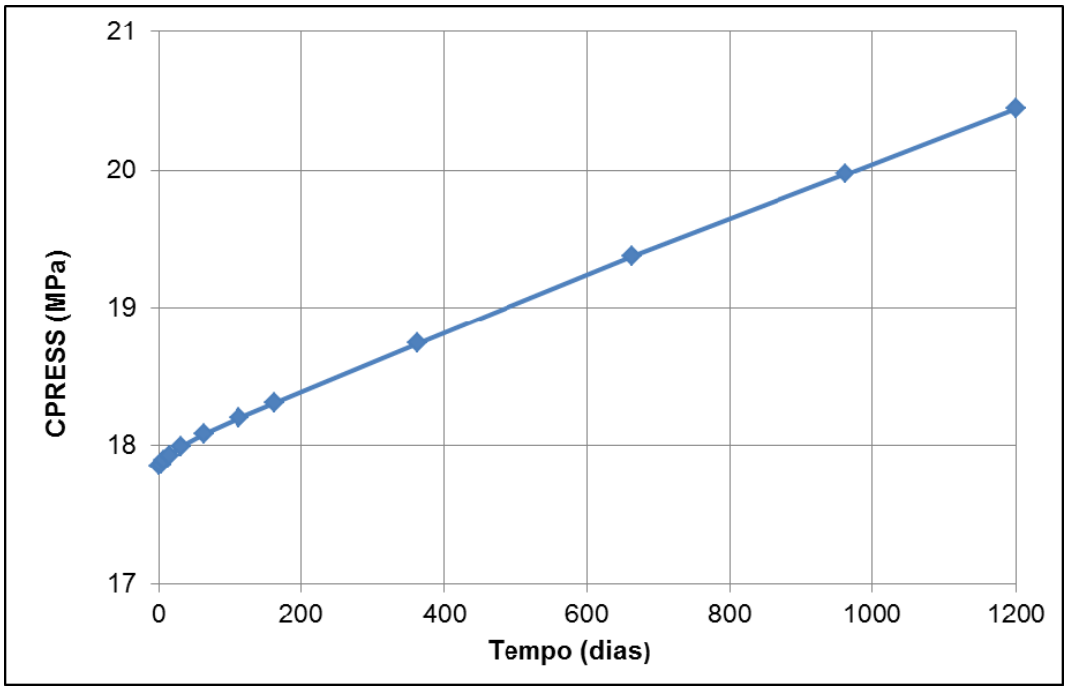

Figura 4.10 – Pressão de contato no plano de falha na região do reservatório para o modelo com plano de falha de 80°

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

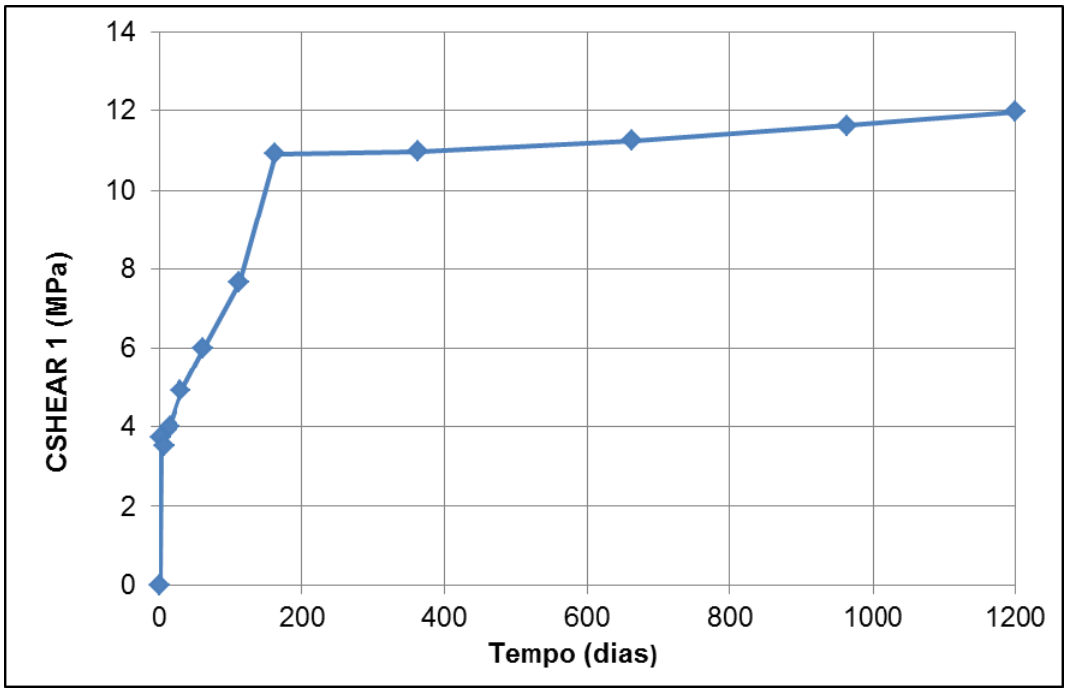

Figura 4.11 – Pressão de contato no plano de falha na região do reservatório para o modelo com plano de falha de 80°

As Figuras a seguir apresentam, de forma qualitativa, os vetores resultantes da tensão de cisalhamento (CSHEARF) na face da falha e da pressão normal de contato (CNORMF) após 1200 dias de injeção.

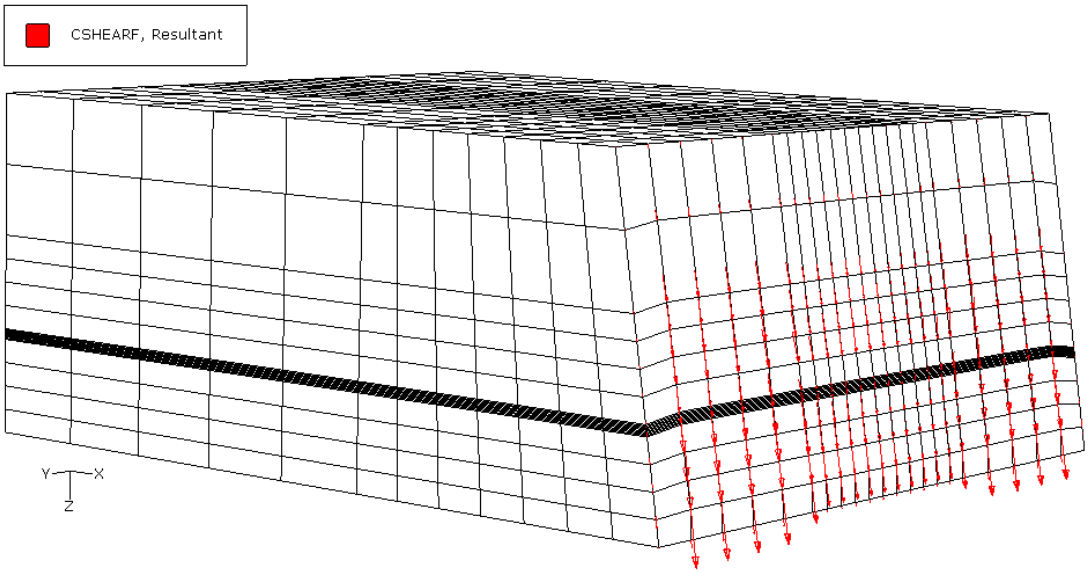

Figura 4.12 – Vetores resultantes da tensão cisalhante para o modelo com plano de falha de 80° com 1200 dias de injeção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

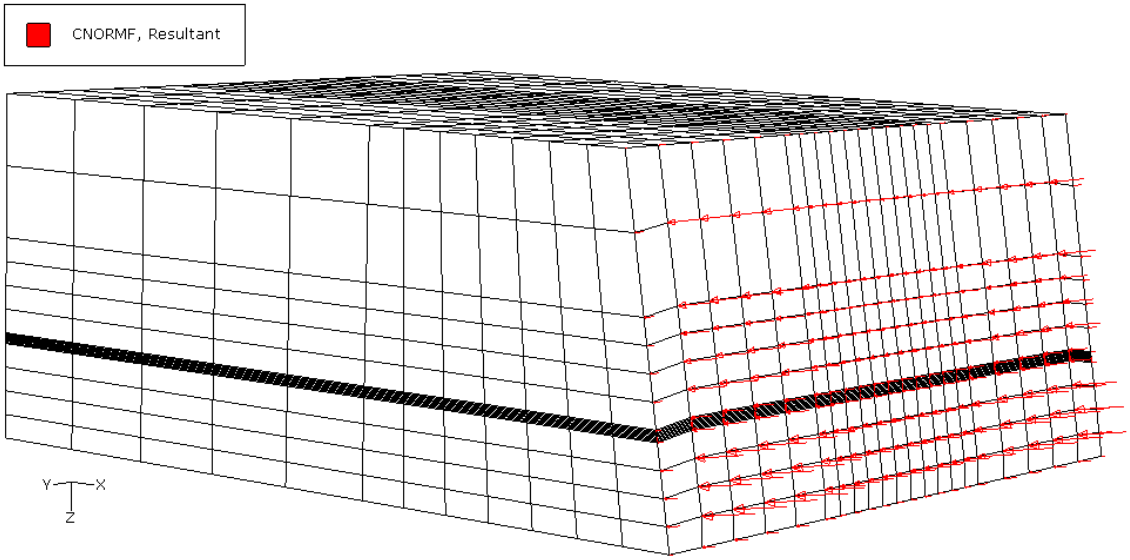

Figura 4.13 – Vetores resultantes da pressão normal de contato para o modelo com plano de falha de 80° com 1200 dias de injeção

Os vetores resultantes do campo de deslocamentos para o modelo completo estão apresentados na Figura 4.14.

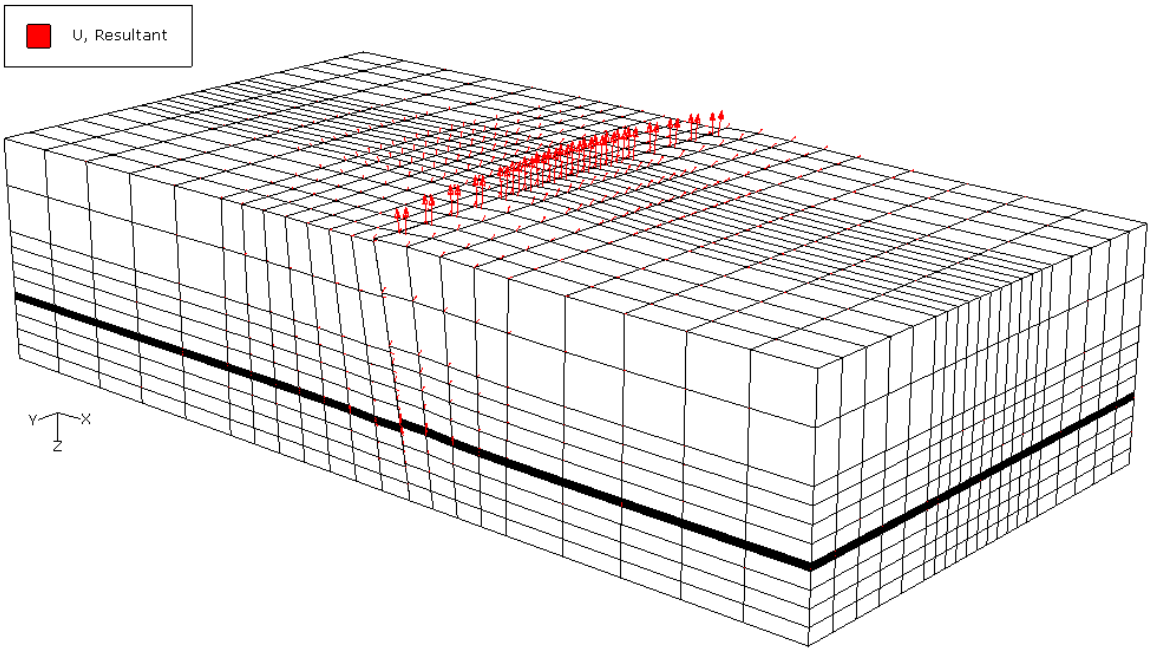

Figura 4.14 – Vetores resultantes do deslocamento para o modelo com plano de falha de 80° com 1200 dias de injeção

Pela análise das Figuras 4.12 e 4.13 pode ser observado o desenvolvimento de tensões cisalhantes e pressões normais no plano de falha devido ao aumento de pressão de poros. A Figura 4.14 ilustra o deslocamento tangencial das porções que compõe o modelo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

4.1.2.
Modelo com plano de falha inclinada a 60° em relação à horizontal

Os resultados que estão apresentados a seguir se referem às análises realizadas para o modelo que contém o plano de falha com inclinação de 60° em relação à horizontal. Assim como efetuado para o modelo com plano de falha com 80°, o tempo de injeção foi limitado a 1200 dias.

A Figura 4.15 apresentada a seguir ilustra a face da falha analisada em relação ao modelo completo. A área também foi amplificada e destacada de forma a facilitar a visualização dos pontos onde a reativação da falha foi iniciada.

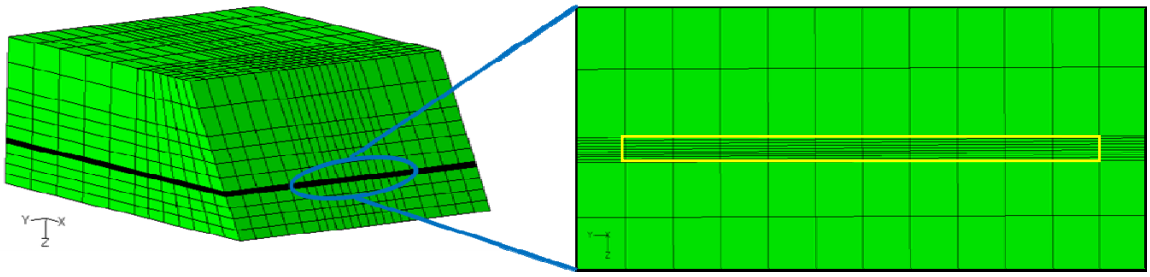

Figura 4.15 – Área amplificada da face da falha de 60° onde foi avaliada a reativação

Para ilustrar a evolução do processo de reativação ao longo do tempo de análise, elencou-se seis tempos, são eles: 1, 63, 363, 663, 963 e 1200 dias.

A sequência de Figuras a seguir ilustra a evolução do processo de reativação da falha de 60° devido ao processo de injeção de água. Conforme já ressaltado na apresentação dos resultados da falha de 80°, a legenda que acompanha cada figura define as situações *sticking* (vermelho), o qual se refere à superfície sem deslocamento, e *slipping* (verde) que se refere à ocorrência de deslocamento tangencial. Deve ser salientado que a verificação de tensões cisalhantes realizada pelo Abaqus para a definição das situações *sticking/slipping,* é feita através dos condicionais apresentados anteriormente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

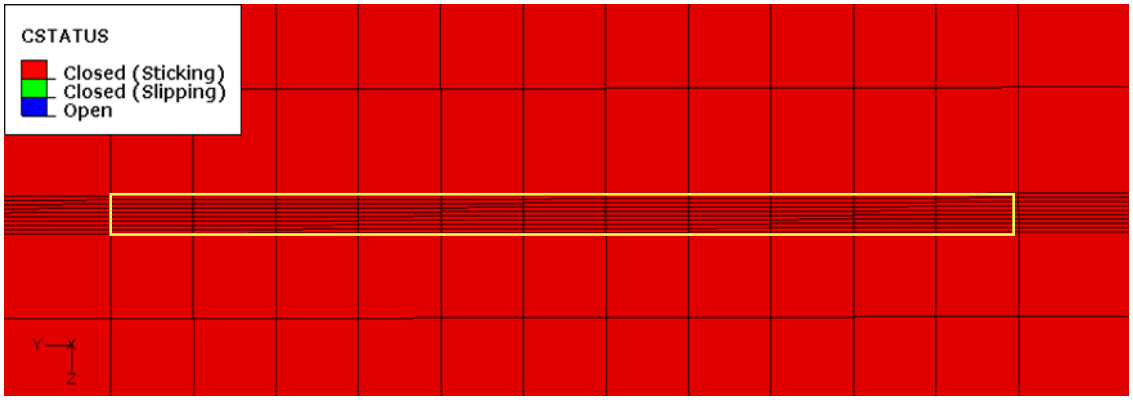

Figura 4.16 – Deslocamento tangencial da falha de 60° para t = 1 dia

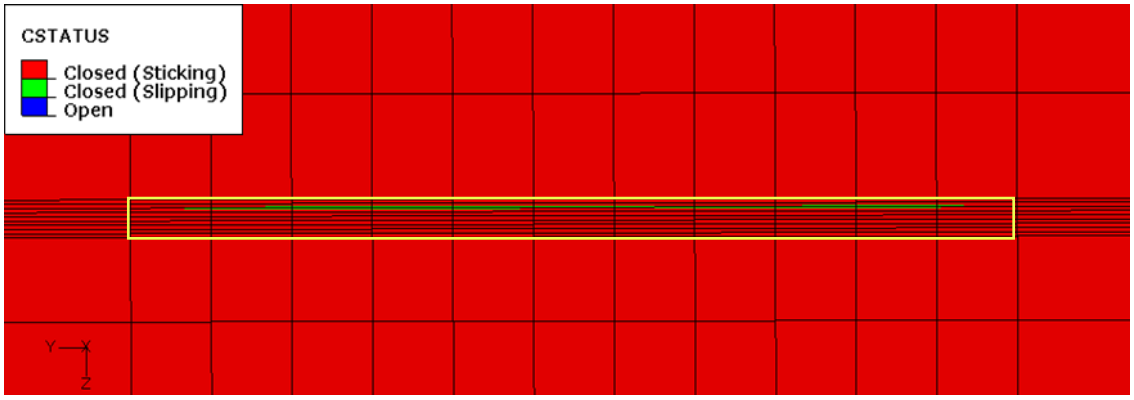

Figura 4.17 – Deslocamento tangencial da falha de 60° para t = 63 dias

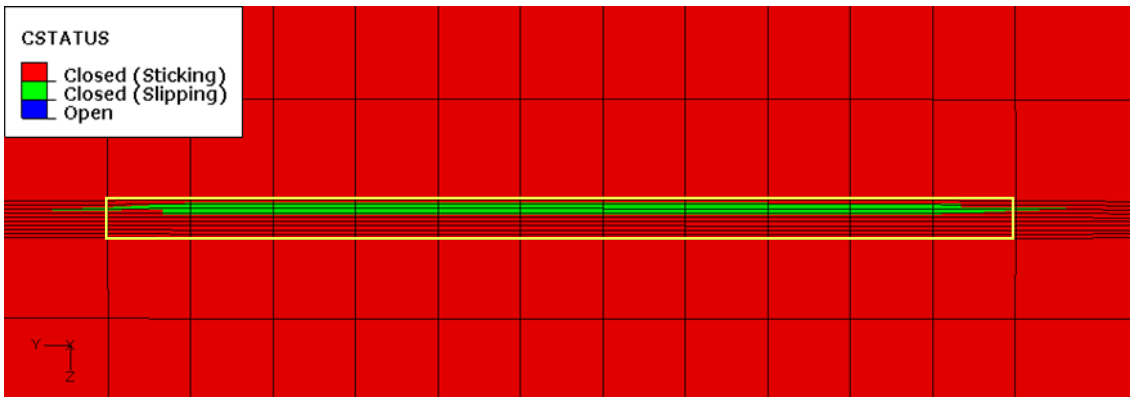

Figura 4.18 – Deslocamento tangencial da falha de 60° para t = 363 dias

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

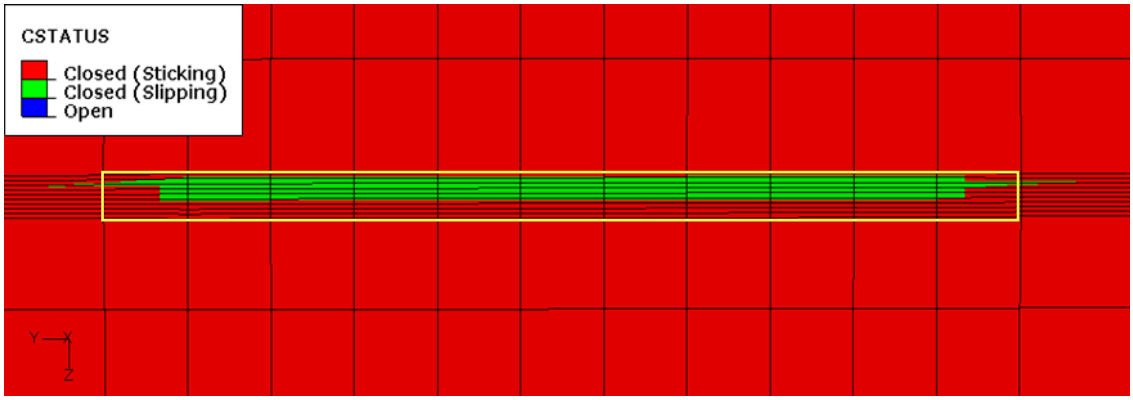

Figura 4.19 – Deslocamento tangencial da falha de 60° para t = 663 dias

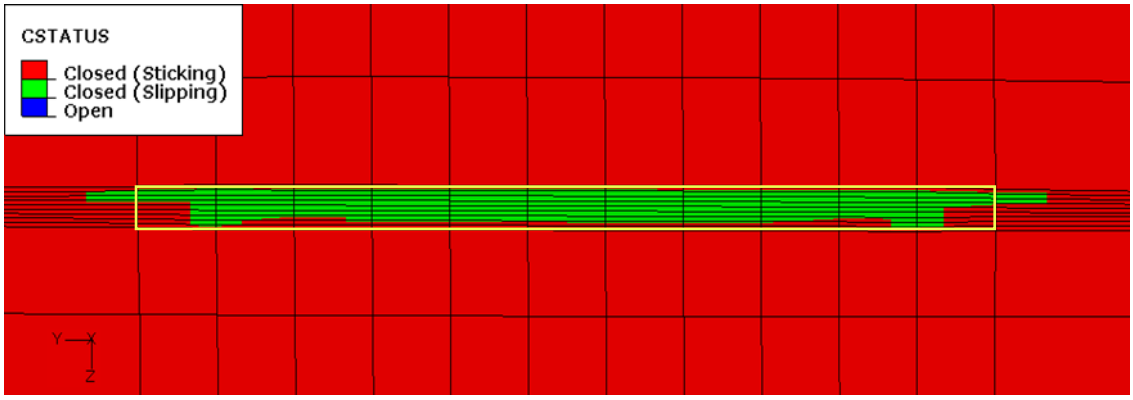

Figura 4.20 – Deslocamento tangencial da falha de 60° para t = 963 dias

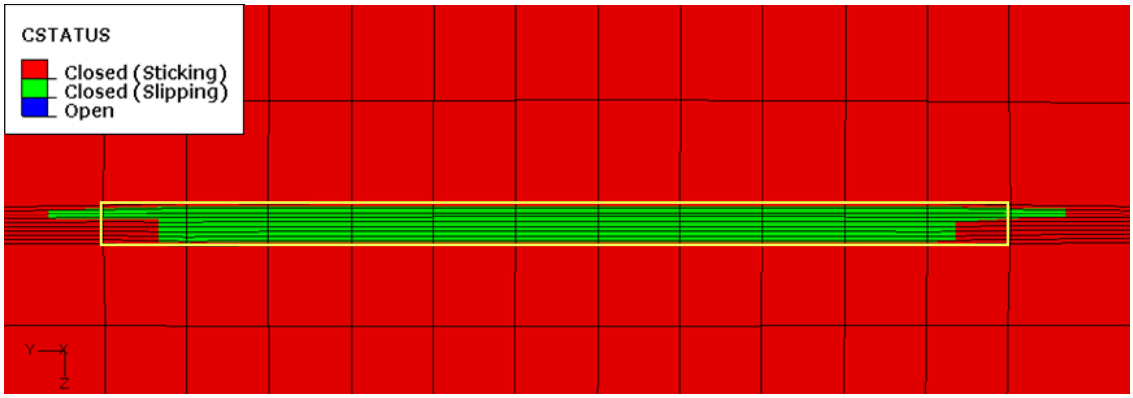

Figura 4.21 – Deslocamento tangencial da falha de 60° para t = 1200 dias

Pode ser observado pela análise das Figuras 4.16 – 4.21 que a falha inicia o processo de reativação de maneira localizada no reservatório após 63 dias de injeção de água. Aos 363 dias, o cisalhamento apresenta um acréscimo na área do reservatório. Para 663 dias de injeção, observa-se que a reativação se apresenta em uma extensão maior, abrangendo praticamente metade da área da seção transversal do reservatório. Para 963 dias, percebe-se uma evolução da

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

reativação praticamente todas as camadas do reservatório. Já para 1200 dias, observa-se que a reativação de maneira generaliza no reservatório. Em relação ao tempo de simulação, assim como observado para a falha de 80°, a simulação hidromecânica parcialmente acoplada deste modelo teve duração de aproximadamente 2.5 horas.

Portanto, para o caso apresentado, pode-se afirmar que a configuração de poços injetores bem como suas vazões de 1100 m³/dia resultou no início do processo de reativação de falha com 63 dias de injeção.

De forma a confirmar os resultados apresentados a respeito da localização da reativação de falha, apresentado nas Figuras 4.16 – 4.21, compilaram-se os resultados da tensão cisalhante equivalente (τ_{eq}) e da tensão cisalhante critica (τ_{crit}), de forma que quando a razão entre elas atinge a unidade, ocorre o início do processo de deslizamento, conforme pode ser observado na Figura 4.23. Os nós avaliados estão apresentados na Figura 4.22. Cabe ressaltar que os nós escolhidos também fazem parte do plano da falha.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

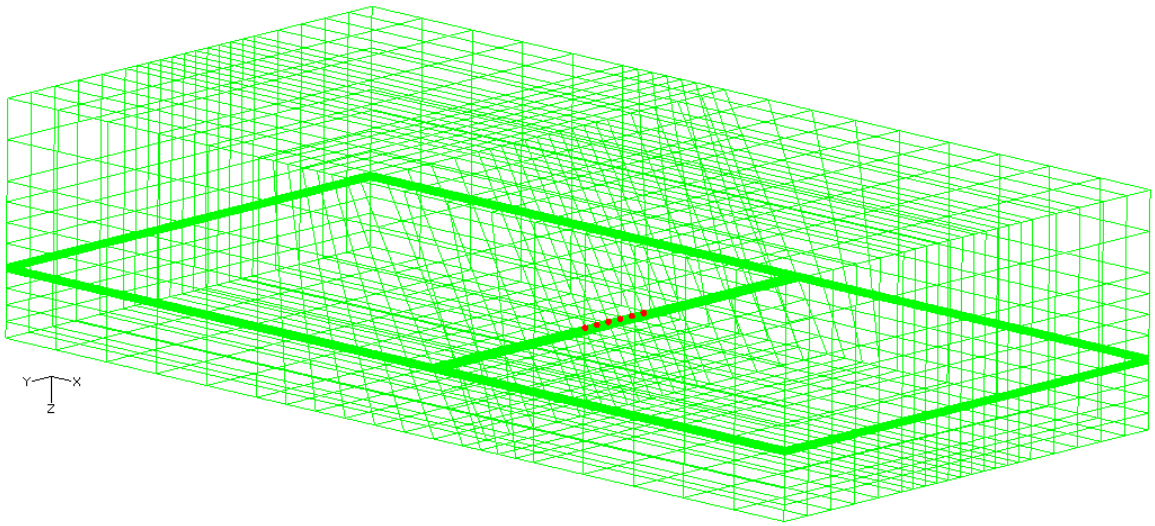

Figura 4.22 – Conjunto de nós onde foram avaliadas as tensões cisalhantes e normais no plano de falha de 60°

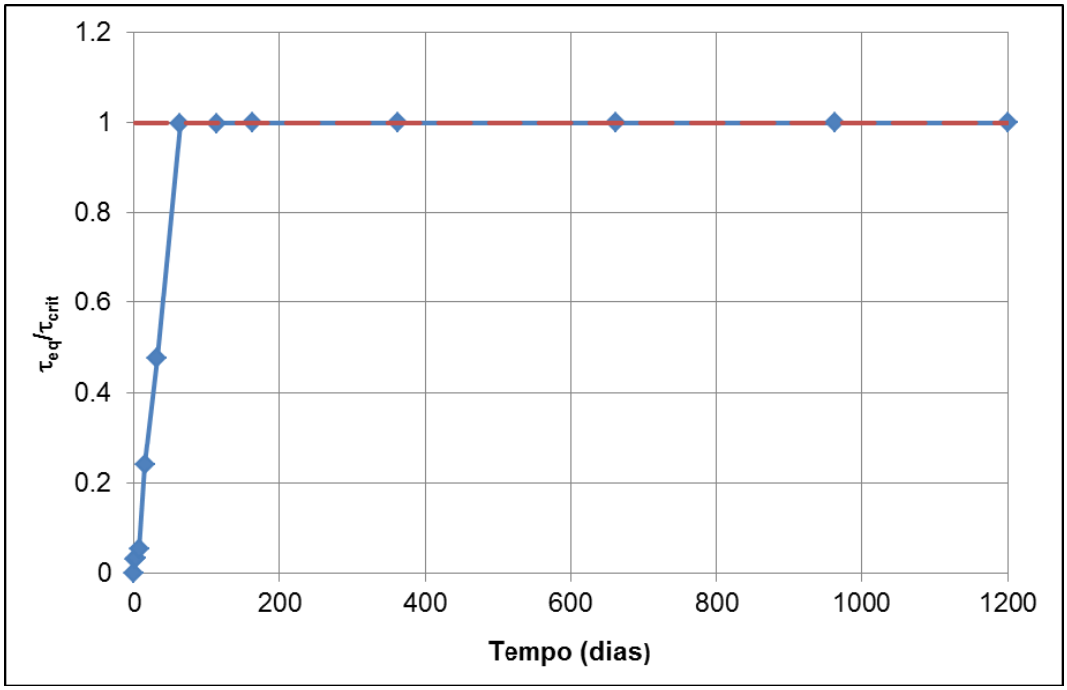

Figura 4.23 – Razão entre as tensões cisalhantes equivalente (τ_{eq}) e crítica (τ_{crit}) em função do tempo de análise para o plano de falha de 60°

Observa-se através da análise da Figura 4.23 que as relações entre as tensões cisalhantes equivalente e crítica corroboram os resultados gráficos fornecidos pelo CSTATUS, uma vez que o início do processo de reativação ocorreu após 63 dias de injeção de água no reservatório. Assim como observado na análise do plano de falha de 80°, notou-se pela análise dos resultados que a reativação da falha de 60° também ocorreu pela igualdade entre τ_{eq} e $\tau_{crit} = \mu p$.

Avaliou-se, também, o desenvolvimento de pressões de contato (CPRESS) e de tensões cisalhantes (CSHEAR 1) no plano de falha na porção do reservatório, conforme apresentado na Figura 4.24 e 4.25 respectivamente.

Assim como observador anteriormente, neste caso o aumento da pressão de poros também resultou em um aumento da pressão de contato com o tempo.

Em relação à tensão cisalhante no contato, observa-se que ela apresenta um valor máximo, em módulo, após 63 dias de injeção. Posteriormente, o valor apresenta pouca variação. O valor negativo da tensão cisalhante está relacionado com a direção do movimento relativo das porções que compõe o modelo, como pode ser observado na Figura 4.26.

Novamente, este comportamento pode ser explicado pela consideração de apenas um coeficiente de atrito estático, isto é, não foi considerado um coeficiente de atrito dinâmico durante o movimento relativo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

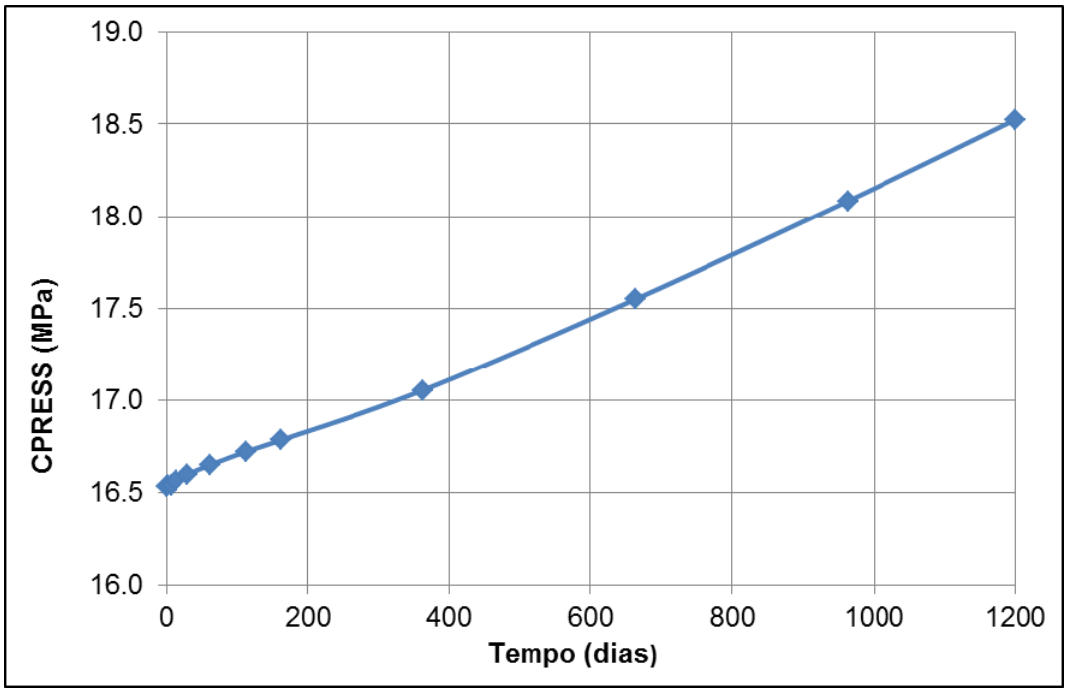

Figura 4.24 – Pressão de contato no plano de falha na região do reservatório para o modelo com plano de falha de 60°

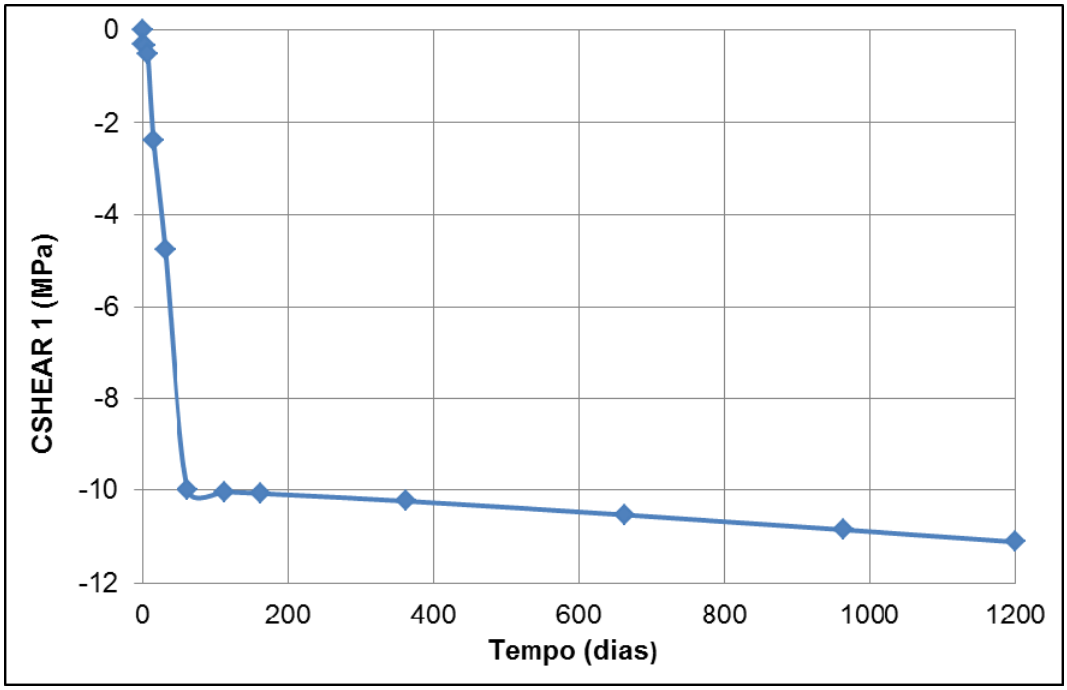

Figura 4.25 – Pressão de contato no plano de falha na região do reservatório para o modelo com plano de falha de 60°

As Figuras a seguir apresentam, de forma qualitativa, os vetores resultantes da tensão de cisalhamento (CSHEARF) na face da falha e da pressão normal de contato (CNORMF) após 1200 dias de injeção.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

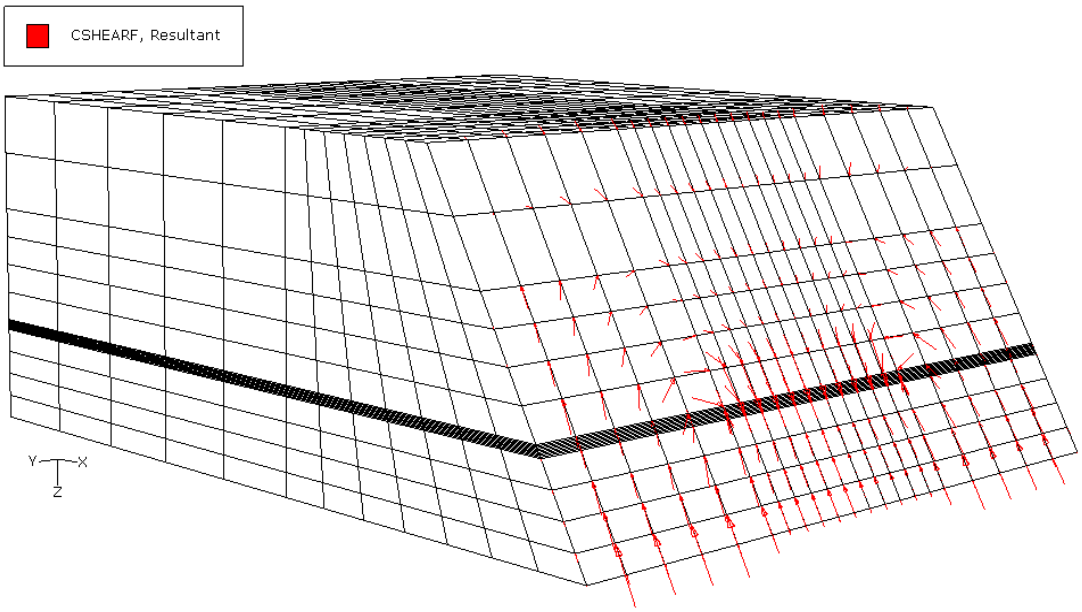

Figura 4.26 – Vetores resultantes da tensão cisalhante para o modelo com plano de falha de 60° com 1200 dias de injeção

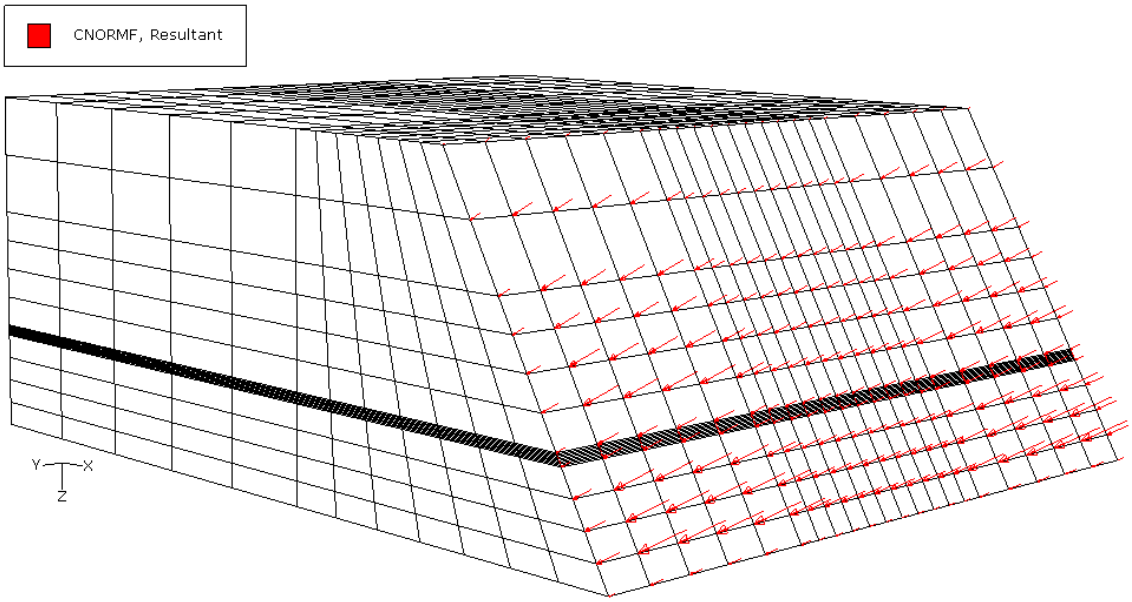

Figura 4.27 – Vetores resultantes pressão normal de contato para o modelo com plano de falha de 60° com 1200 dias de injeção

Os vetores resultantes do campo de deslocamentos para o modelo completo estão apresentados na Figura 4.28.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

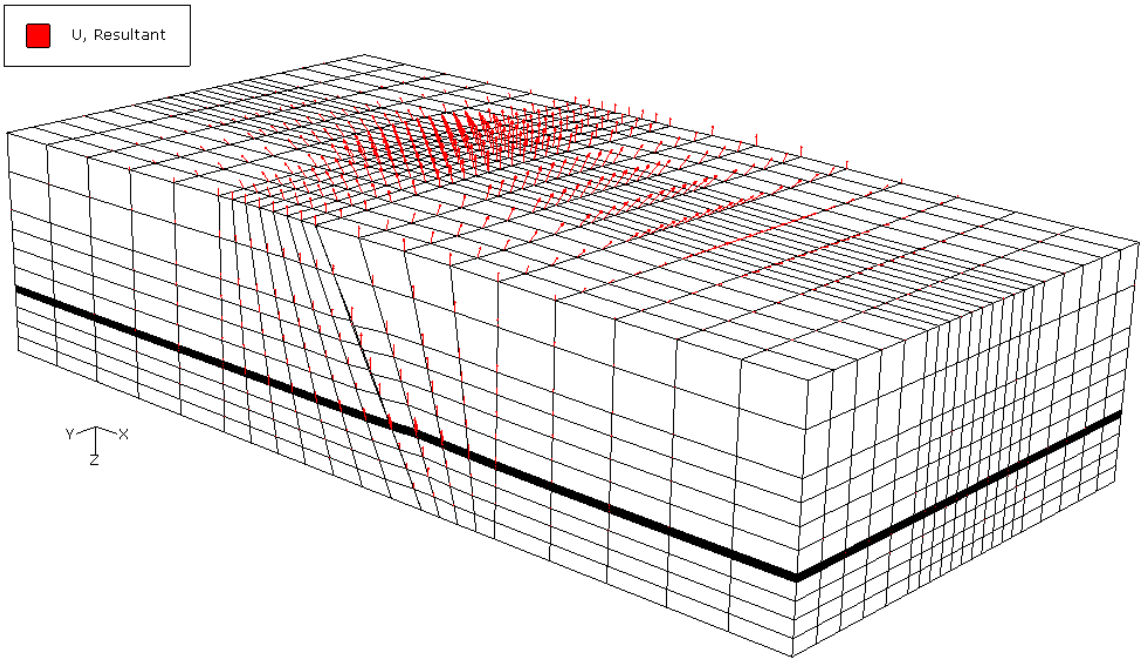

Figura 4.28 – Vetores resultantes pressão normal de contato para o modelo com plano de falha de 60° com 1200 dias de injeção

Pela análise das Figuras 4.26 e 4.27 pode ser observado o desenvolvimento de tensões cisalhantes e pressões normais no plano de falha devido ao aumento de pressão de poros. A Figura 4.28 ilustra o deslocamento tangencial das porções que compõe o modelo.

A diferença fundamental entre os dois modelos estudados é a inclinação da falha, os quais apresentaram resultados diferentes no que diz respeito ao início do processo de reativação além da sua propagação até o final da análise. Conforme esperado, o modelo com falha de 60° reativou antes do modelo com falha de 80°, a diferença de tempo foi de 50 dias. Isto pode ser atribuído ao fato de que, em uma superfície mais inclinada, podem ser desenvolvidas tensões de cisalhamento maiores quando comparada a uma superfície de menor inclinação submetida a um mesmo estado de tensões, fazendo com que o critério de deslizamento seja atingido para um tempo menor de análise.

Para ilustrar esta afirmação, fez-se uma análise simples de um caso bidimensional análogo, dado pela Figura 4.29:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

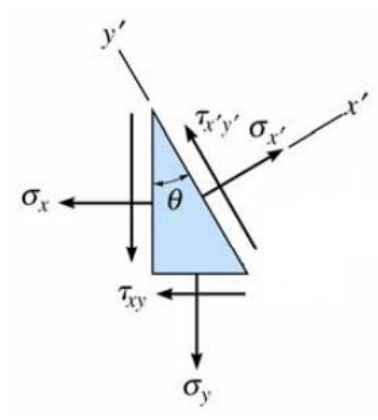

Figura 4.29 – Caso plano para transformação de tensões

Os desenvolvimentos das equações para cálculo das tensões no plano inclinado não serão apresentadas aqui, no entanto seu detalhamento pode ser encontrado em Chou & Pagano (1992). A equação para cálculo da tensão cisalhante no plano inclinado, análogo ao plano da falha, é mostrada a seguir:

$$\tau_{x_1y_1} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} sen2\theta + \tau_{xy} cos2\theta \qquad (4.1)$$

A partir do conhecimento das tensões (σ_x, σ_y e τ_{xy}) pode-se determinar τ_{x1y1} de interesse. Através do mapeamento das tensões para os dois modelos estudados, observou-se que τ_{xy} apresenta valor 4 ordens de grandeza menor do que σ_x e σ_y, logo, a primeira parcela da Equação 4.1 é a parcela que contribui efetivamente para a determinação da tensão cisalhante no plano da falha. Portanto, considerando um estado de tensões genérico, o valor de τ_{x1y1} é dependente do valor do sen2θ, isto é, da inclinação do plano inclinado ou do plano da falha. Considerando os ângulos dos planos de falha em relação à vertical (10° e 30°), pode-se perceber que *sen20* < *sen60*. Logo, τ_{x1y1} (θ = 30°) > τ_{x1y1} (θ = 10°), confirmando os resultados obtidos em termos de tempo de início do processo de reativação.

Embora as análises apresentem resultados interessantes principalmente pelo mecanismo físico simples, existe uma limitação no modelo de atrito usado, uma vez que o critério de deslizamento é função de uma pressão de contato e não da tensão normal efetiva no plano. Portanto, este modelo de atrito tem aplicabilidade restrita no caso de meios porosos preenchidos com fluidos sob pressão, como o caso estudado neste item.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

4.2.
Modelos numéricos considerando plasticidade

Os subitens a seguir se referem às análises numéricas realizadas utilizando a abordagem de plasticidade para estudar o processo de ruptura da zona de falha, cujos aspectos teóricos estão apresentados no final do Capítulo 3. Nestas simulações, o período de injeção foi de 4000 dias.

4.2.1.
Modelo com zona de falha inclinada a 80° em relação à horizontal

Os resultados que estão apresentados a seguir se referem às análises realizadas para o modelo numérico com plasticidade que contém a zona de falha com inclinação de 80° em relação à horizontal.

A Figura 4.30, 4.31 e 4.32 apresentam os resultados do equilíbrio de tensões do modelo seguindo os passos apresentados no Capítulo 3. A distribuição de tensões é de tal forma que na base do modelo, a tensão vertical apresenta valor igual a 5.24 MPa e as tensões horizontais apresentam valores iguais a 2.62 MPa.

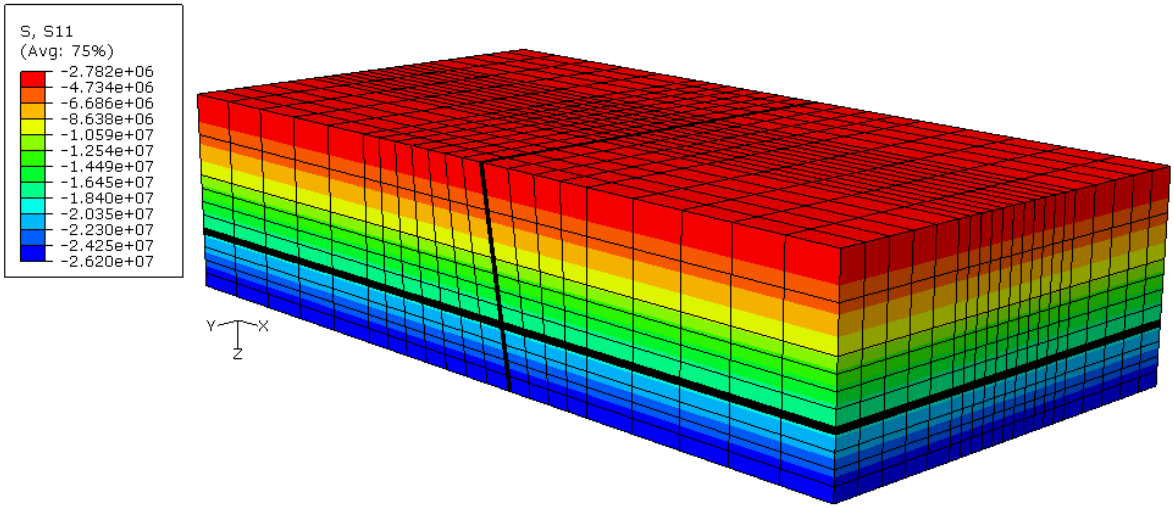

Figura 4.30 – Distribuição da tensão horizontal (S11) no modelo numérico com zona de falha de 80° na fase de equilíbrio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

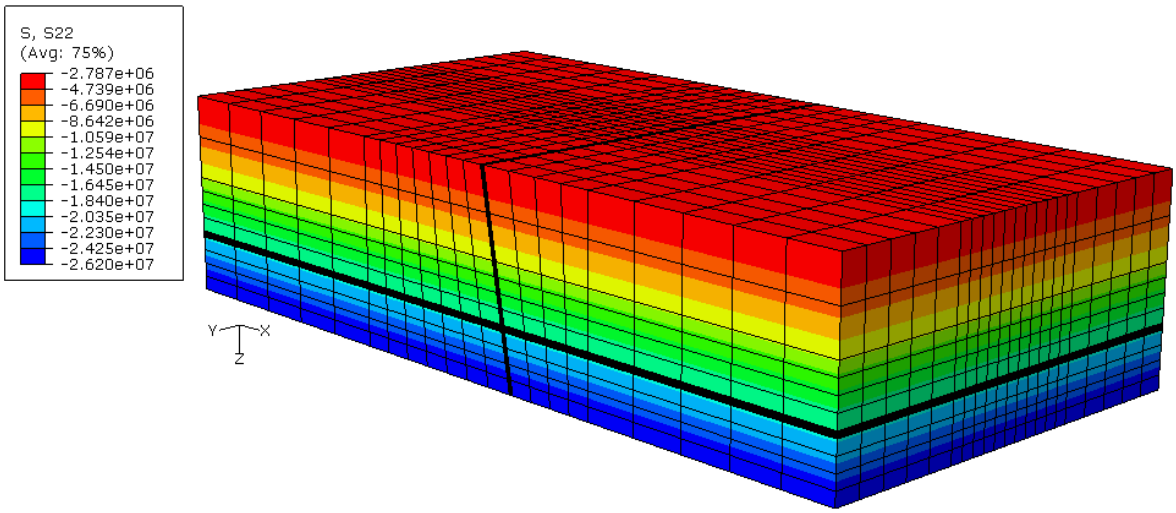

Figura 4.31 – Distribuição da tensão horizontal (S22) no modelo numérico com zona de falha de 80° na fase de equilíbrio

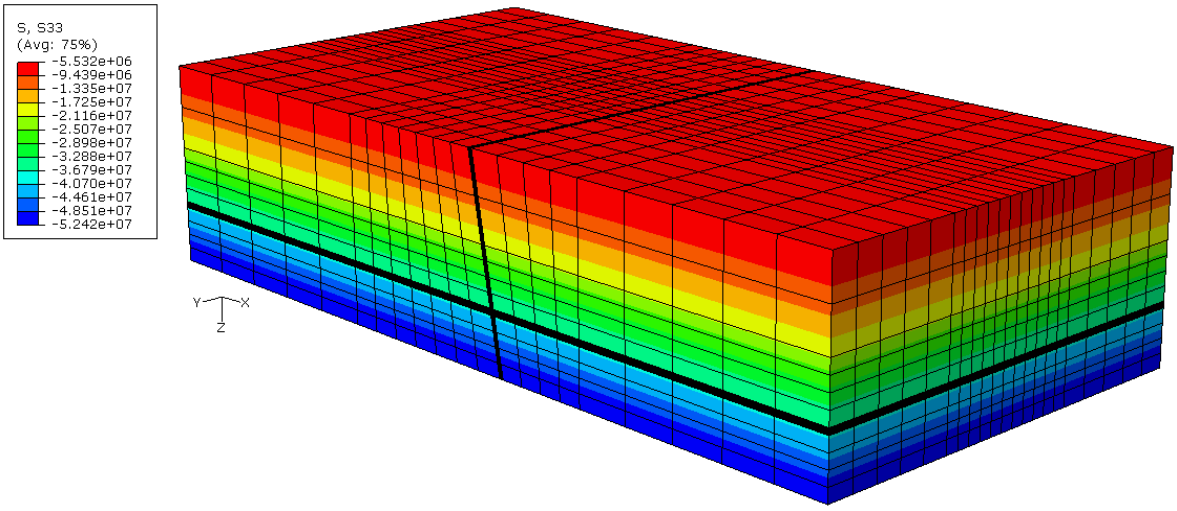

Figura 4.32 – Distribuição da tensão vertical (S33) no modelo numérico com zona de falha de 80° na fase de equilíbrio

A Figura 4.33, apresentada a seguir, ilustra a face da falha analisada em relação ao à porção direita do modelo completo. A área também foi amplificada e destacada de forma a facilitar a visualização da região onde o processo de plastificação foi iniciado como será apresentado a seguir. O retângulo amarelo apresenta a vista frontal do reservatório bem como a região de abrangência da plastificação, conforme pode ser observado nas Figuras subsequentes. O retângulo destacado em laranja indica o elemento/célula onde foram aferidos os dados necessários (tensões, deformações e pressão de poros) para realização

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

das análises apresentadas a seguir. Para a análise da região onde se desenvolveu a plastificação, elencaram-se os seguintes tempos de injeção: 1, 1963 e 4000 dias, conforme apresentado nas Figuras 4.34, 4.35 e 4.36. Salienta-se que o critério de plastificação de Mohr-Coulomb foi atingido após 1963 dias de injeção.

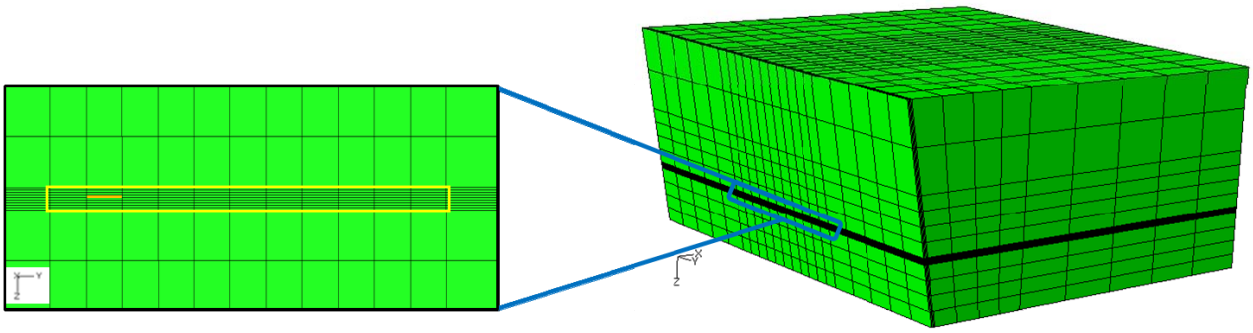

Figura 4.33 – Área amplificada da face da zona de falha de 80° onde foi avaliada a reativação

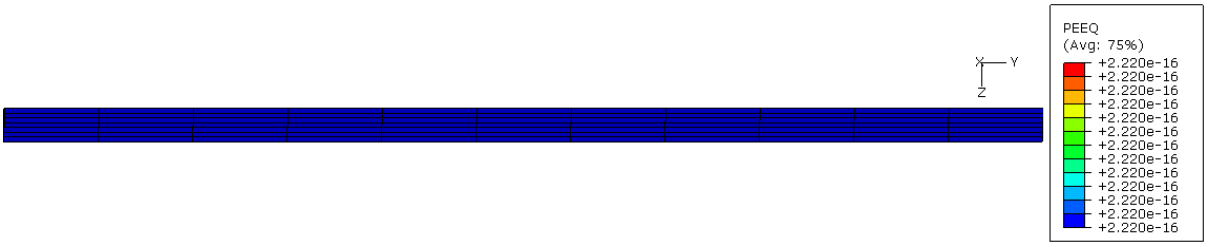

Figura 4.34 – Deformação plástica (PEEQ) praticamente nula para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade após 1 dia de injeção

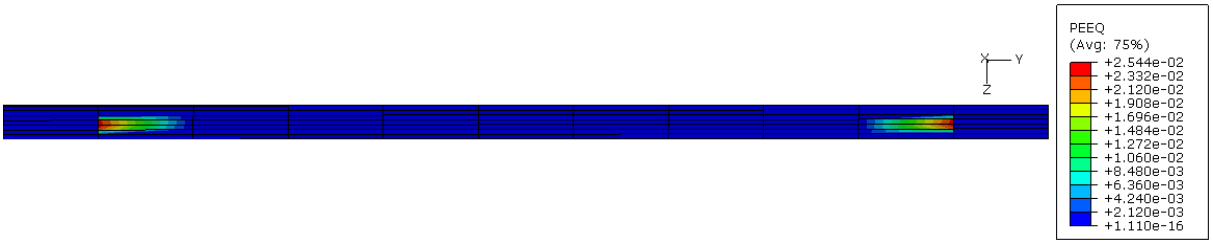

Figura 4.35 – Deformação plástica (PEEQ) para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade após 1963 dias de injeção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

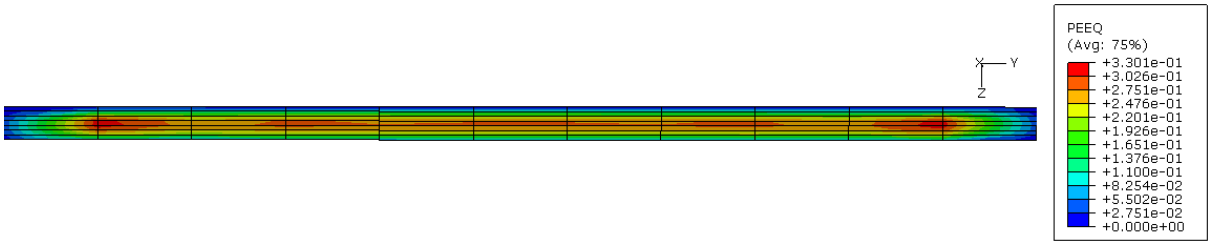

Figura 4.36 – Deformação plástica (PEEQ) para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade após 4000 dias de injeção

Pode ser observado que o início da plastificação ocorreu de maneira localizada nas extremidades da zona de falha e se propagou por toda a extensão da zona de falha com o processo de injeção, apresentando ainda maior intensidade nas suas extremidades. No final da análise, pode ser observada que toda a zona de falha apresenta plastificação, salientando assim, a ruptura generalizada do material que a compõe. Além disso, ao se comparar a evolução da plastificação com o tempo, fica evidente a propagação horizontal e vertical do processo de ruptura.

De forma a ilustrar os vetores resultantes de deslocamentos devido ao processo de injeção, confeccionou-se a Figura 4.37. Pode ser observado que o processo contínuo de injeção, sem a utilização de poços produtores, resultou em uma expansão do reservatório e das rochas adjacentes implicando em um campo de deslocamentos subverticais.

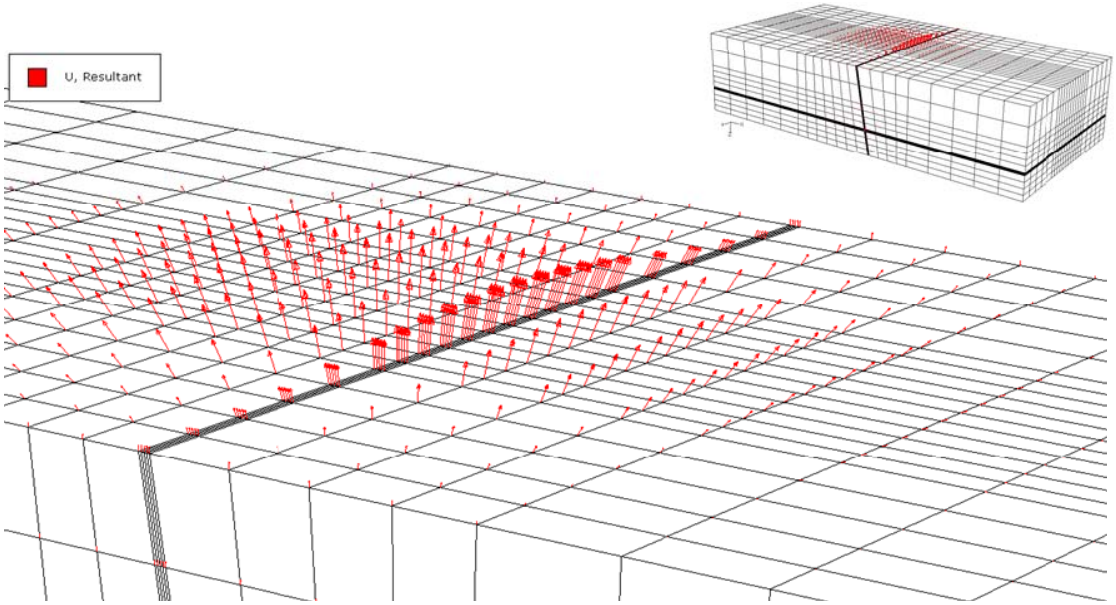

Figura 4.37 – Vetores resultantes dos deslocamentos para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade após 4000 dias de injeção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

Uma vez que o critério de ruptura utilizado é função dos invariantes de tensão apresentados no final do Capítulo 3, faz-se necessária a apresentação da variação das tensões principais bem como dos invariantes de tensão com o tempo. Além disso, aferiu-se também a evolução da pressão de poros na região onde foi observada a plastificação da zona de falha e os deslocamentos verticais no topo do reservatório e no topo do *overburden*. Primeiramente serão apresentadas as variações das tensões principais maior, intermediária e menor em função do tempo de análise, além da variação da pressão de poros. Salienta-se que o acréscimo de pressão de poros foi obtido a partir do software de simulação de fluxo (Eclipse) na célula correspondente ao elemento onde foi observado o início da plastificação.

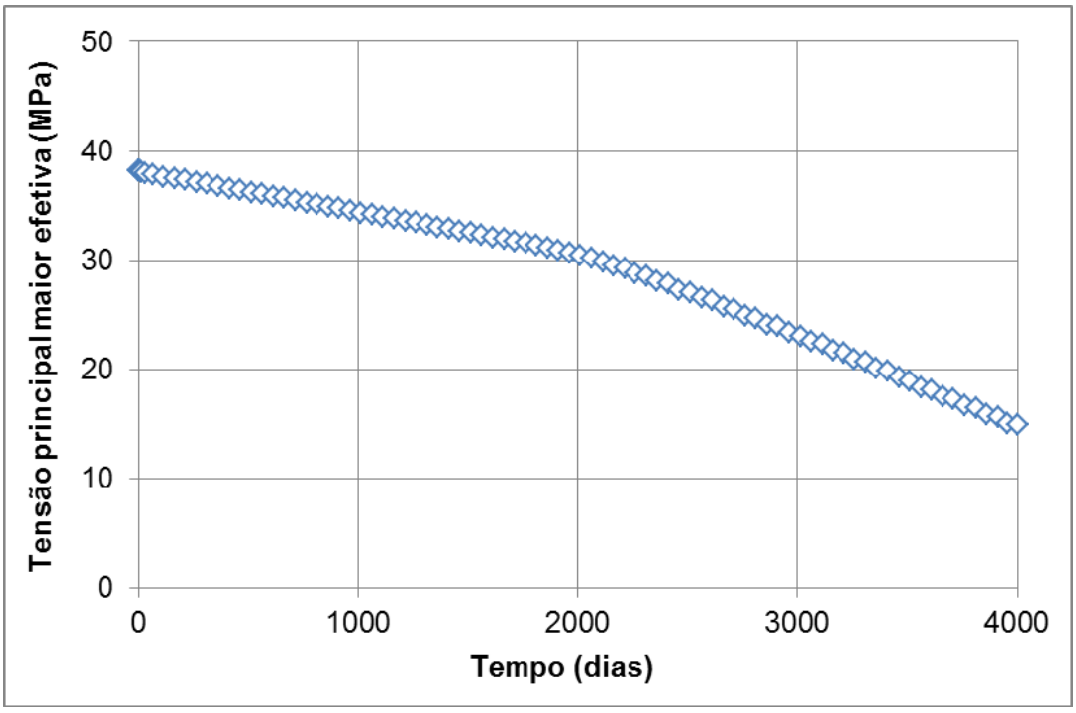

Figura 4.38 – Variação da tensão principal maior efetiva em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

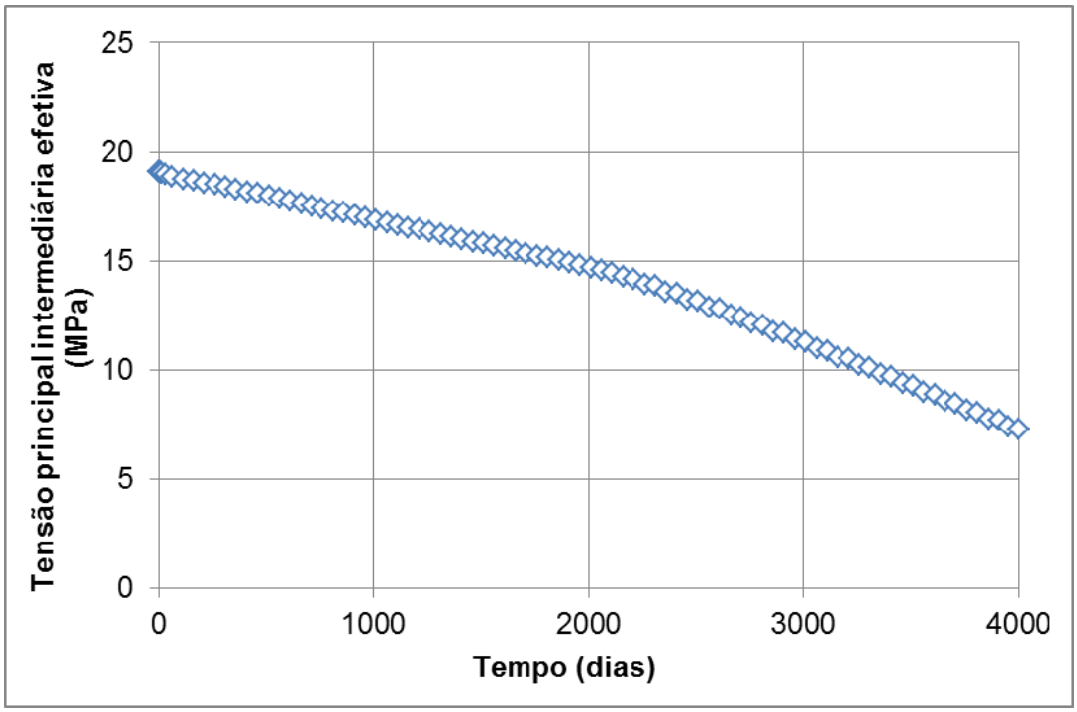

Figura 4.39 – Variação da tensão principal intermediária efetiva em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade

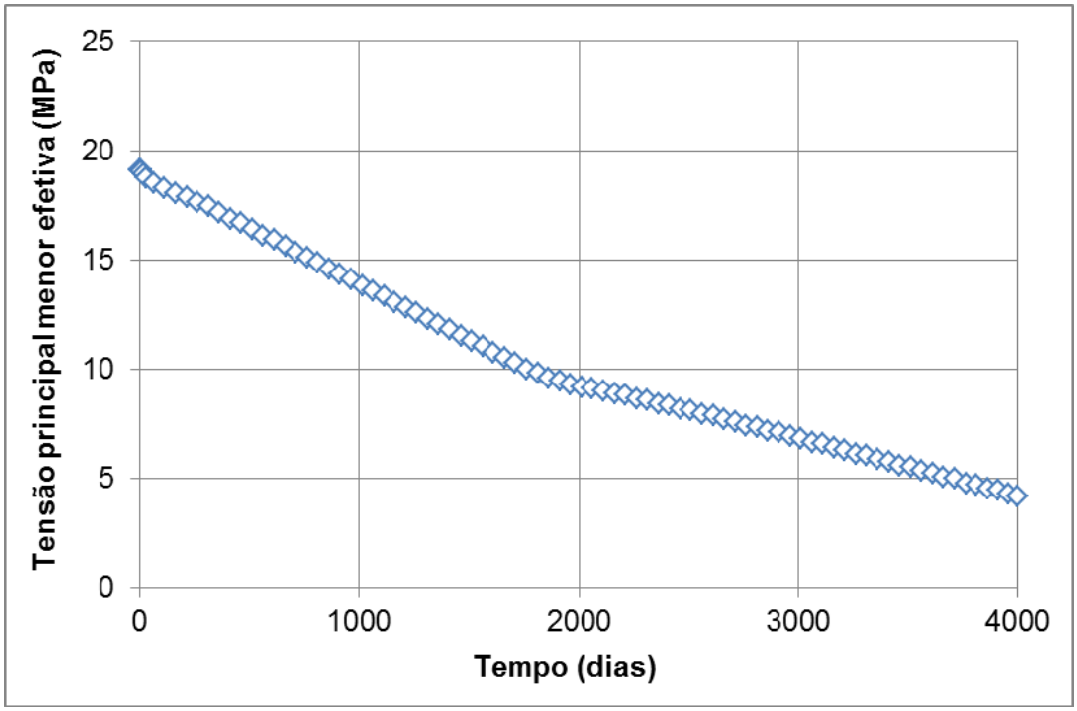

Figura 4.40 – Variação da tensão principal menor efetiva em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade

Pode ser observado pela análise das Figuras 4.38, 4.39 e 4.40 que o aumento da pressão de poros, devido à injeção, resultou em uma diminuição das

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

tensões principais nas três direções conforme esperado. Pode ser observada, também, uma queda mais acentuada da tensão principal maior em relação às outras duas tensões principais. Isto pode estar relacionado com o coeficiente de Poisson, uma vez que ele define a razão entre a deformação lateral e a deformação axial, em virtude das tensões serem calculadas a partir das deformações. O aumento de pressão de poros gerado pelos três poços injetores está apresentado na Figura 4.41.

As Figuras 4.42, 4.43 e 4.44 apresentam o comportamento dos três invariantes de tensão envolvidos no cálculo da função da plastificação de Mohr-Coulomb em relação ao tempo de análise. Os três invariantes podem ser calculados através das Equações 3.51 – 3.53.

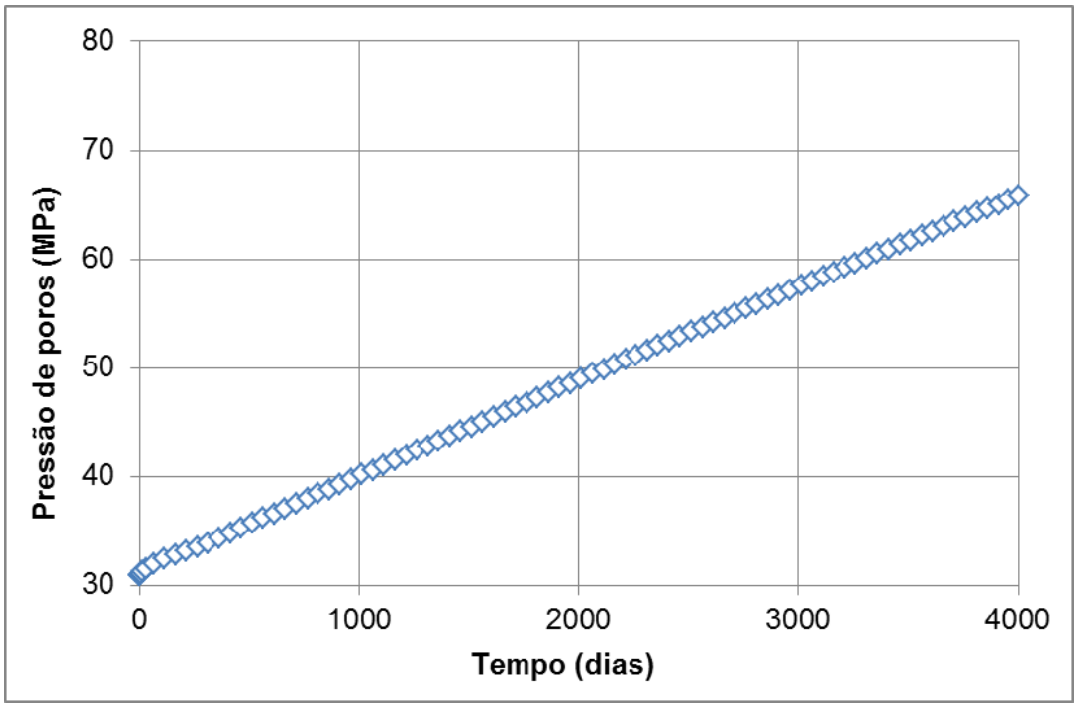

Figura 4.41 – Variação da pressão de poros em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

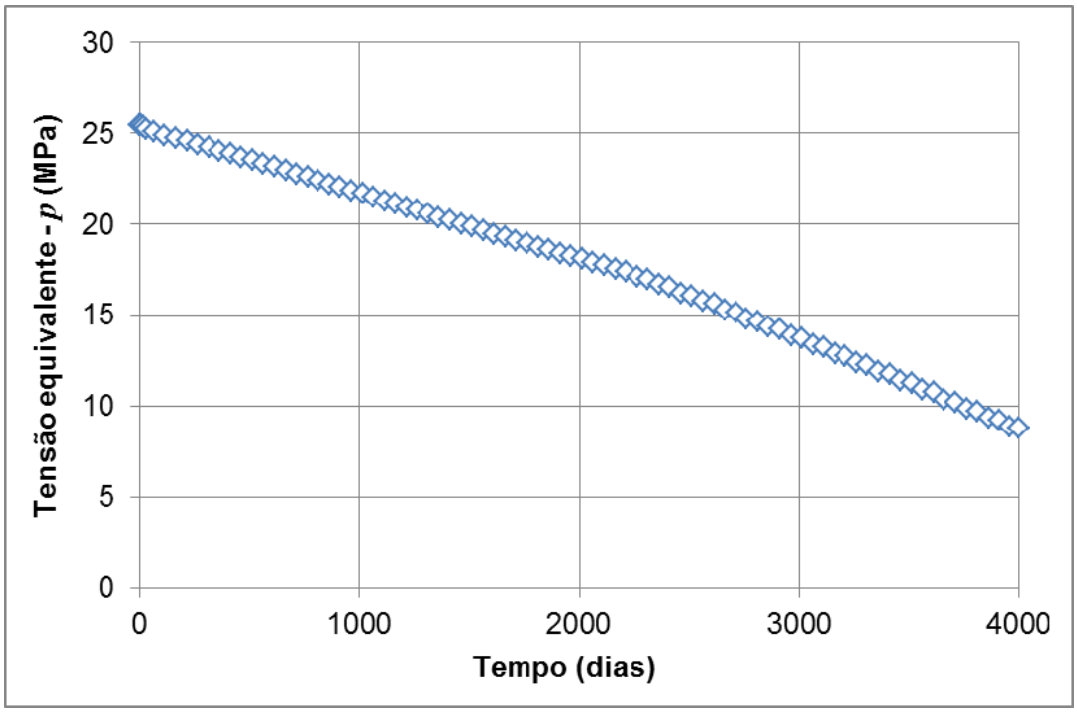

Figura 4.42 – Variação do primeiro invariante de tensões (p) em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade

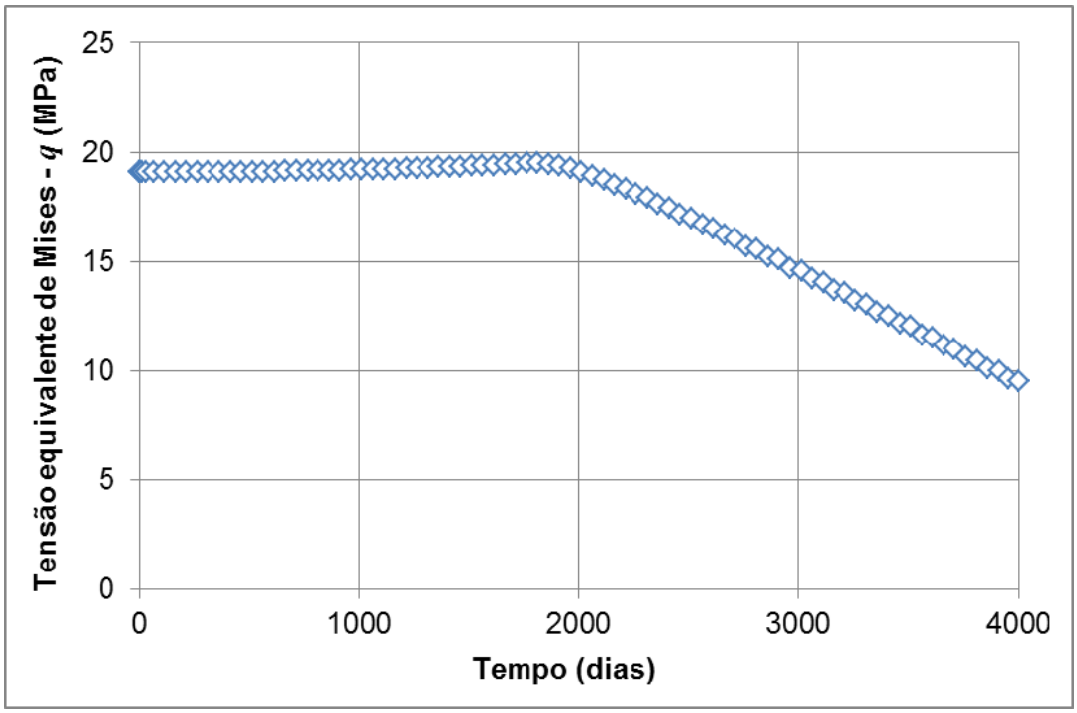

Figura 4.43 – Variação do segundo invariante de tensões (q) em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

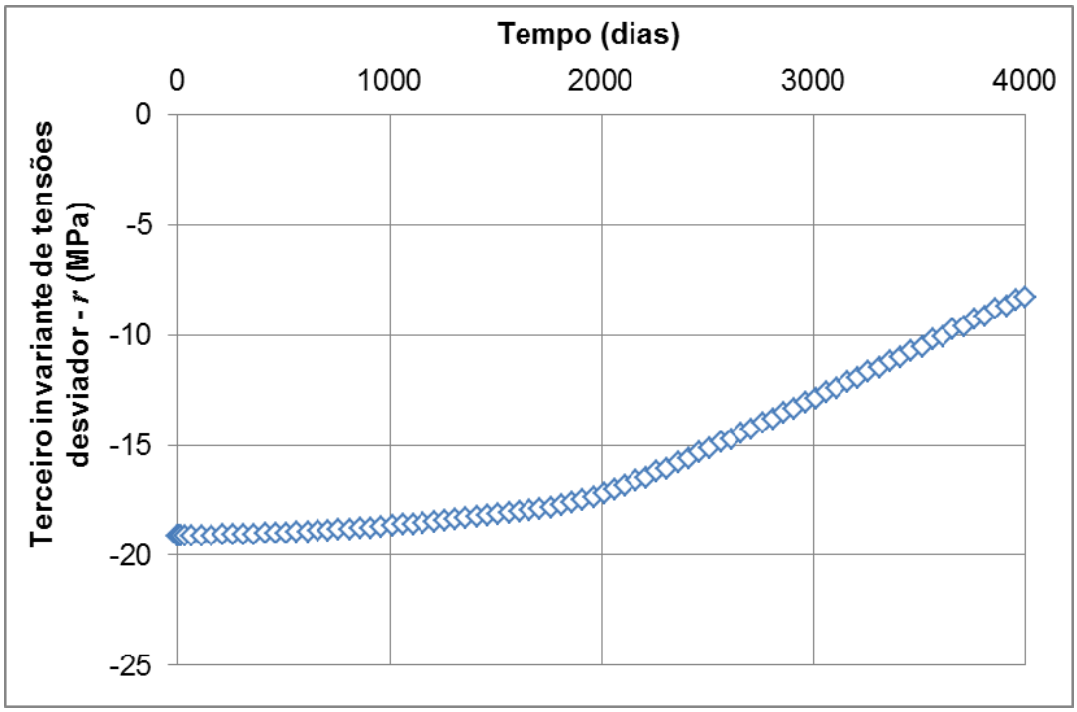

Figura 4.44 – Variação do terceiro invariante de tensões (*r*) em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade

Pode ser observado que os três invariantes apresentam comportamentos distintos, onde o primeiro invariante apresenta comportamento decrescente através do tempo, de acordo com os resultados da variação temporal das tensões principais. O segundo invariante apresenta-se constante até o momento onde foi observado início da plastificação (1963 dias) e posteriormente apresenta queda até o final da análise. Já a magnitude do terceiro invariante apresenta um decréscimo ao longo do tempo de análise, sendo este mais acentuado após o início do processo de plastificação.

De posse dos três invariantes de tensão, pode-se efetuar o cálculo da função de plastificação de Mohr-Coulomb e observar sua variação com o processo de injeção até que seu valor seja praticamente igual à zero indicando a ruptura do material da zona de falha, conforme apresentado na Figura 4.45.

Outra forma de verificar se o critério de plastificação foi atendido corretamente é traçando a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb e a trajetória de tensões no plano meridional, conforme mostrado na Figura 4.46. Cabe lembrar que quando a função de plastificação (Equação 3.54) tende a atingir um valor igual à zero, a trajetória de tensões toca a envoltória de ruptura.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

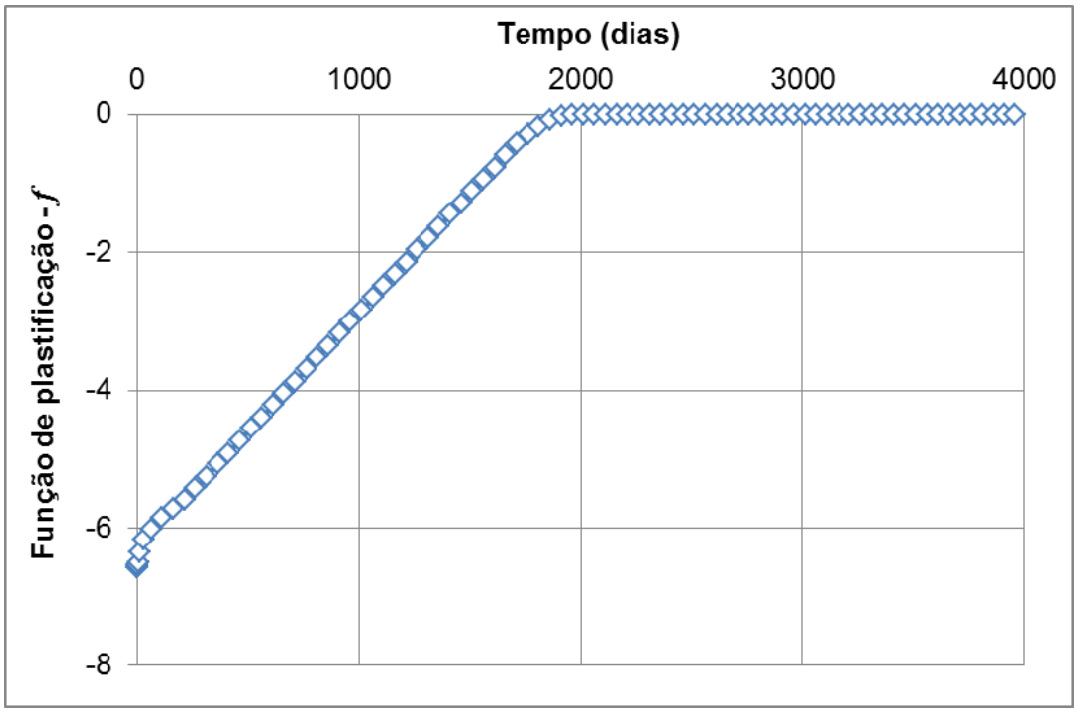

Figura 4.45 – Variação da função de plastificação em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade

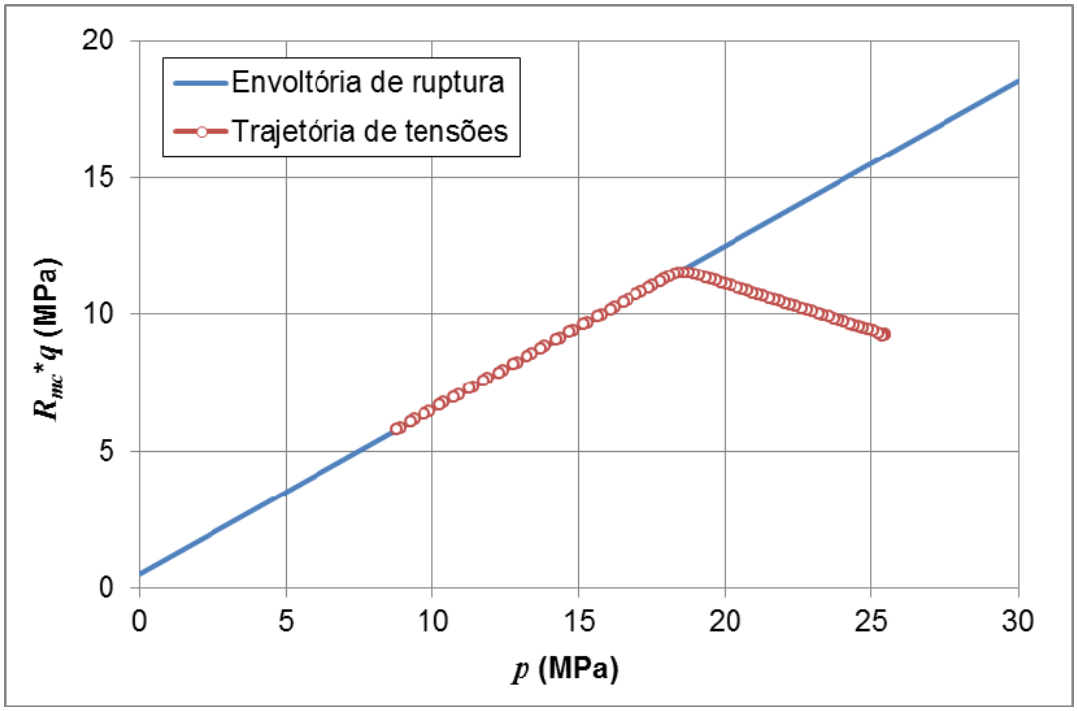

Figura 4.46 – Trajetória de tensões em função da envoltória de ruptura para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade

Pela Figura 4.45, pode ser observado que a partir de 1963 dias a função de plastificação apresenta um valor praticamente nulo, indicando assim a ruptura

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

do material que compõe a zona de falha. Este fato corrobora a Figura 4.46, uma vez que a trajetória de tensões toca a envoltória de ruptura após 1963 dias de injeção.

Outra variável de interesse se refere à compactação do reservatório e a subsidência do leito marinho. Como este estudo foi idealizado considerando apenas poços injetores, as variáveis analisadas serão a expansão na direção vertical do reservatório e o deslocamento vertical do leito marinho, conforme apresentado nas Figuras 4.47 e 4.48, respectivamente.

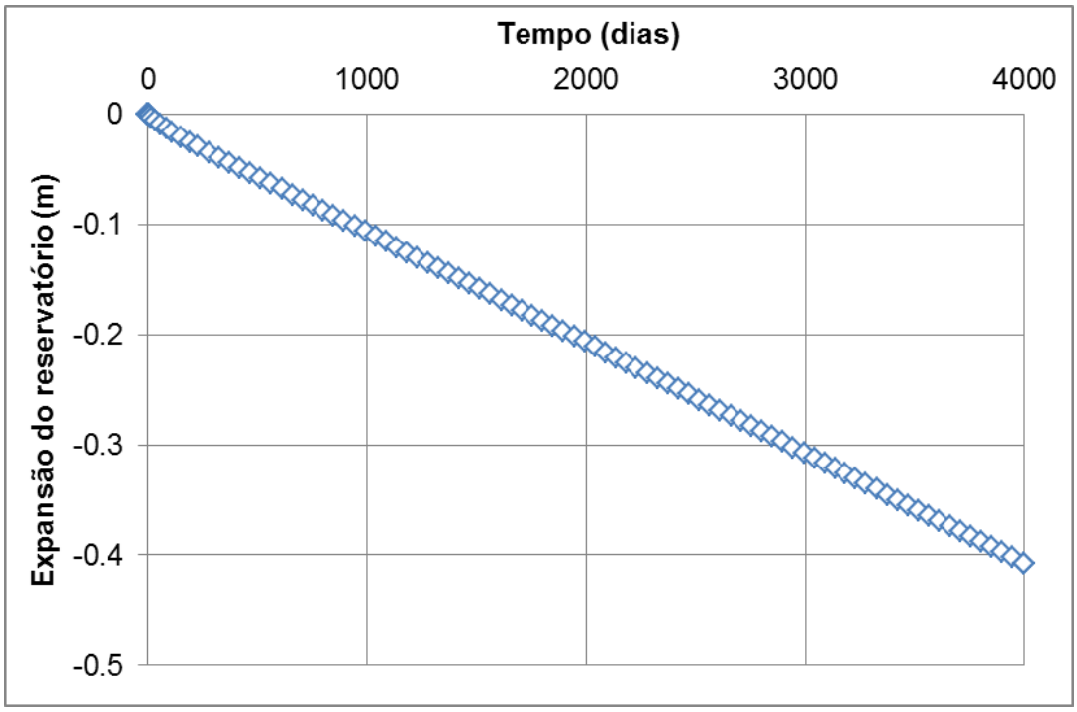

Figura 4.47 – Expansão vertical do reservatório em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

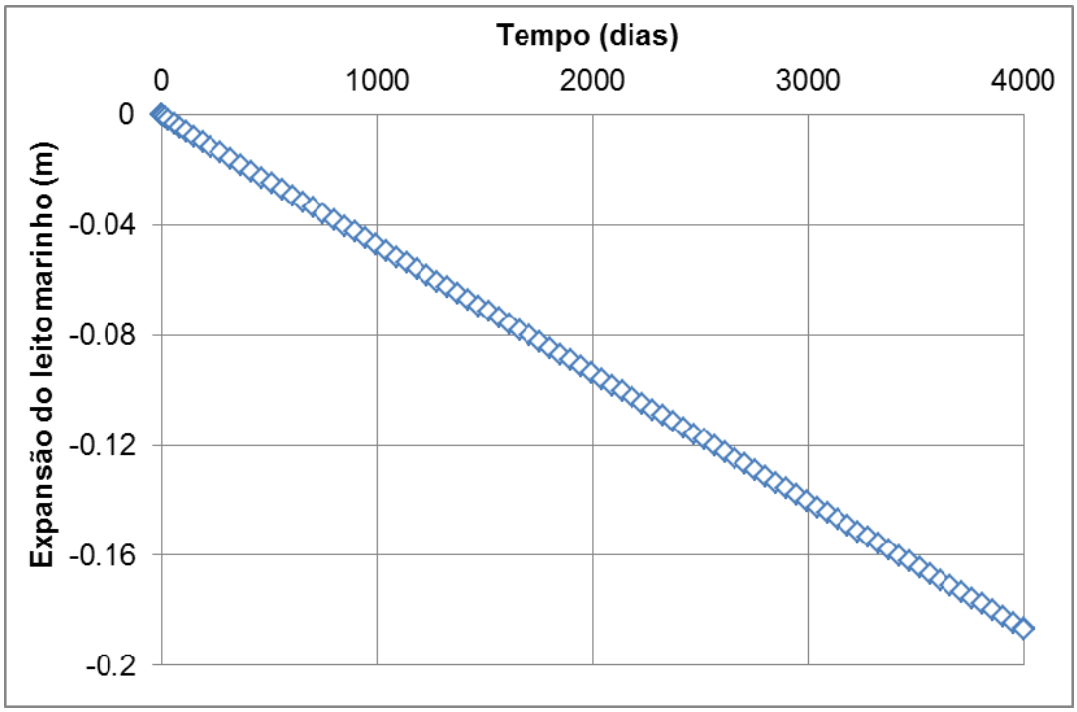

Figura 4.48 – Deslocamento vertical do leito marinho em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80° com plasticidade

Ao final do período de injeção, observou-se que o reservatório apresentou um deslocamento vertical de aproximadamente 40 centímetros e o leito marinho um valor de aproximadamente 20 centímetros.

Além das análises apresentadas anteriormente, buscou-se avaliar também, a propagação vertical e horizontal da plastificação, apresentada nas Figuras 4.34, 4.35 e 4.36. Para tal, foram escolhidas duas trajetórias, uma vertical e outra horizontal. A trajetória horizontal é composta pelos elementos apresentados na Figura 4.49.

518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528
496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Figura 4.49 – Elementos que compõe a trajetória horizontal estudada, destacada em azul escuro, para o modelo de zona de falha de 80°

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

Deve ser ressaltado que estes elementos compõem a zona de falha na porção referente ao reservatório, conforme apresentado na Figura 4.33. Além disso, o elemento 68 (destacado em laranja nas Figuras 4.33 e 4.49) se refere ao elemento onde foram aferidos os dados para a confecção das análises apresentadas anteriormente.

De forma a avaliar a propagação lateral da plastificação devido ao processo de injeção, elencou-se apenas os elementos 67, 68 e 69. Os demais não foram plotados pela simetria dos resultados e para facilitar a distinção das curvas. A seguir estão apresentados os resultados por meio da trajetória de tensões e da função de plastificação. As trajetórias de tensões foram plotadas com uma mudança na escala de forma a facilitar a visualização dos elementos que atingem o critério de plastificação (Figura 4.51).

As funções de plastificação, para os elementos analisados, foram analisadas no momento onde ocorreu o início da plastificação da zona de falha (1963 dias – elemento 68) e para o período final de injeção (4000 dias).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

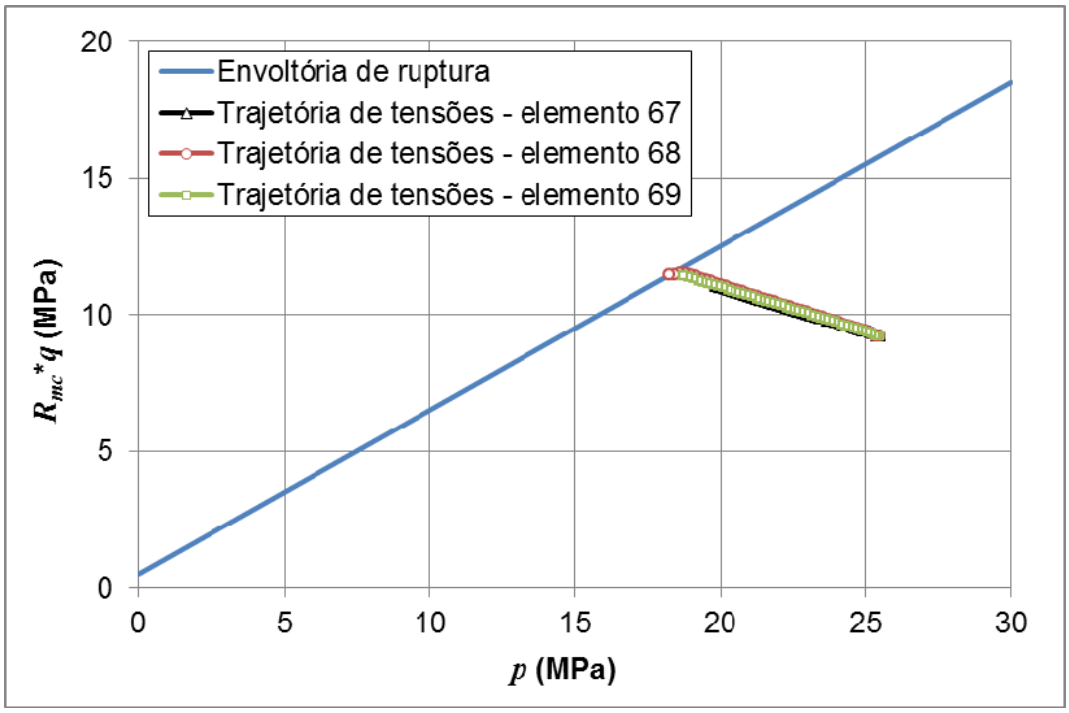

Figura 4.50 – Trajetórias de tensões para estudo da propagação horizontal da plastificação para o modelo de zona de falha de 80°

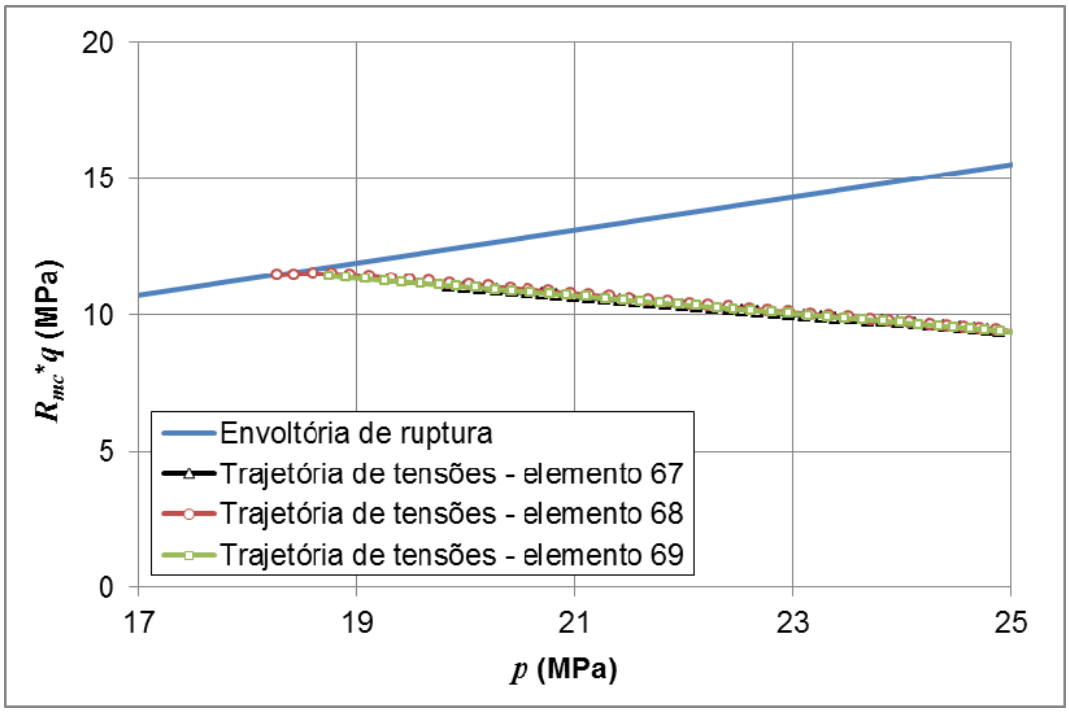

Figura 4.51 – Detalhe das trajetórias de tensões para estudo da propagação horizontal da plastificação para o modelo de zona de falha de 80°

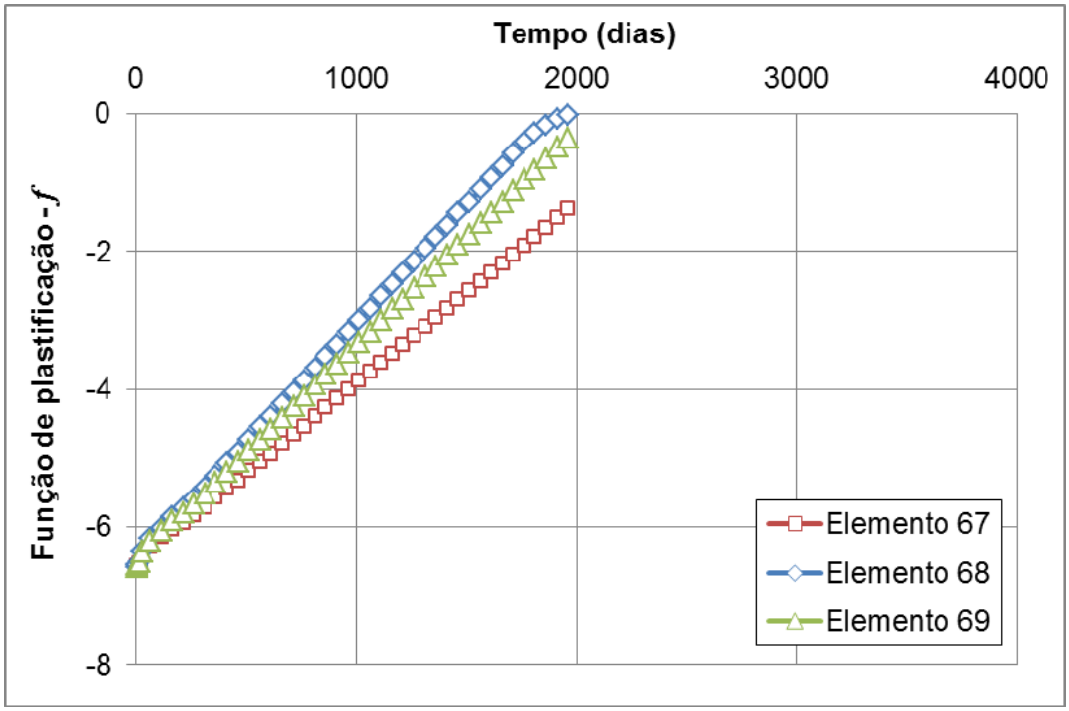

Figura 4.52 – Função de plastificação para estudo da propagação horizontal da plastificação para o modelo de zona de falha de 80° após 1963 dias de injeção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

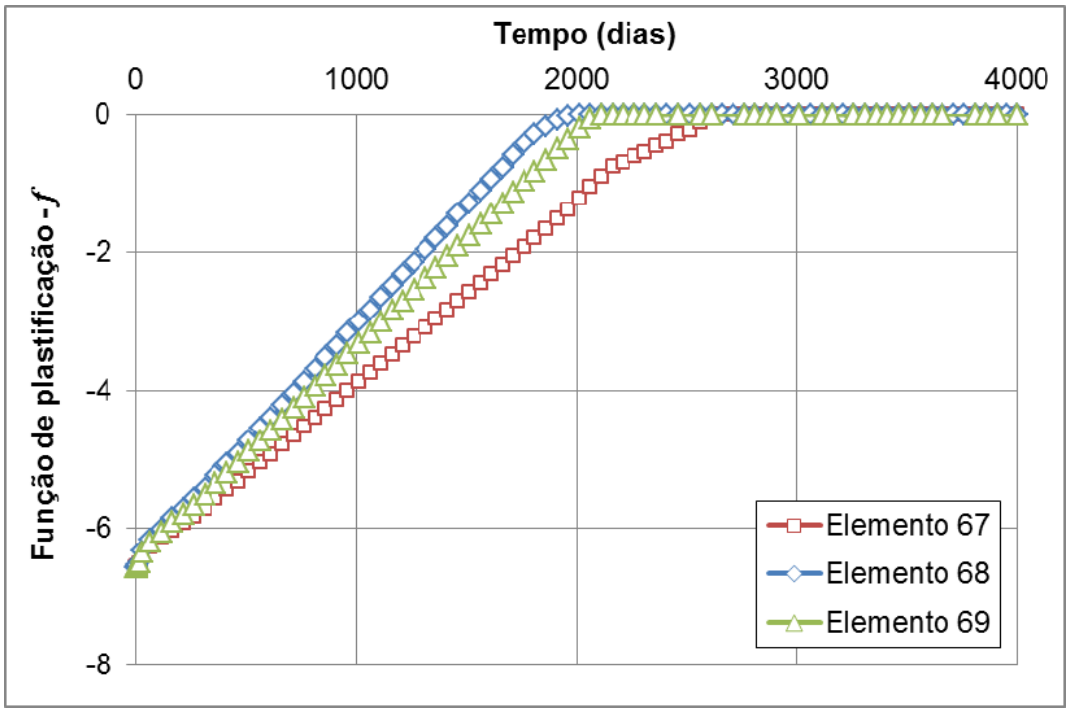

Figura 4.53 – Função de plastificação para estudo da propagação horizontal da plastificação para o modelo de zona de falha de 80° após 4000 dias de injeção

Como pode ser observado pela análise das Figuras 4.50 – 4.53, o início do plastificação apresenta-se de forma localizada no elemento 68 após 1963 dias de injeção de água, conforme apresentado na Figura 4.35. Após 4000 dias de injeção (período analisado), os elementos 68 e 69 também apresentam plastificação. Pela Figura 4.36 pode ser percebida a concordância dos resultados de propagação horizontal, uma vez que os elementos 68 e 69 apresentam-se plastificados. Além destes, todos os demais elementos que compõe a zona de falha apresentam-se plastificados.

A seguir serão apresentados os resultados relativos à propagação vertical da plastificação, confrontando os resultados apresentados nas Figuras 4.34, 4.35 e 4.36. A trajetória vertical é composta pelos elementos apresentados na Figura 4.54.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528
496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Figura 4.54 – Elementos que compõe a trajetória vertical estudada, destacada em azul escuro, para o modelo de zona de falha de 80°

Ressalta-se, novamente, que estes elementos compõem a zona de falha na porção referente ao reservatório, conforme apresentado na Figura 4.33.

De forma a avaliar a propagação vertical da plastificação devido ao processo de injeção, elencou-se apenas os elementos 46, 68 e 90. Assim como realizado anteriormente, os demais elementos não foram plotados de forma a facilitar a visualização das curvas. A seguir estão apresentados os resultados por meio da trajetória de tensões e da função de plastificação, da mesma forma como realizado para a trajetória horizontal. As trajetórias de tensão foram plotadas com uma mudança na escala de forma a facilitar a visualização dos elementos que atingem o critério de plastificação (Figura 4.56).

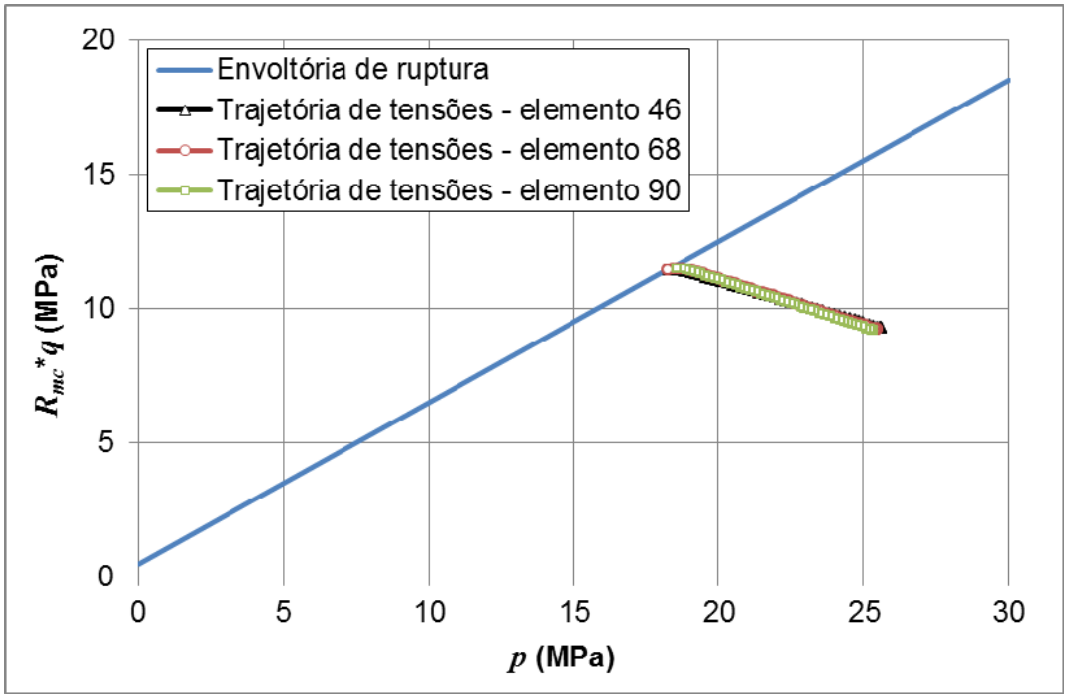

Figura 4.55 – Trajetórias de tensões para estudo da propagação vertical da plastificação para o modelo de zona de falha de 80° após 1963 dias de injeção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

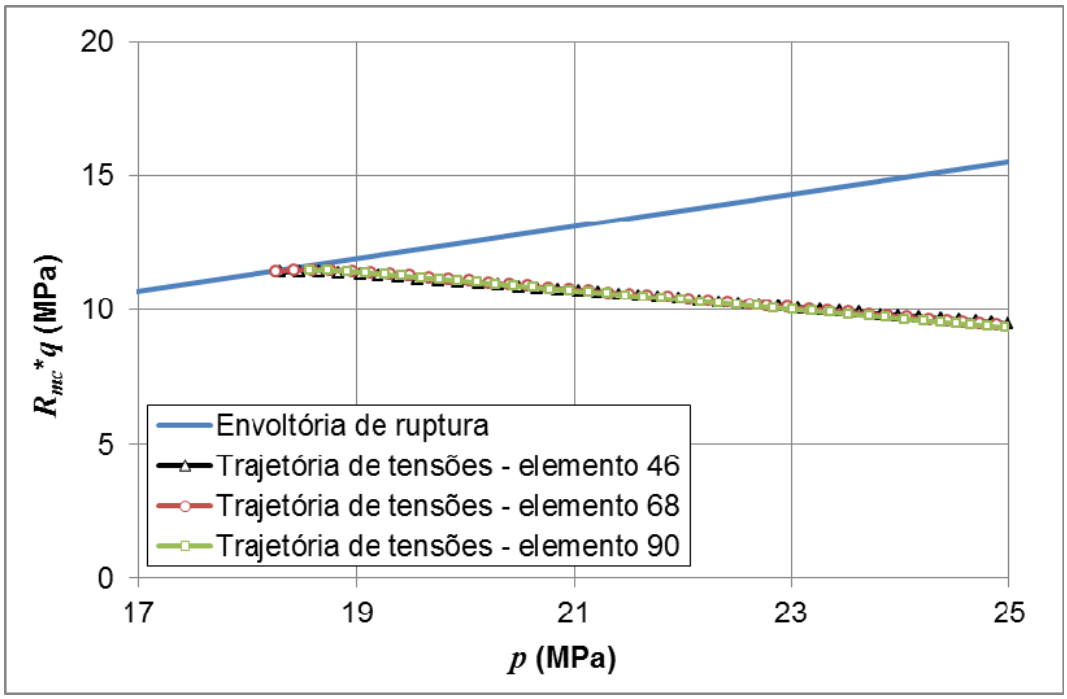

Figura 4.56 – Detalhe das trajetórias de tensões para estudo da propagação vertical da plastificação para o modelo de zona de falha de 80° após 1963 dias de injeção

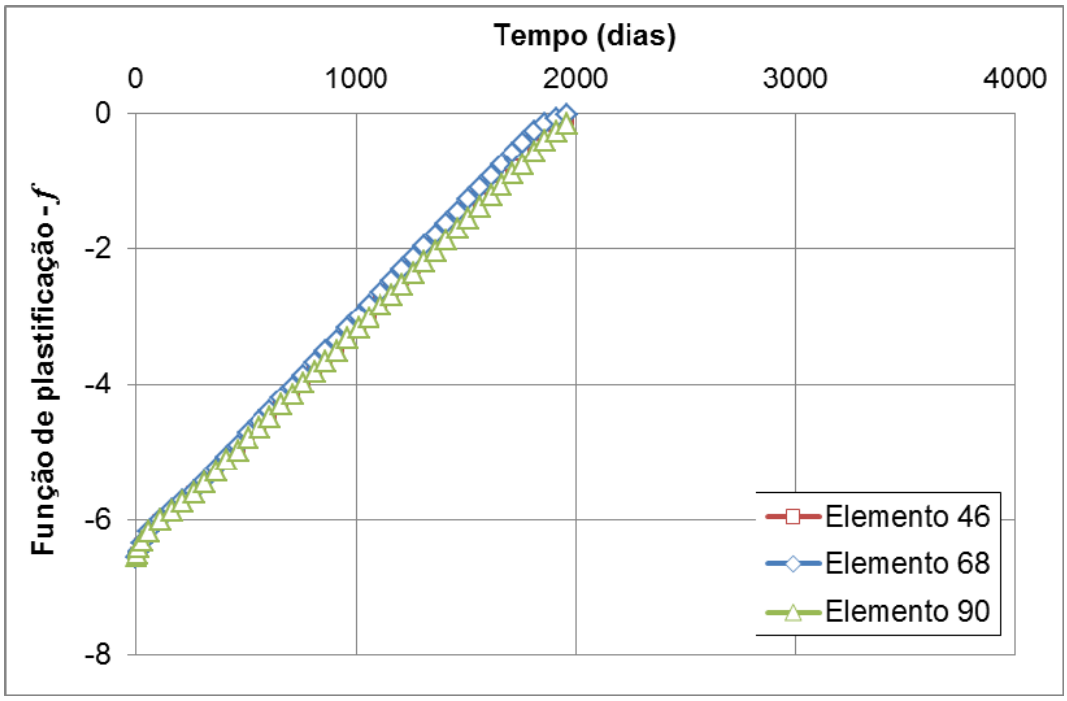

Figura 4.57 – Função de plastificação para estudo da propagação vertical da plastificação para o modelo de zona de falha de 80° após 1963 dias de injeção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

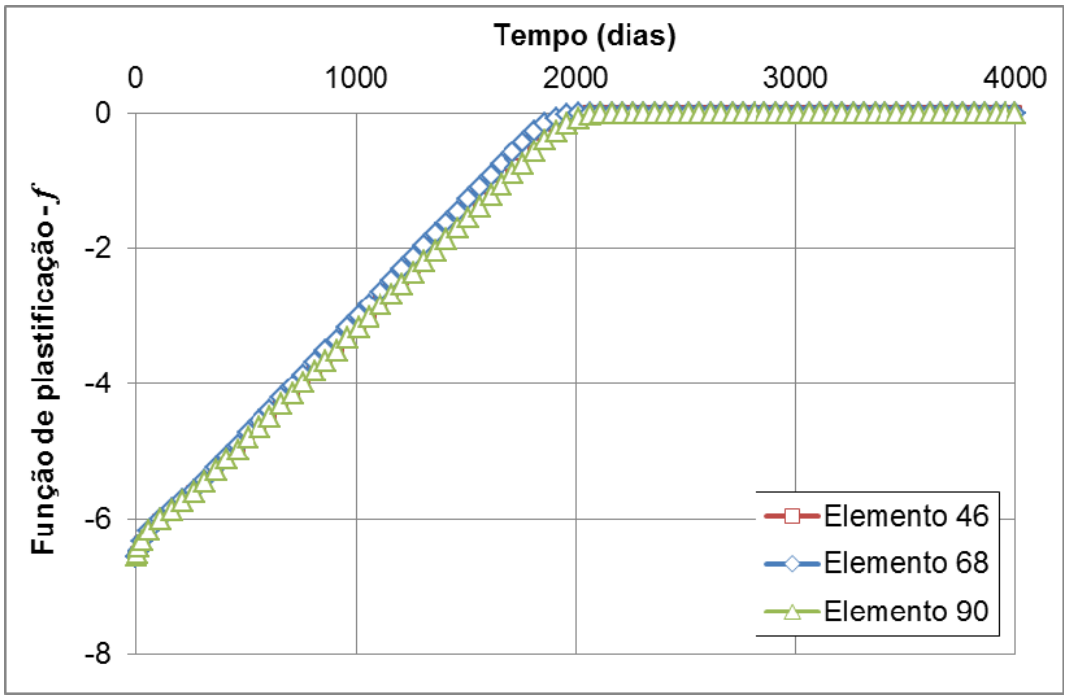

Figura 4.58 – Função de plastificação para estudo da propagação vertical da plastificação para o modelo de zona de falha de 80° após 4000 dias de injeção

Como pode ser observado pela análise das Figuras 4.55 – 4.58, o início do plastificação apresenta-se de forma localizada nos elementos 46 e 68 após 1963 dias de injeção de água, conforme apresentado na Figura 4.35. Após 4000 dias de injeção, o elemento 90 também apresenta plastificação. Pela Figura 4.36 pode ser percebida a concordância dos resultados de propagação vertical, uma vez que os elementos 46, 68 e 90 apresentam-se plastificados. Assim como observado nos resultados da trajetória horizontal, todos os demais elementos que compõe a zona de falha apresentam-se plastificados.

Buscou-se, também, compreender o motivo pelo qual a plastificação dos elementos da zona de falha ocorrem simetricamente nas extremidades da porção referente ao reservatório conforme apresentado nas Figuras 4.34 – 4.36. Para tanto, verificou-se a variação das tensões principais efetivas na trajetória horizontal apresentada na Figura 4.49. As tensões principais efetivas serão apresentadas para alguns intervalos de tempo pré-estabelecidos, são eles: 1, 513, 1163, 1913, 2163, 2813, 3163, 3563 e 4000 dias.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

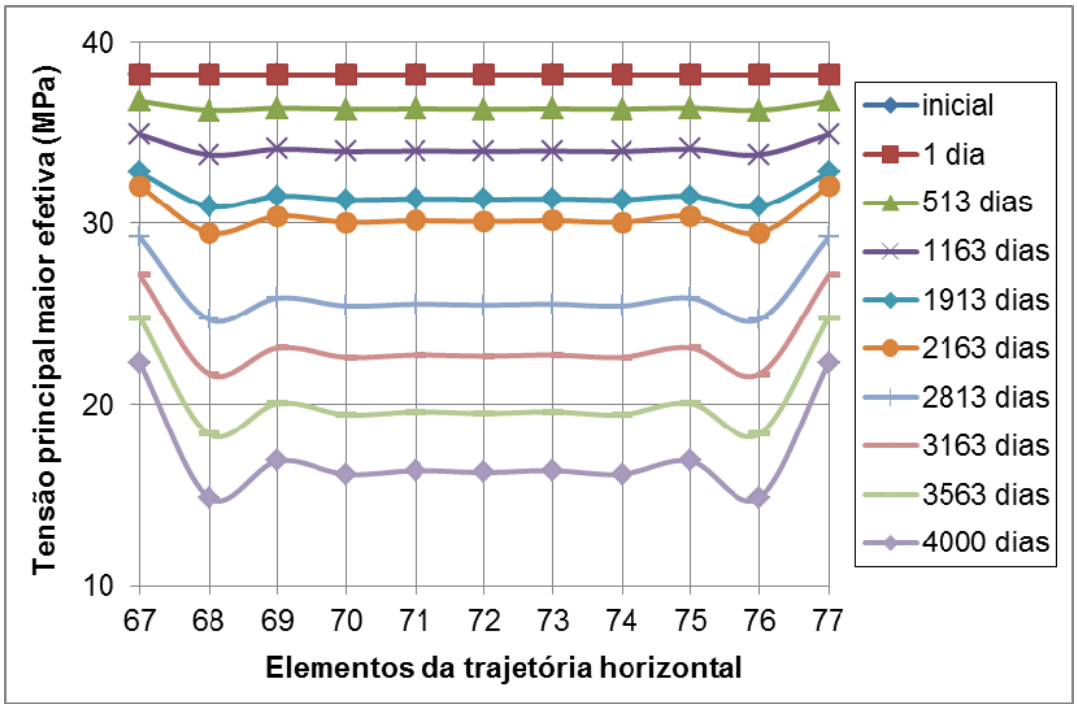

Figura 4.59 – Variação da tensão principal maior efetiva para os diferentes elementos que compõe a trajetória horizontal em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80°

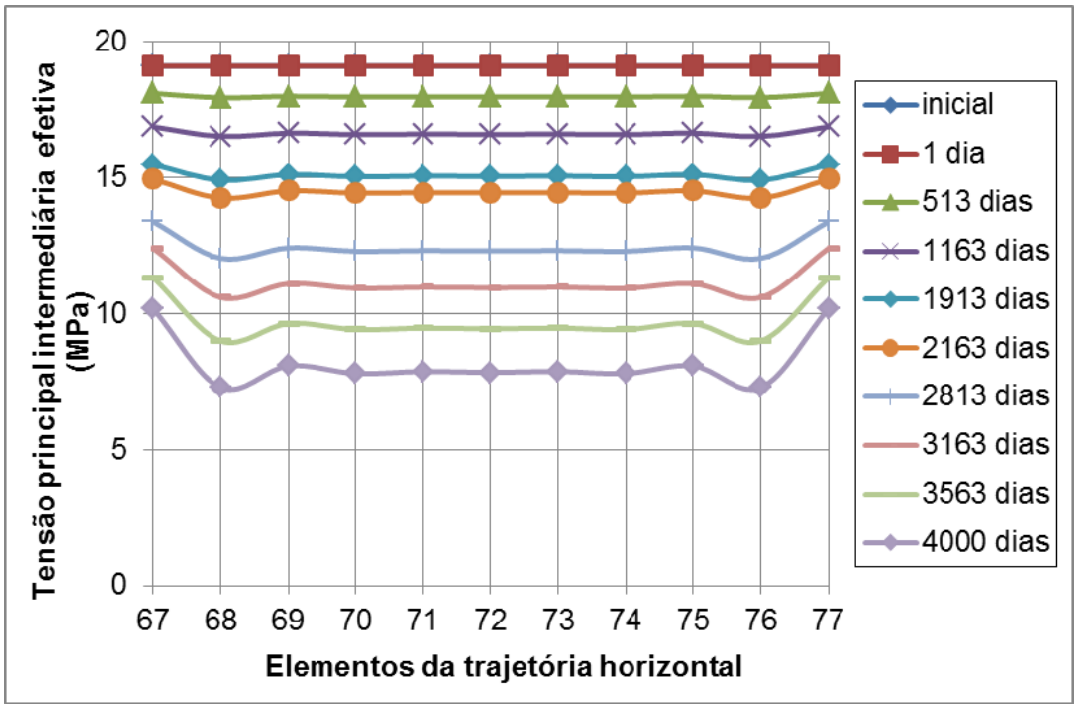

Figura 4.60 – Variação da tensão principal intermediária efetiva para os diferentes elementos que compõe a trajetória horizontal em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80°

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

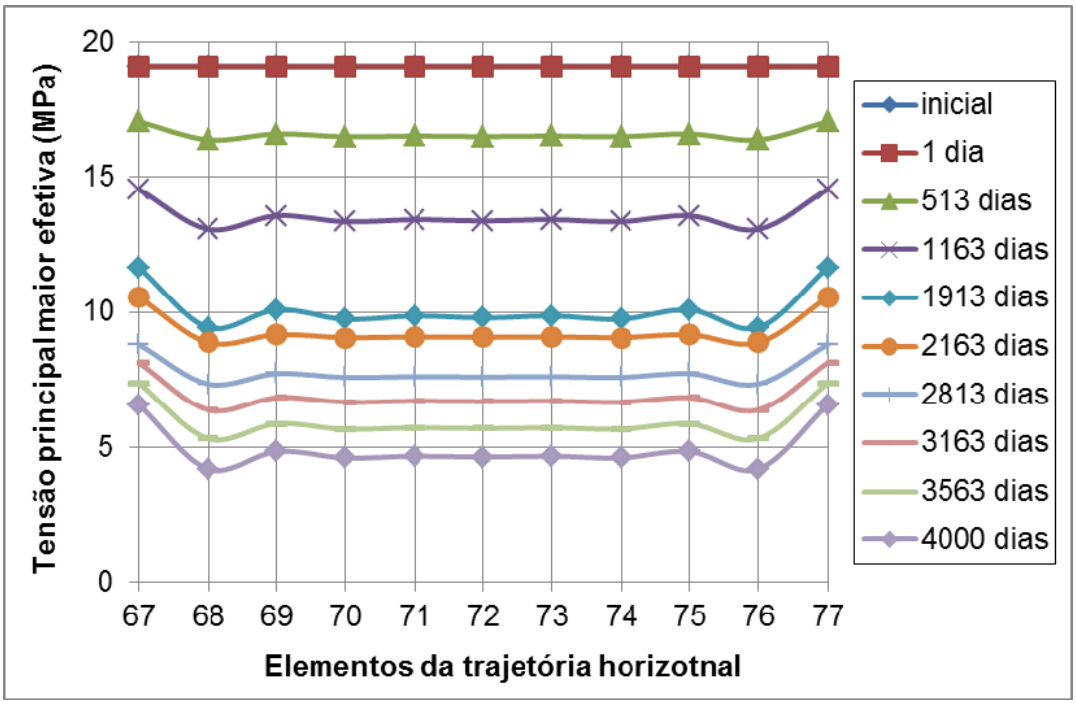

Figura 4.61 – Variação da tensão principal menor efetiva para os diferentes elementos que compõe a trajetória horizontal em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 80°

Pode ser observado pela análise das Figuras 4.59, 4.60 e 4.61 que as tensões principais efetivas apresentam redução com o processo de injeção devido ao aumento da pressão de poros. Além disso, a maior queda das tensões principais é observada nos elementos da extremidade compõe a zona de falha (68 e 76), fato que pode estar relacionado com a diferença de rigidez entre a zona de falha e o *sideburden*. Este resultado corrobora os resultados de plastificação apresentados nas Figuras 4.34 – 4.36 no qual apresenta as posições onde se iniciou o processo de plastificação da zona de falha.

4.2.2.
Modelo com zona de falha inclinada a 60° em relação à horizontal

Os resultados que estão apresentados neste subitem se referem às análises realizadas para o modelo numérico de plasticidade que contém a falha com inclinação de 60° em relação à horizontal.

As Figuras 4.62, 4.63 e 4.64 apresentam o resultado do equilíbrio de tensões do modelo de reservatório com zona da falha de 60°, seguindo os passos apresentados no Capítulo 3. A distribuição de tensões é de tal forma que na base do modelo, a tensão vertical apresenta valor igual a 5.24 MPa e as tensões horizontais apresentam valores iguais a 2.62 MPa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

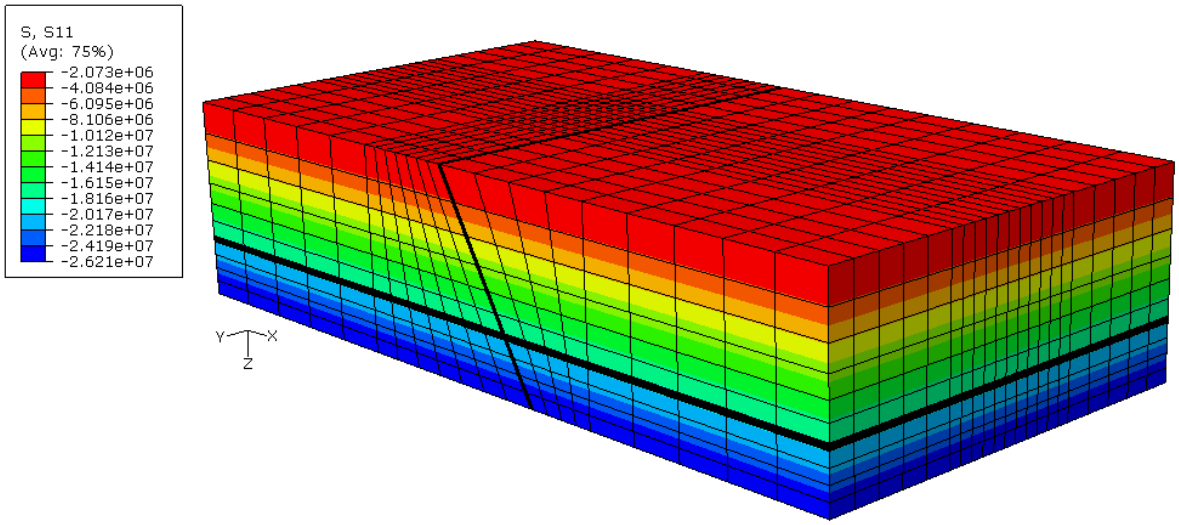

Figura 4.62 – Distribuição da tensão horizontal (S11) no modelo numérico com zona de falha de 60° na fase de equilíbrio

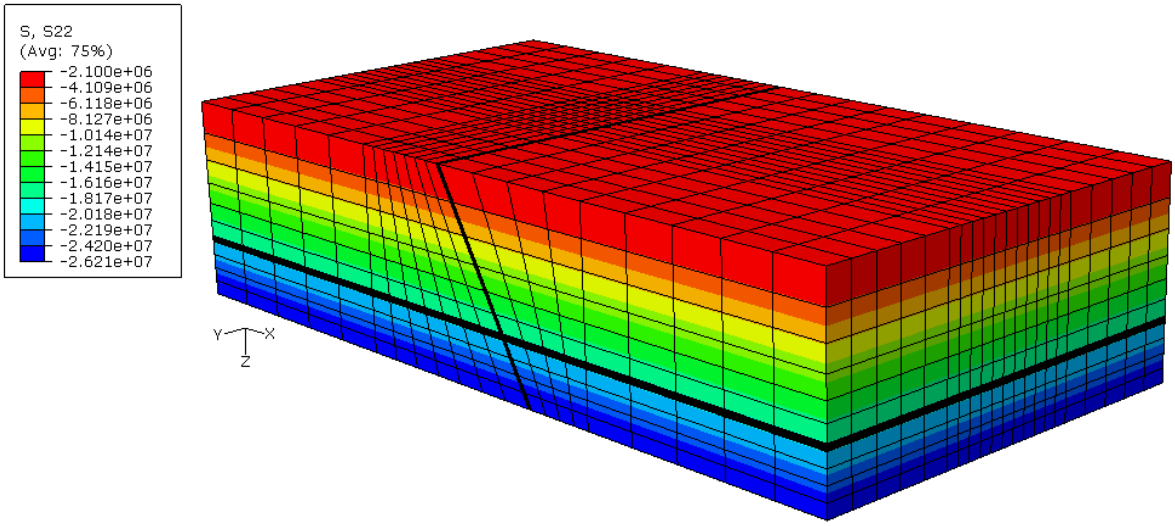

Figura 4.63 – Distribuição da tensão horizontal (S22) no modelo numérico com zona de falha de 60° na fase de equilíbrio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

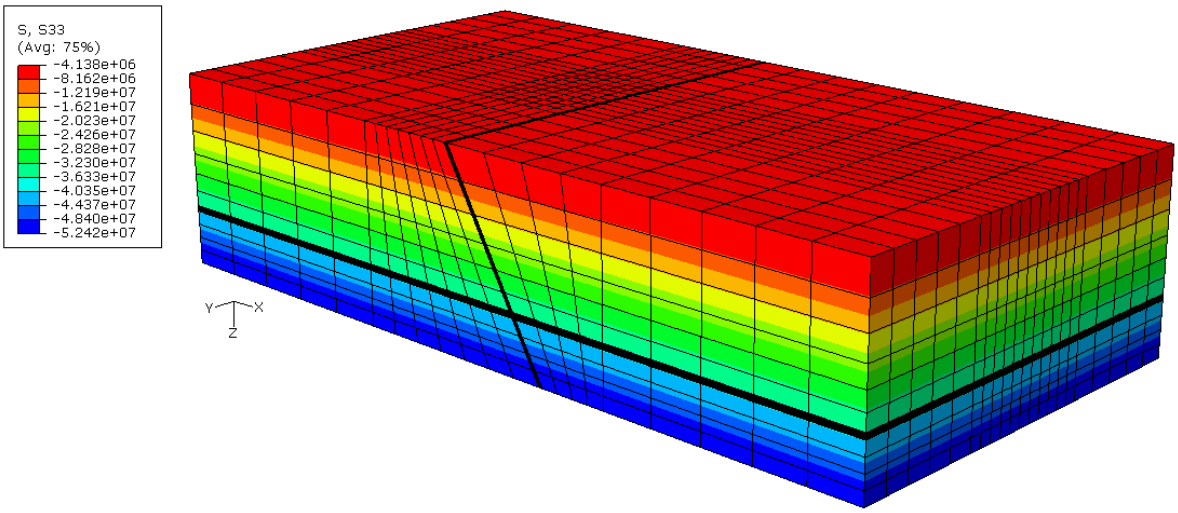

Figura 4.64 – Distribuição da tensão vertical (S33) no modelo numérico com zona de falha de 60° na fase de equilíbrio

A região analisada do modelo com zona de falha de 60º, apresentada na Figura 4.65, está localizada na mesma posição em que foi apresentada nas análises realizadas para a zona de falha de 80°, no entanto, a diferença está no elemento/célula utilizado para aferição das tensões, deformações e pressão de poros destacado em laranja. Em termos de análise da região de plastificada, elencaram os seguintes tempos de injeção: 1, 2163 e 2100 dias. Salienta-se que a ruptura foi observada após 2163 dias de injeção, conforme pode ser observado através das Figuras 4.66 – 4.68.

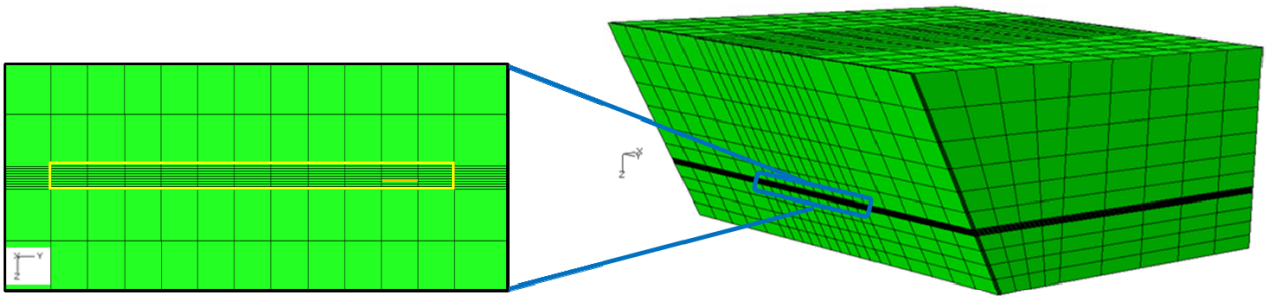

Figura 4.65– Área amplificada da face da zona de falha de 60° onde foi avaliada a reativação

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

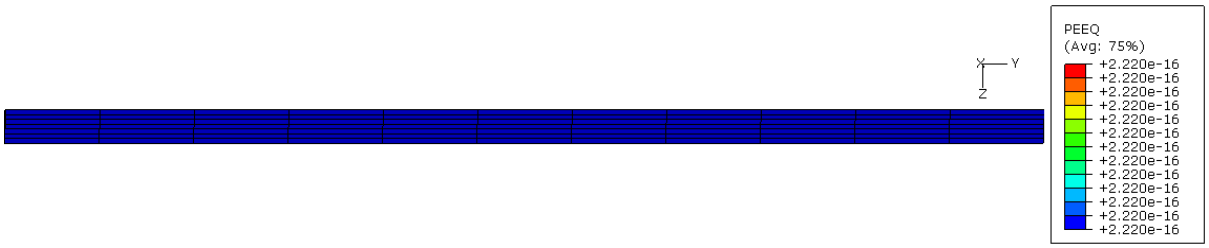

Figura 4.66 – Deformação plástica praticamente nula (PEEQ) para o modelo de falha de 60° com plasticidade após 1 dia de injeção

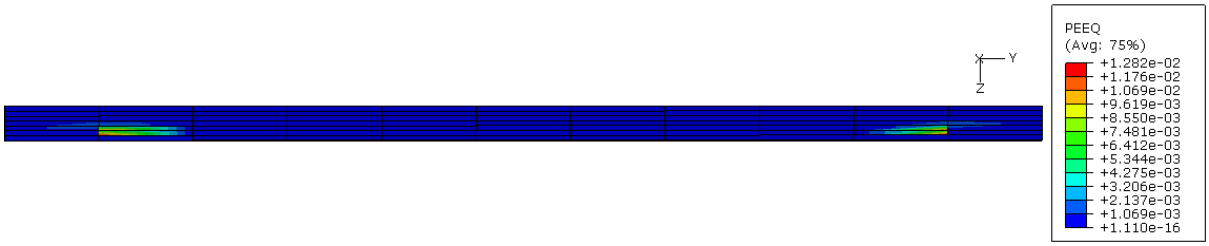

Figura 4.67 – Deformação plástica praticamente nula (PEEQ) para o modelo de falha de 60° com plasticidade após 2163 dias de injeção

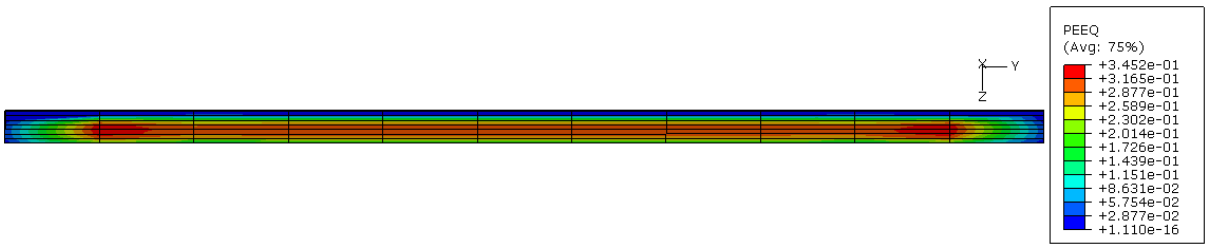

Figura 4.68 – Início da deformação plástica (PEEQ) para o modelo de falha de 60° com plasticidade após 4000 dias de injeção

Pode ser observado que o início da plastificação ocorreu de maneira localizada nas extremidades da zona de falha abrangendo duas camadas e se propagou por toda a extensão da zona de falha com o processo de injeção, apresentando maior intensidade na porção central. No final da análise, pode ser observada que toda a zona de falha apresenta plastificação, salientando assim, a ruptura generalizada do material que a compõe, de uma forma similar à ruptura da zona de falha de 80°. Além disso, ao se comparar a evolução da plastificação com o tempo, fica evidente a propagação horizontal e vertical do processo plastificação.

Assim como apresentado para a zona de falha de 80º, apresentam-se os vetores resultantes de deslocamentos devido ao processo de injeção, conforme

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

apresentado na Figura 4.69. Conforme mencionado anteriormente, o processo contínuo de injeção resultou em uma expansão do reservatório e das rochas adjacentes implicando em um campo de deslocamentos subverticais.

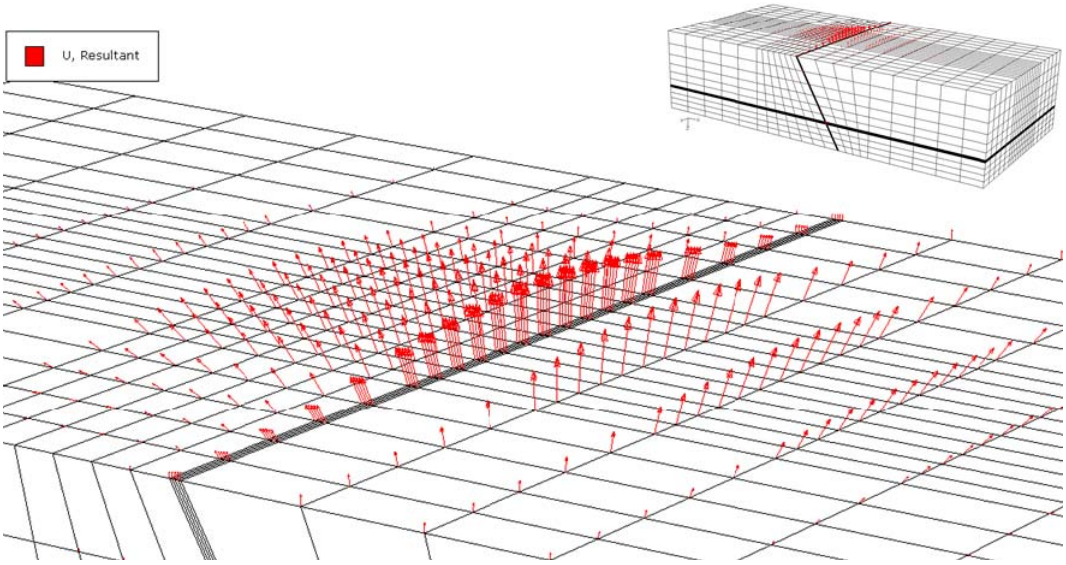

Figura 4.69 – Vetores resultantes dos deslocamentos para o modelo de falha de 60° com plasticidade após 4000 dias de injeção

Assim como foi realizado para a zona de falha de 80°, buscou-se avaliar a variação das tensões principais bem como dos invariantes de tensão com o tempo de injeção. Também aferiu-se a evolução da pressão de poros na região onde foi observada a plastificação da zona de falha e os deslocamentos verticais no topo do reservatório e no topo do *overburden*. Primeiramente serão apresentadas as variações das tensões principais maior, intermediária e menor em função do tempo de análise, além da variação da pressão de poros. Assim como foi efetuado anteriormente, o acréscimo de pressão de poros foi obtido na célula correspondente ao elemento onde foi observado o início do processo de ruptura.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

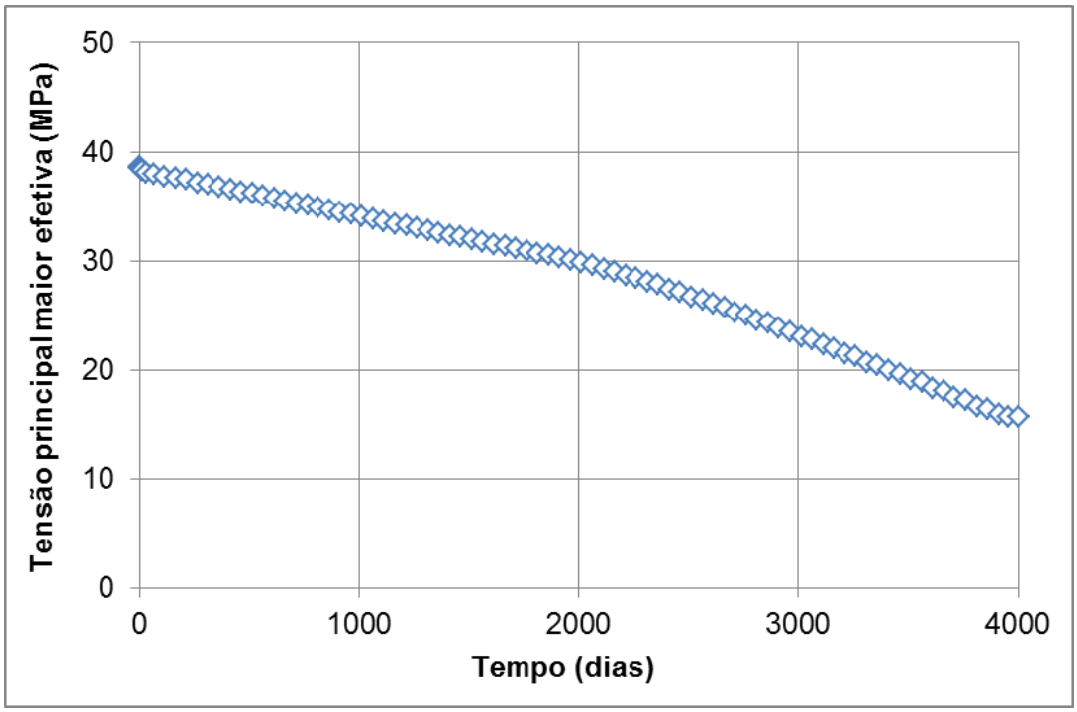

Figura 4.70 – Variação da tensão principal maior efetiva em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60° com plasticidade

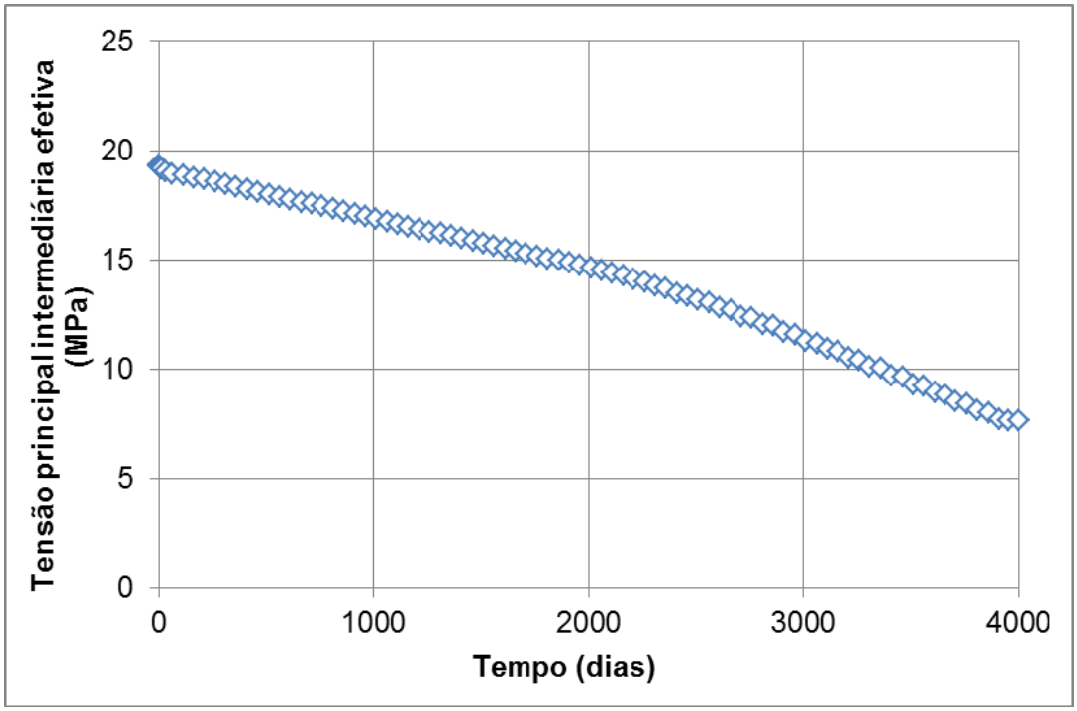

Figura 4.71 – Variação da tensão principal intermediária efetiva em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60° com plasticidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

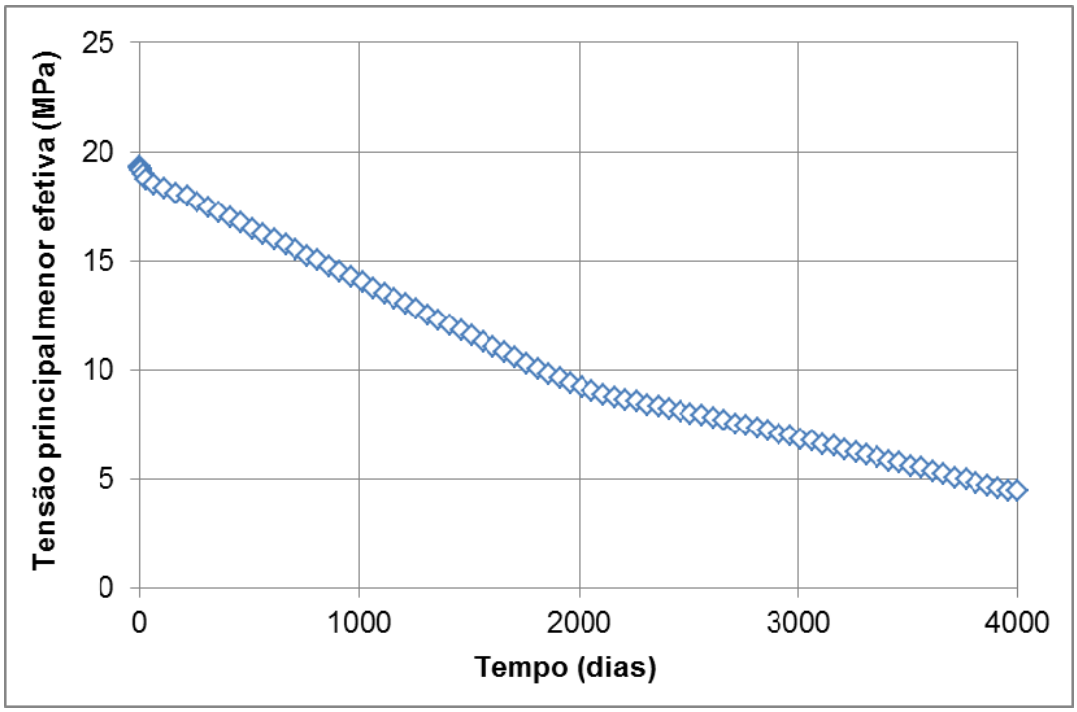

Figura 4.72 – Variação da tensão principal menor efetiva em função do tempo de injeção para o modelo de zona de falha de 60° com plasticidade

Pode ser observado pela análise das Figuras 4.70, 4.71 e 4.72 que o aumento da pressão de poros ao longo do tempo resultou em uma diminuição das tensões principais nas três direções conforme esperado. Assim como ocorrido no caso da zona de falha de 80°, houve uma queda mais acentuada da tensão principal maior em relação às outras duas tensões principais. Novamente, isto pode estar relacionado com o coeficiente de Poisson, uma vez que ele define a razão entre a deformação lateral e a deformação axial, em virtude das tensões serem calculadas a partir das deformações. O aumento de pressão de poros gerado pelos três poços injetores está apresentado na Figura 4.73.

As Figuras 4.74, 4.75 e 4.76 apresentam o comportamento dos três invariantes de tensão envolvidos no cálculo da função da plastificação de Mohr-Coulomb em relação ao tempo de análise. Como já enfatizado, os três invariantes podem ser calculados através das Equações 3.51 – 3.53 apresentadas no Capítulo 3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

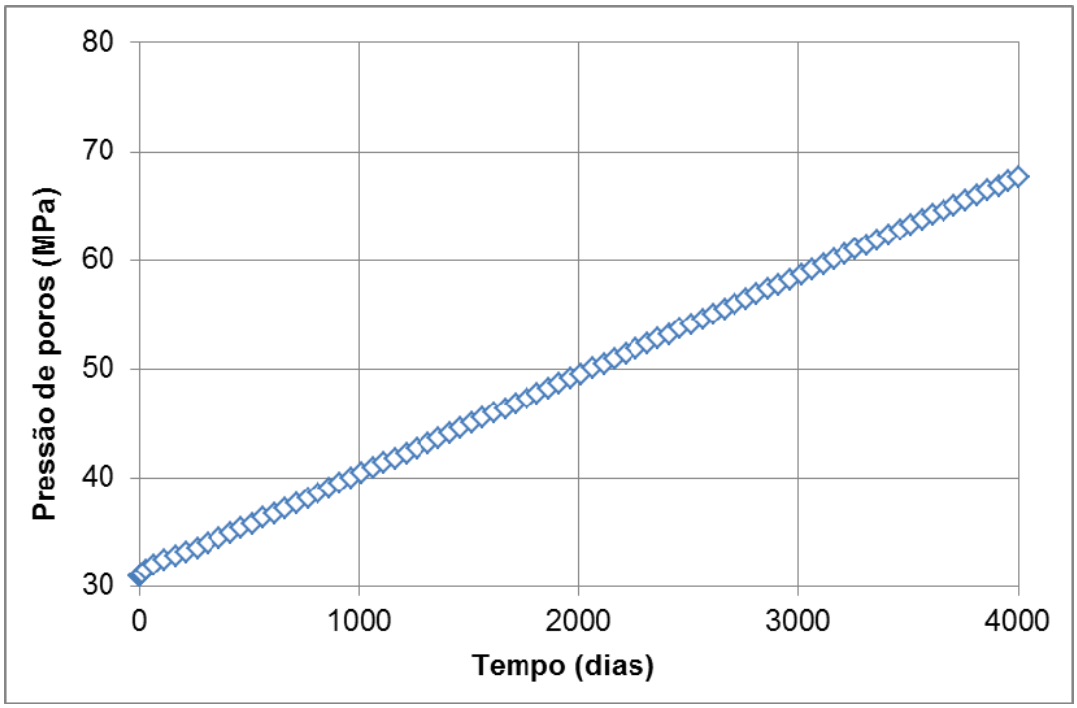

Figura 4.73 – Variação da pressão de poros em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60° com plasticidade

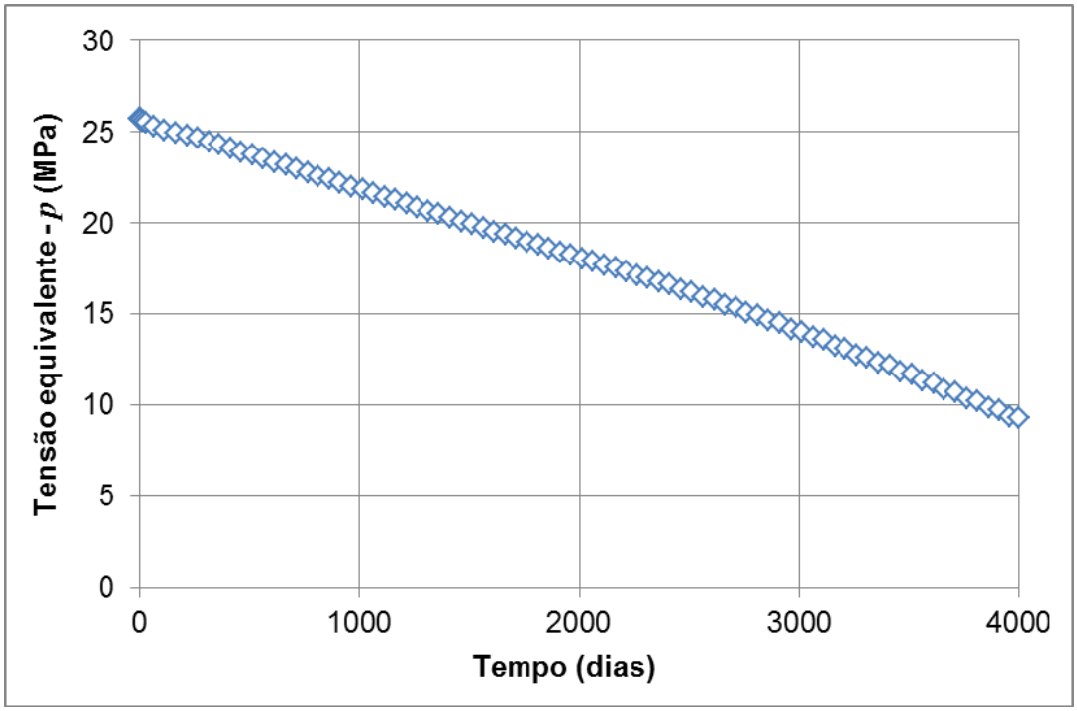

Figura 4.74 – Variação do primeiro invariante de tensões (p) em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60° com plasticidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

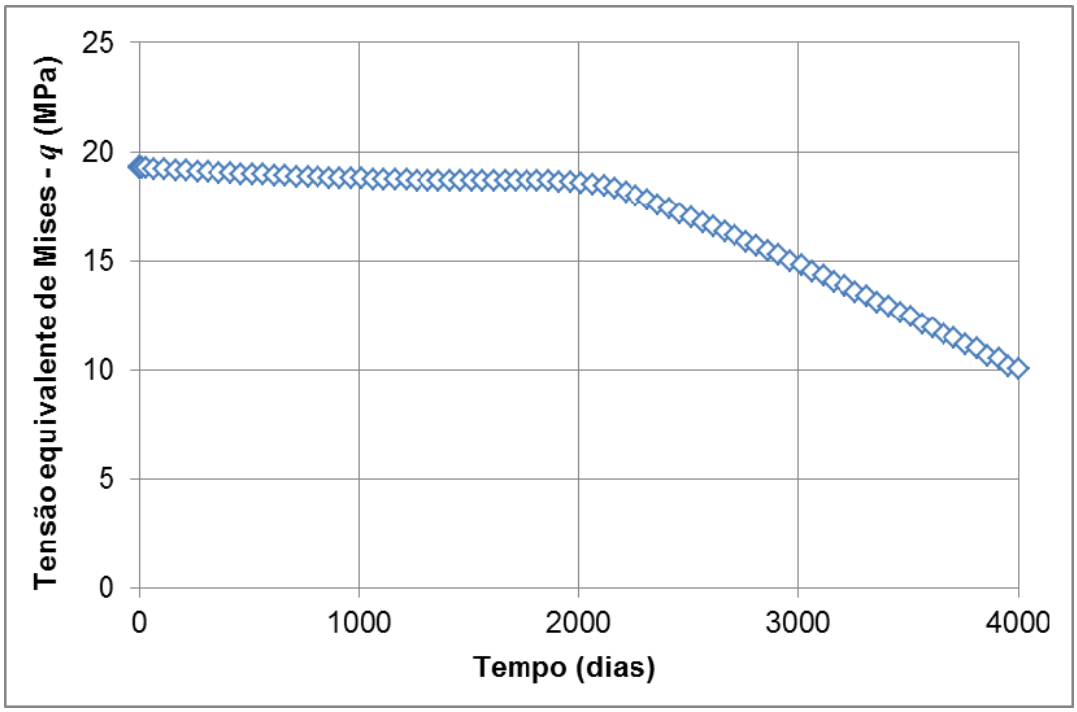

Figura 4.75 – Variação do segundo invariante de tensões (q) em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60° com plasticidade

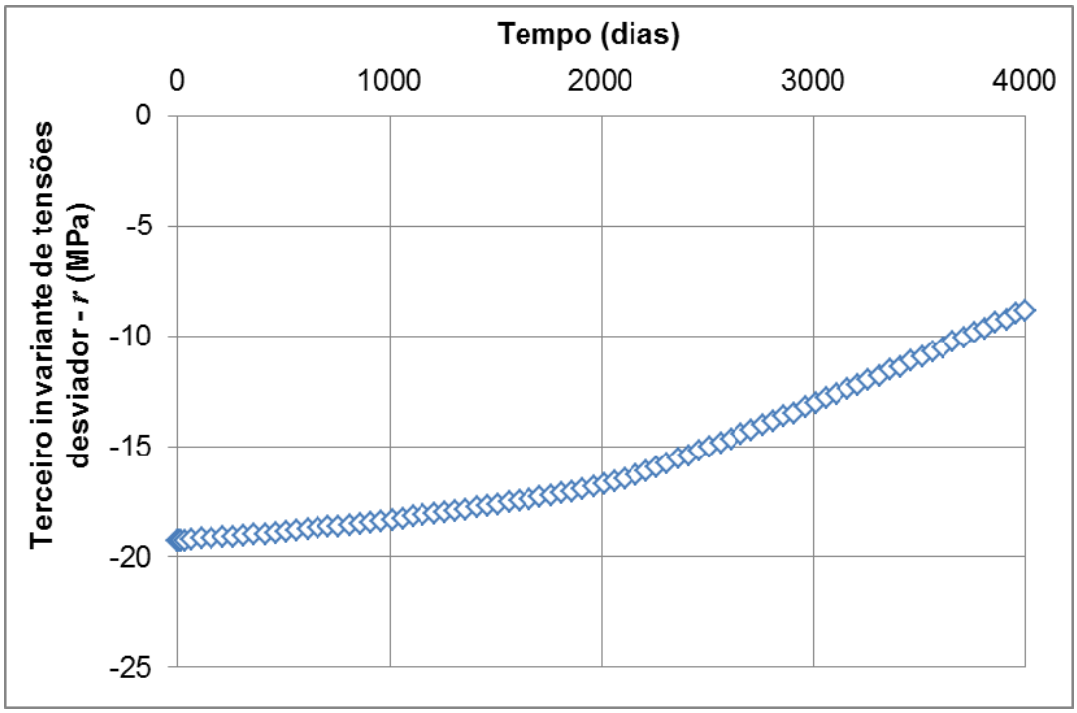

Figura 4.76 – Variação do terceiro invariante de tensões (r) em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60° com plasticidade

Novamente, pode ser observado que os três invariantes apresentam comportamentos distintos, onde o primeiro invariante apresenta comportamento

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

decrescente através do tempo, de acordo com os resultados da variação temporal das tensões principais. O segundo invariante apresenta-se constante até o momento onde foi observado início da plastificação (2163 dias) e posteriormente apresenta queda até o final da análise. Já a magnitude do terceiro invariante apresenta um decréscimo ao longo do tempo de análise, sendo este mais acentuado após o início do processo de plastificação.

De posse dos três invariantes de tensão, pode-se efetuar o cálculo da função de plastificação de Mohr-Coulomb e observar sua variação com o processo de injeção até que seu valor seja praticamente igual à zero indicando a ruptura do material da zona de falha, conforme apresentado na Figura 4.77.

Aqui também foi verificado se o critério de plastificação foi atendido corretamente através da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb e da trajetória de tensões no plano meridional, conforme mostrado na Figura 4.78. Quando a função de plastificação (Equação 3.54) tende a atingir um valor igual à zero, a trajetória de tensões toca a envoltória de ruptura.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

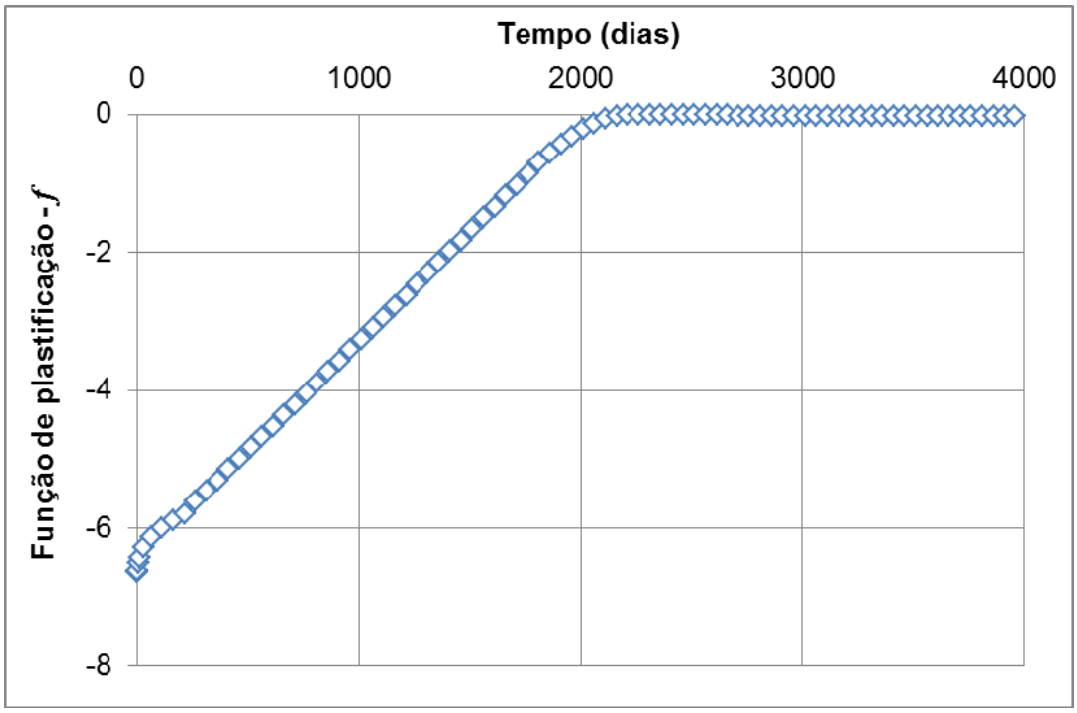

Figura 4.77 – Variação da função de plastificação em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60° com plasticidade

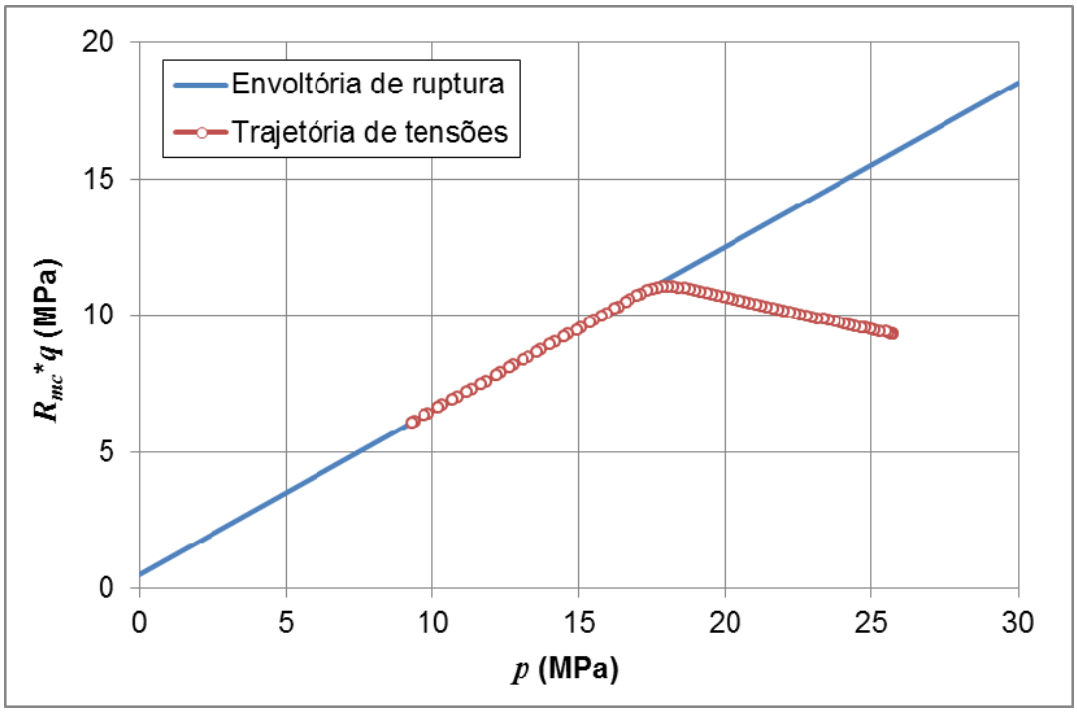

Figura 4.78 – Trajetória de tensões em função da envoltória de ruptura para o modelo com zona de falha de 60° com plasticidade

Pela Figura 4.77, pode ser observado que, a partir de 2163 dias a função de plastificação apresenta um valor praticamente nulo, indicando assim que o critério de plastificação foi atingido no material que compõe a zona de falha. Este fato corrobora a Figura 4.78, uma vez que a trajetória de tensões toca a envoltória de ruptura após 2163 dias de análise.

A expansão na direção vertical do reservatório e o deslocamento vertical do leito marinho foram aferidos, conforme apresentado nas Figuras 4.79 e 4.80, respectivamente.

Em relação aos deslocamentos verticais do reservatório e do leito marinho, pode ser observado valores muito próximos aos encontrados no modelo de zona de falha de 80°. Em relação ao deslocamento vertical do reservatório ao final dos 4000 dias aferiu-se um valor de praticamente 40 centímetros. Para o deslocamento vertical do leito marinho aferiu-se um valor superior a 20 centímetros.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

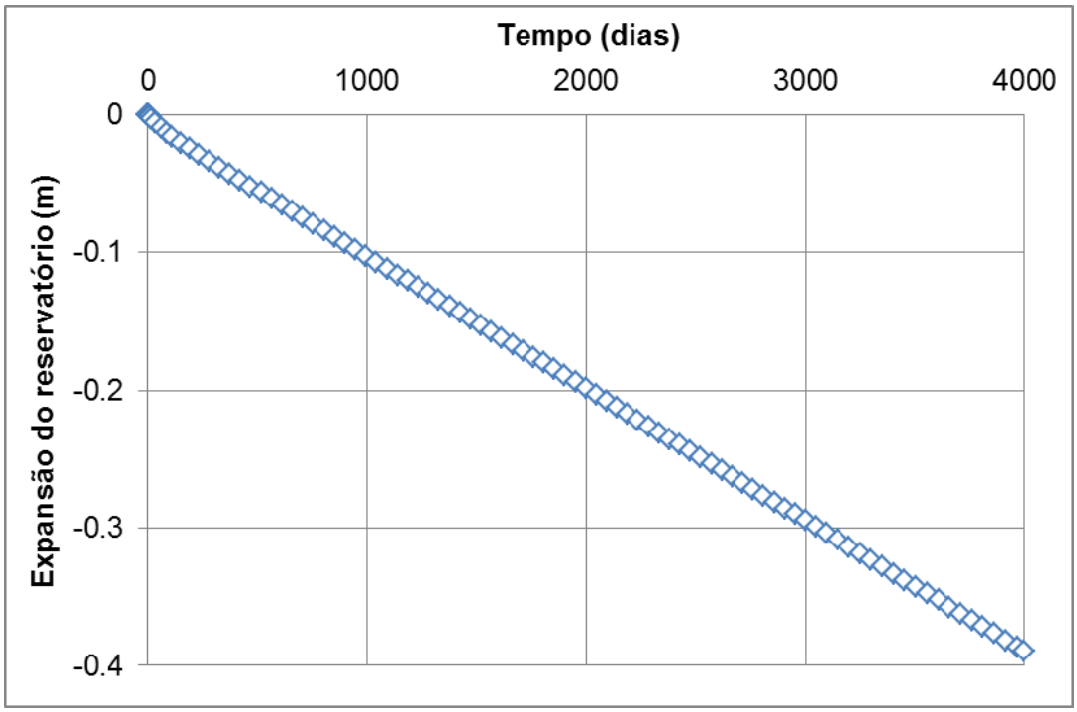

Figura 4.79 – Expansão vertical do reservatório em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60° com plasticidade

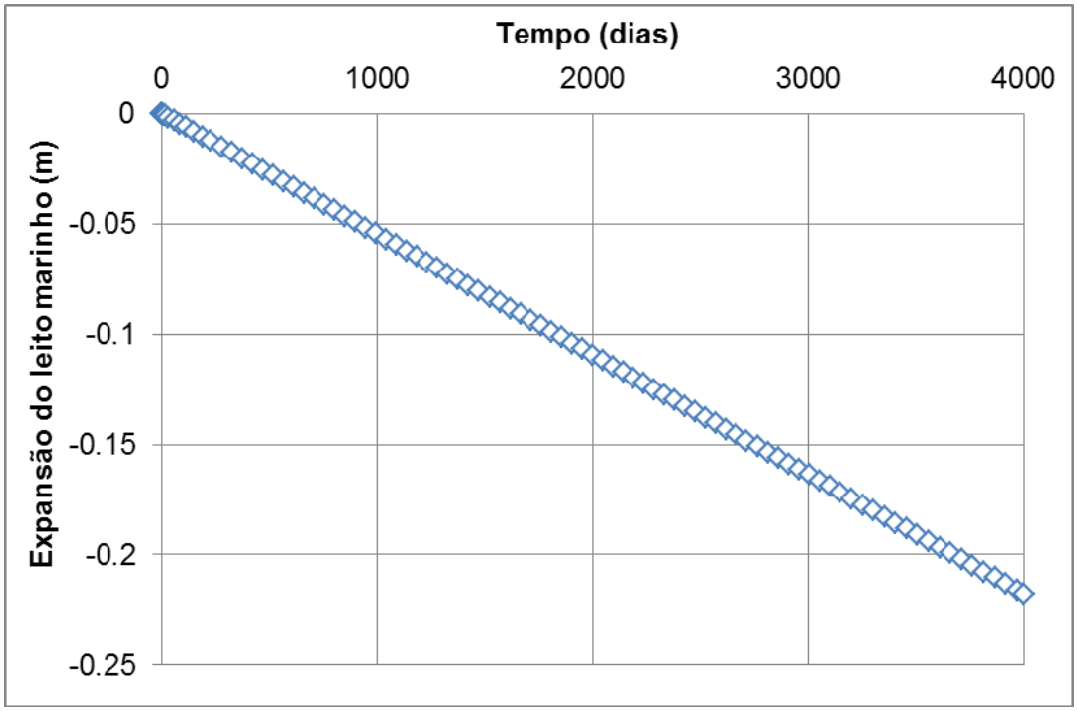

Figura 4.80 – Deslocamento vertical do leito marinho em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60° com plasticidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

Assim como foi efetuado para a zona de falha de 80°, buscou-se avaliar, também, a propagação vertical e horizontal da plastificação, apresentada nas Figuras 4.66, 4.67 e 4.68. Para tal, foram escolhidas duas trajetórias, uma vertical e outra horizontal. A trajetória horizontal é composta pelos elementos apresentados na Figura 4.81.

516	514	512	510	508	506	504	502	500	498	496
517	515	513	511	509	507	505	503	501	499	497
51	46	41	36	31	26	21	16	11	6	1
52	47	42	37	32	27	22	17	12	7	2
53	48	43	38	33	28	23	18	13	8	3
54	49	44	39	34	29	24	19	14	9	4
55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5

Figura 4.81 – Elementos que compõe a trajetória horizontal estudada, destacada em azul escuro, para o modelo de zona de falha de 60°

Deve ser ressaltado que estes elementos compõem a zona de falha na porção referente ao reservatório, conforme apresentado na Figura 4.65. Além disso, o elemento 9 (destacado em laranja nas Figuras 4.65 e 4.81) se refere ao elemento onde foram aferidos os dados para a confecção das análises apresentadas anteriormente.

De forma a avaliar a propagação horizontal da plastificação devido ao processo de injeção, elencou-se apenas os elementos 4, 9 e 14. Os demais não foram plotados pela simetria dos resultados e para facilitar a distinção das curvas. A seguir estão apresentados os resultados por meio da trajetória de tensões e da função de plastificação, conforme segue. As trajetórias de tensões foram plotadas com uma mudança na escala de forma a facilitar a visualização dos elementos que atingem o critério de plastificação (Figura 4.83).

As funções de plastificação, para os elementos analisados, foram analisadas no momento onde ocorreu o início da plastificação da zona de falha (2163 dias – elemento 9) e para o período final de injeção (4000 dias).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

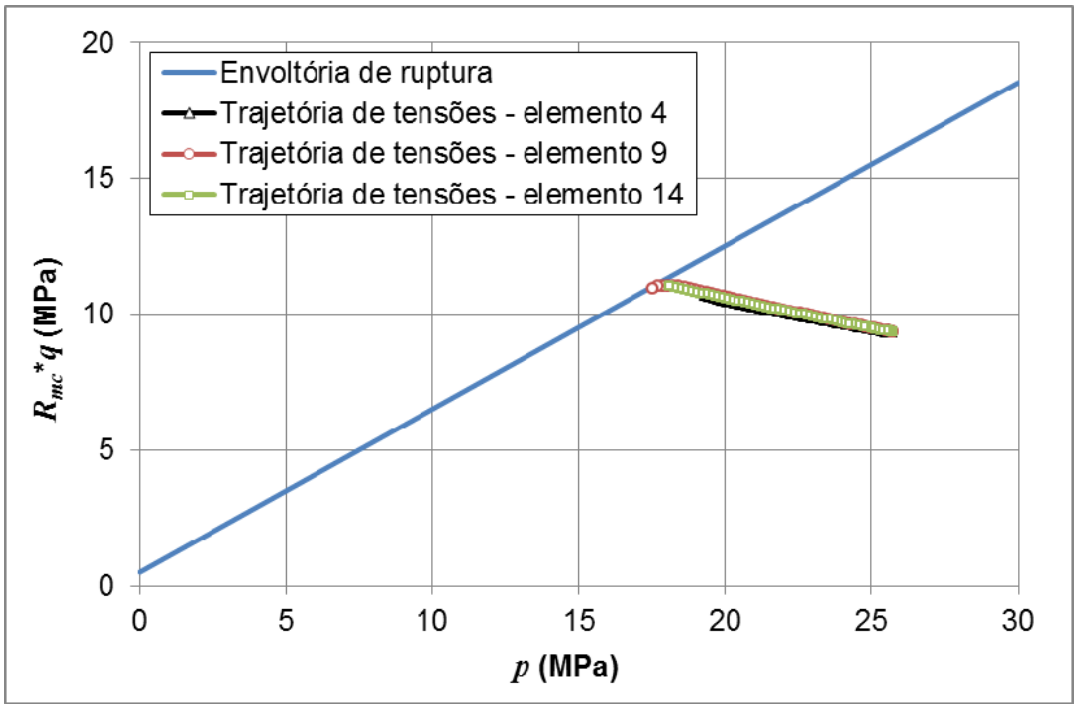

Figura 4.82 – Trajetórias de tensões para estudo da propagação horizontal da plastificação para o modelo de zona de falha de 60°

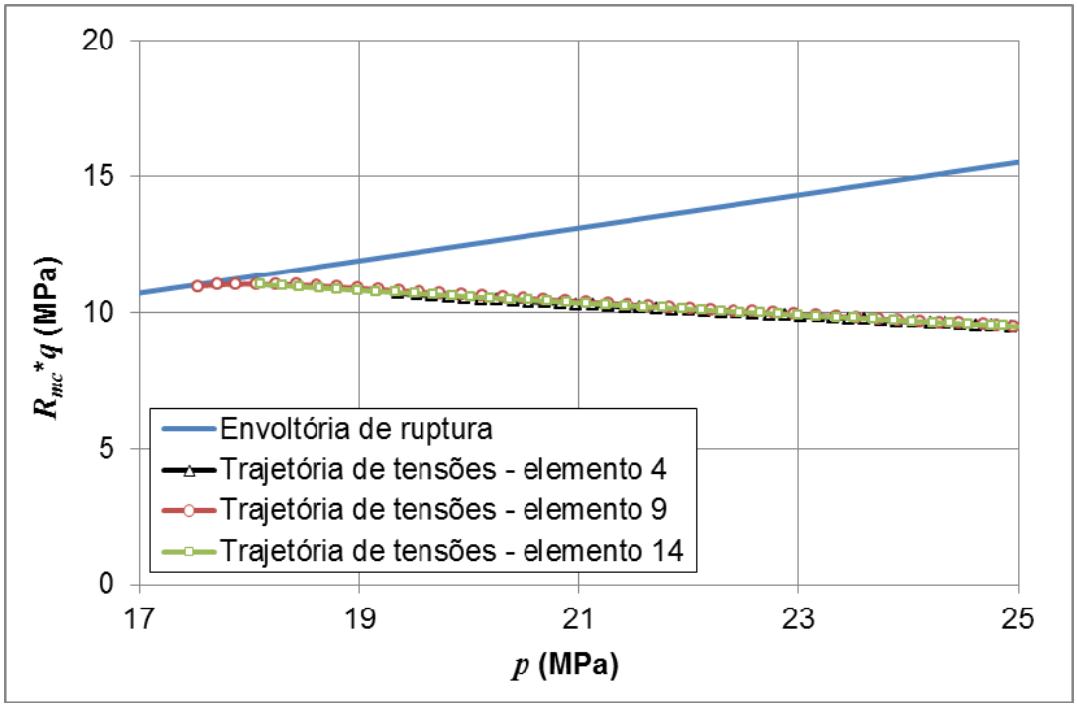

Figura 4.83 – Detalhe das trajetórias de tensões para estudo da propagação horizontal da plastificação para o modelo de zona de falha de 60°

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

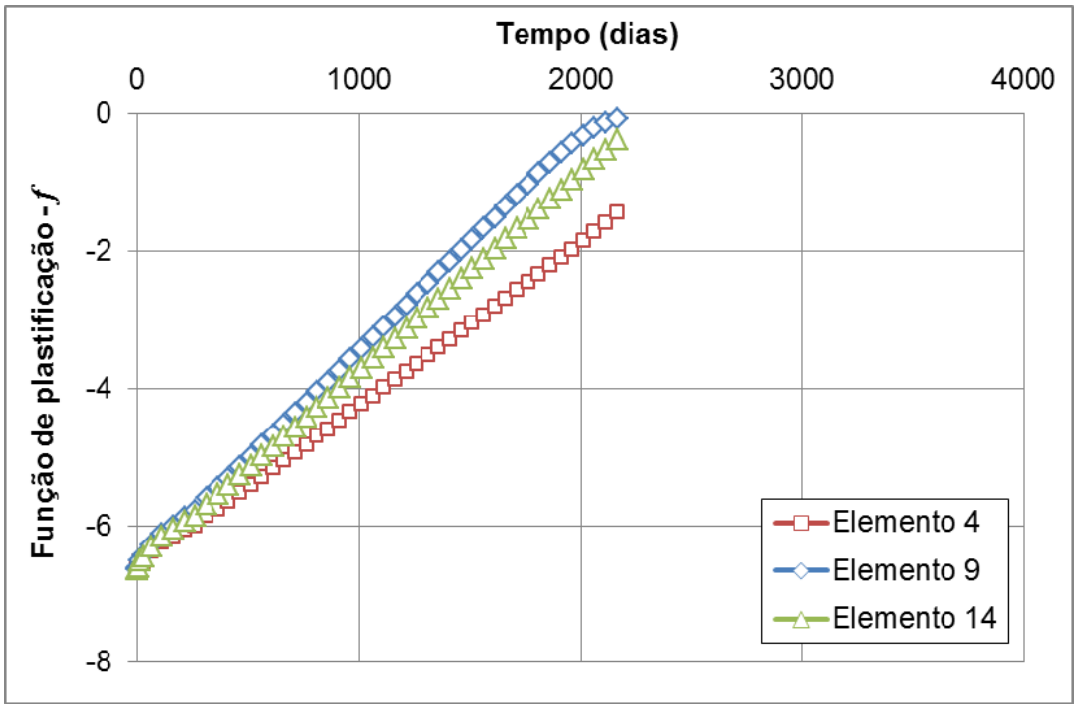

Figura 4.84 – Função de plastificação para estudo da propagação horizontal da plastificação para o modelo de zona de falha de 60° após 2163 dias de injeção

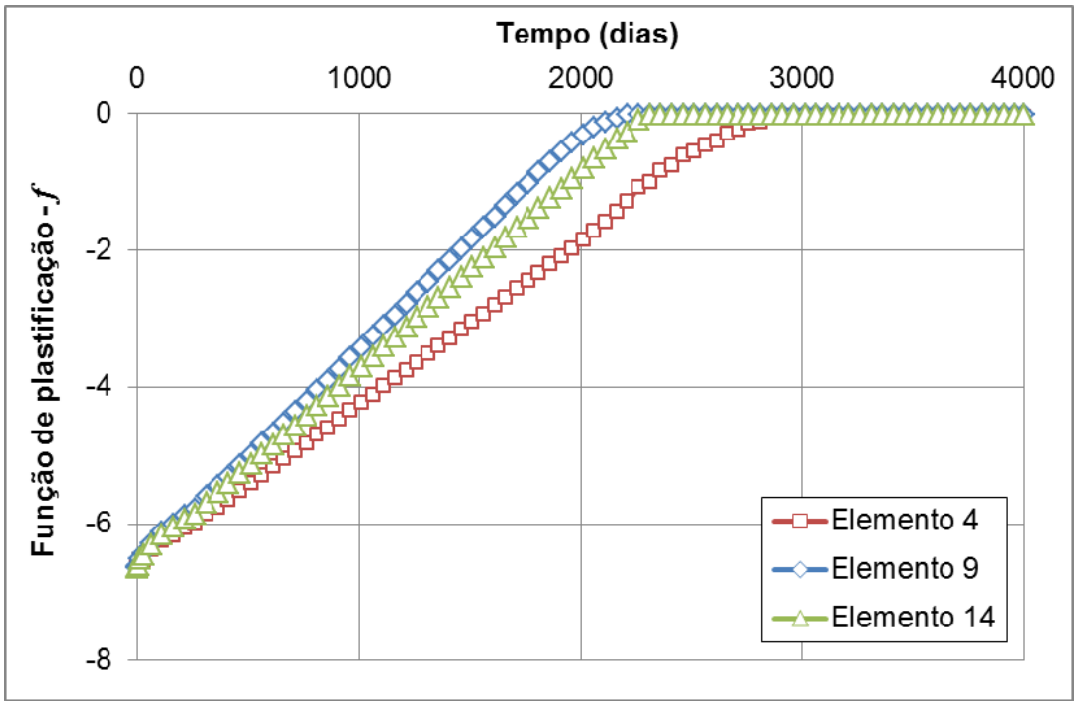

Figura 4.85 – Função de plastificação para estudo da propagação horizontal da plastificação para o modelo de zona de falha de 60° após 4000 dias de injeção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

Como pode ser observado pela análise das Figuras 4.82 – 4.85, o início do plastificação apresenta-se de forma localizada no elemento 9 após 2163 dias de injeção de água, conforme apresentado na Figura 4.67. Após 4000 dias de injeção (período analisado), os elementos 4 e 14 também apresentam plastificação conforme apresentado na Figura 4.68. Além destes, todos os demais elementos que compõe a zona de falha apresentam-se plastificados, assim como observado na zona de falha de 80°.

A seguir serão apresentados os resultados relativos à propagação vertical da plastificação, confrontando os resultados apresentados nas Figuras 4.66, 4.67 e 4.68. A trajetória vertical é composta pelos elementos apresentados na Figura 4.86.

516	514	512	510	508	506	504	502	500	498	496
517	515	513	511	509	507	505	503	501	499	497
51	46	41	36	31	26	21	16	11	6	1
52	47	42	37	32	27	22	17	12	7	2
53	48	43	38	33	28	23	18	13	8	3
54	49	44	39	34	29	24	19	14	9	4
55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5

Figura 4.86 – Elementos que compõe a trajetória vertical estudada, destacada em azul escuro, para o modelo de zona de falha de 60°

Ressalta-se, novamente, que estes elementos compõem a zona de falha na porção referente ao reservatório, conforme apresentado na Figura 4.65.

De forma a avaliar a propagação vertical da plastificação devido ao processo de injeção, elencou-se apenas os elementos 8, 9 e 10. Assim como realizado anteriormente, os demais elementos não foram plotados de forma a facilitar a visualização das curvas. A seguir estão apresentados os resultados por meio da trajetória de tensões e da função de plastificação, da mesma forma como realizado para a trajetória horizontal. As trajetórias de tensão foram plotadas com uma mudança na escala de forma a facilitar a visualização dos elementos que atingem o critério de plastificação (Figura 4.88).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

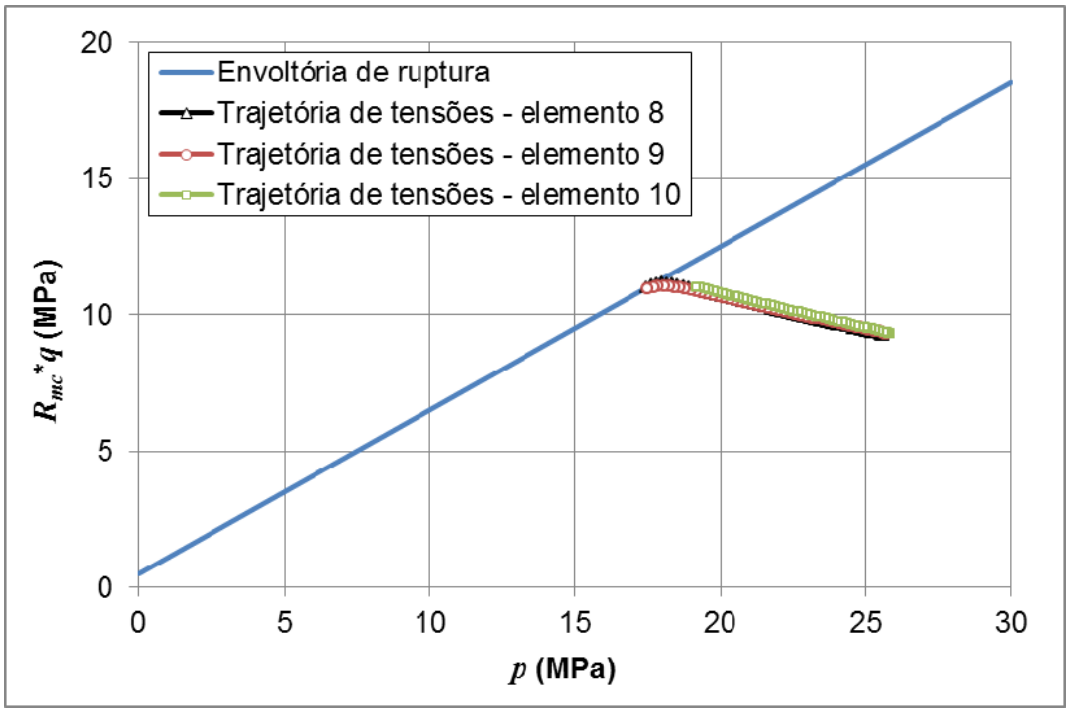

Figura 4.87 – Trajetórias de tensões para estudo da propagação vertical da plastificação para o modelo de zona de falha de 60° após 2163 dias de injeção

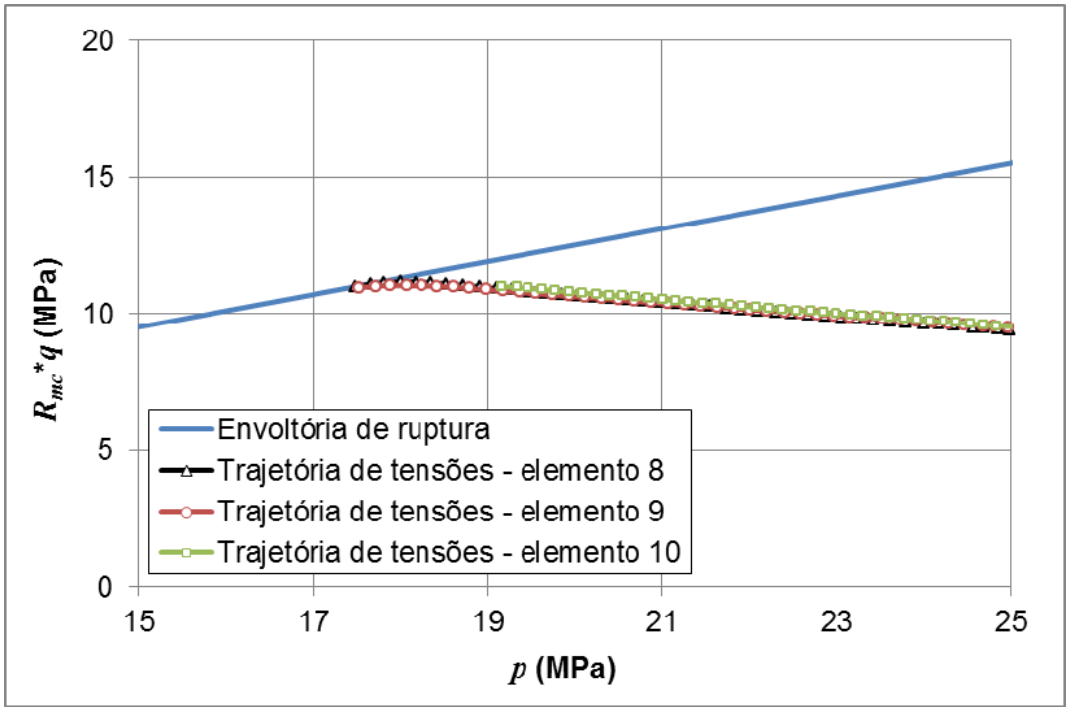

Figura 4.88 – Detalhe das trajetórias de tensões para estudo da propagação vertical da plastificação para o modelo de zona de falha de 60° após 2163 dias de injeção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

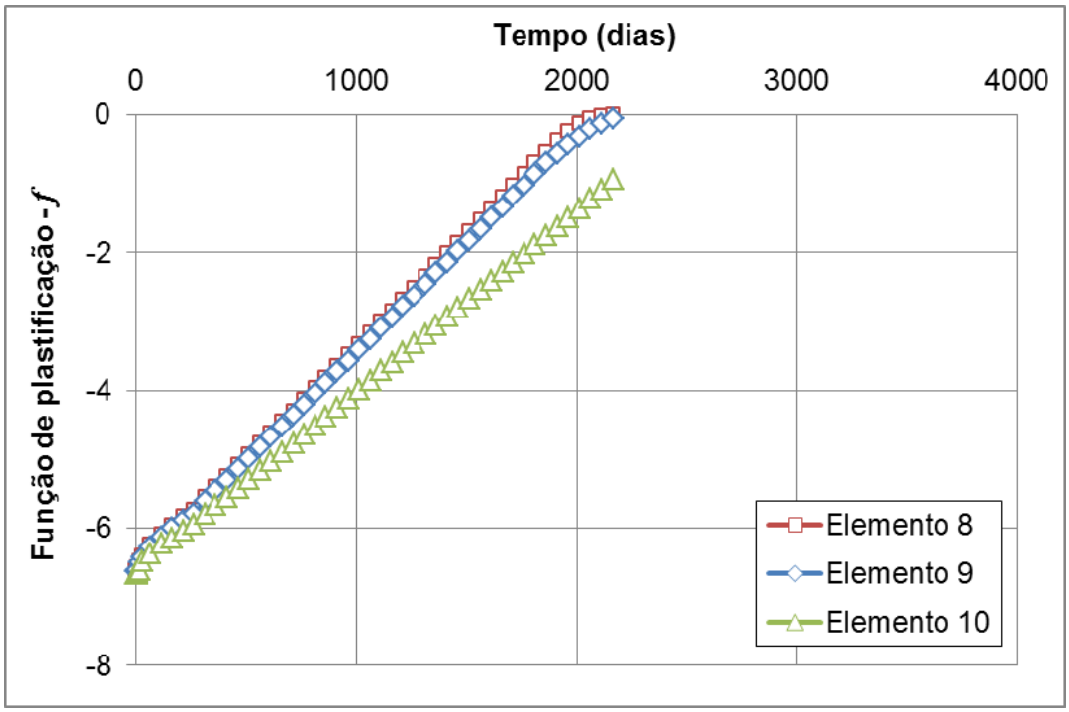

Figura 4.89 – Função de plastificação para estudo da propagação vertical da plastificação para o modelo de zona de falha de 60° após 2163 dias de injeção

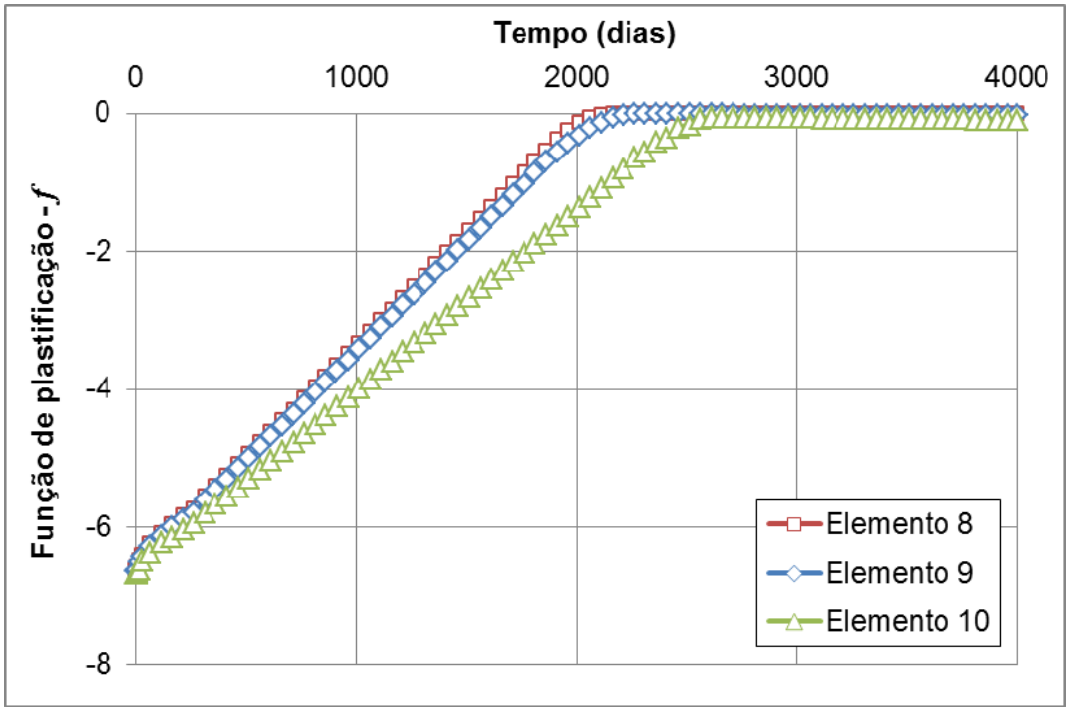

Figura 4.90 – Função de plastificação para estudo da propagação vertical da plastificação para o modelo de zona de falha de 60° após 4000 dias de injeção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

Como pode ser observado pela análise das Figuras 4.87 – 4.90, o início do plastificação apresenta-se de forma localizada nos elementos 8 e 9 após 2163 dias de injeção de água, conforme apresentado na Figura 4.67. Após 4000 dias de injeção, o elemento 10 também apresenta plastificação. Pela Figura 4.68 pode ser percebida a concordância dos resultados de propagação vertical, uma vez que os elementos 8, 9 e 10 apresentam-se plastificados. Assim como observado nos resultados da trajetória horizontal, todos os demais elementos que compõe a zona de falha apresentam-se plastificados.

Assim como já realizado para a zona de falha de 80°, buscou-se, também, compreender o motivo pelo qual a plastificação dos elementos da zona de falha ocorrem simetricamente nas extremidades do modelo conforme apresentado nas Figuras 4.66 – 4.68. Para tanto, verificou-se a variação das tensões principais efetivas na trajetória horizontal apresentada na Figura 4.81. As tensões principais efetivas serão apresentadas para os mesmos intervalos de tempos apresentados na análise da zona de falha de 80°, são eles: 1, 513, 1163, 1913, 2163, 2813, 3163, 3563 e 4000 dias.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

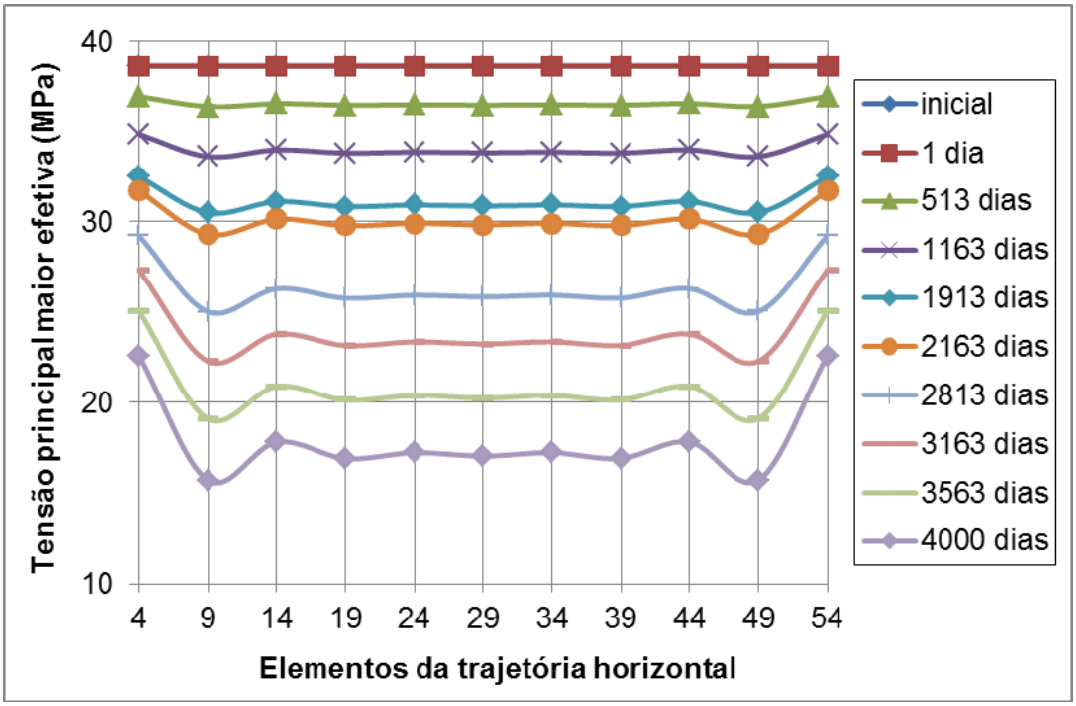

Figura 4.91 – Variação da tensão principal maior efetiva para os diferentes elementos que compõe a trajetória horizontal em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60°

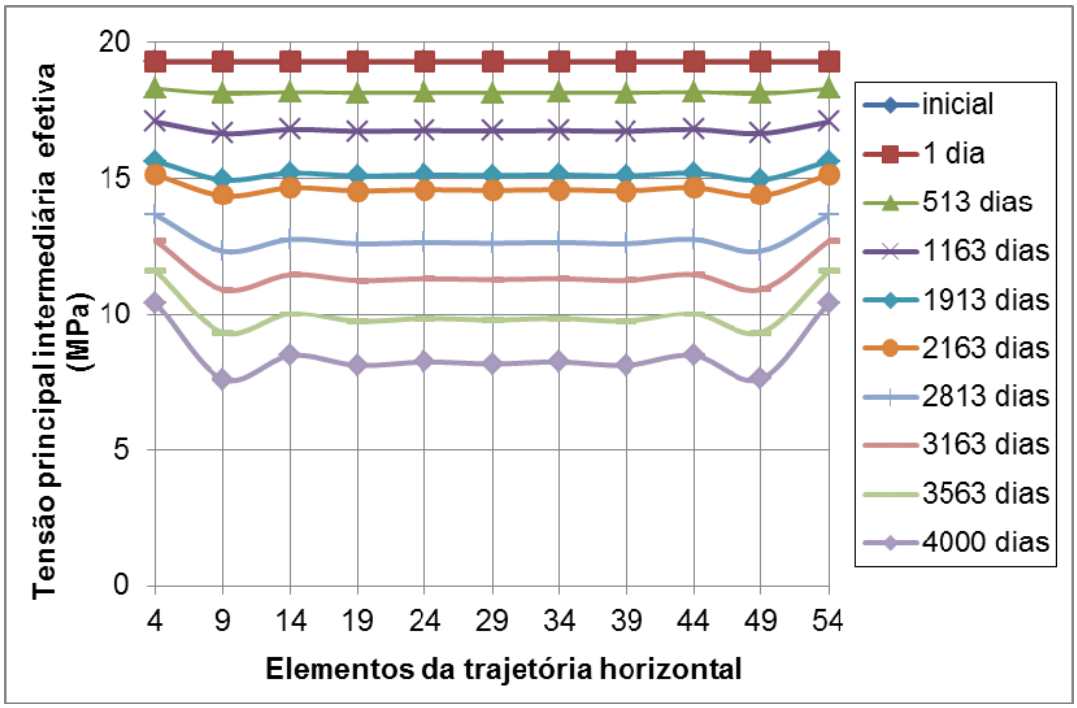

Figura 4.92 – Variação da tensão principal intermediária efetiva para os diferentes elementos que compõe a trajetória horizontal em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60°

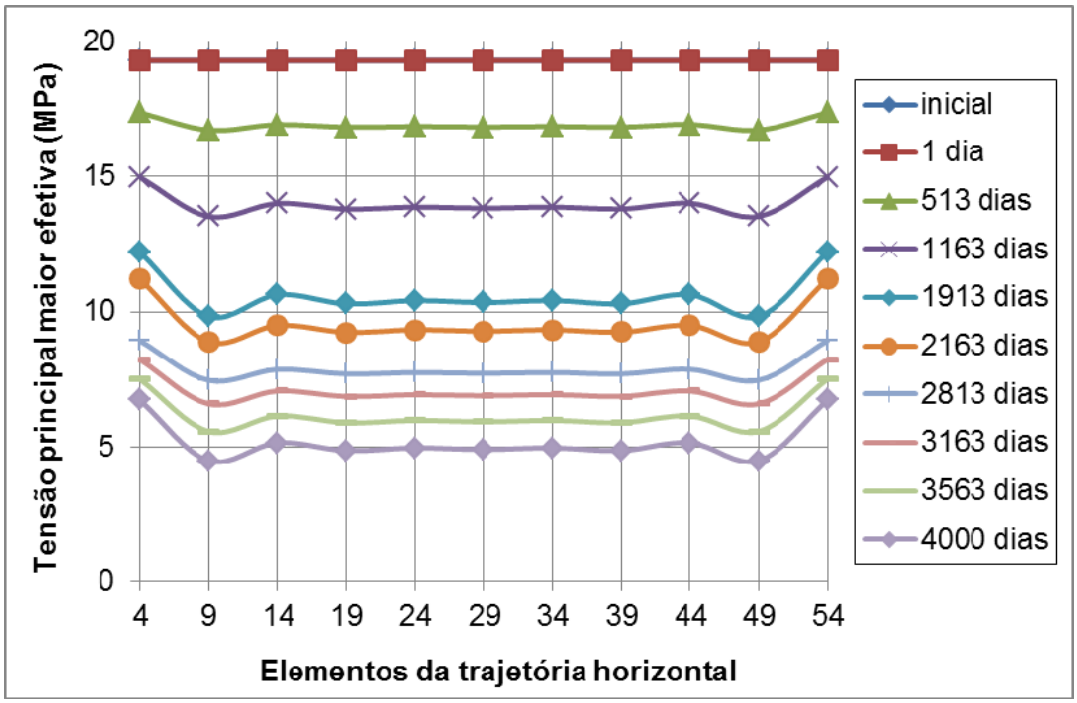

Figura 4.93 – Variação da tensão principal menor efetiva para os diferentes elementos que compõe a trajetória horizontal em função do tempo de injeção para o modelo com zona de falha de 60°

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

Pode ser observado pela análise das Figuras 4.91, 4.92 e 4.93 que as tensões principais efetivas apresentam redução com o processo de injeção devido ao aumento da pressão de poros. Além disso, a maior queda das tensões principais é observada nos elementos da extremidade compõe a zona de falha (9 e 49), fato que pode estar relacionado com a diferença de rigidez entre a zona de falha e o *sideburden*. Este resultado corrobora os resultados de plastificação apresentados nas Figuras 4.66 – 4.68 no qual apresenta as posições onde se iniciou o processo de plastificação da zona de falha.

4.2.3.
Comparação entre as zonas de falha de 80° e 60°

Os resultados apresentados a seguir se referem às análises comparativas realizadas para os modelos de plasticidade que contém as zonas de falhas com inclinação de 80 e 60° em relação à horizontal.

As comparações entre as tensões principais, invariantes de tensão, trajetórias de tensão e critério de plastificação, que foram apresentadas anteriormente, não podem ser realizadas diretamente, uma vez que os valores apresentados nas curvas se referem à aferição das tensões em locais distintos do modelo. Isto se deve pelo fato da zona de falha de 80º ter atingido um maior valor de deformação plástica na porção referente à quarta camada da zona de falha. Por outro lado, a plastificação no modelo de 60º ocorreu na porção referente à penúltima (sexta) camada do reservatório. Portanto, a comparação direta de valores deve ser cautelosa uma vez que os resultados não se referem necessariamente aos mesmos pontos, sendo assim, optou-se por não compará-las. Vale relembrar que os pontos de aferição de dados foram escolhidos baseados na localização do elemento onde ocorreu o início e maior valor de deformação plástica.

Por outro lado, os deslocamentos referentes à expansão do reservatório e deslocamento vertical do leito marinho podem ser comparados diretamente, uma vez que os pontos estão na mesma posição nos dois modelos estudados. A seguir estão apresentadas as curvas comparativas de deslocamentos verticais do reservatório e do leito marinho, respectivamente (Figuras 4.94 e 4.95).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

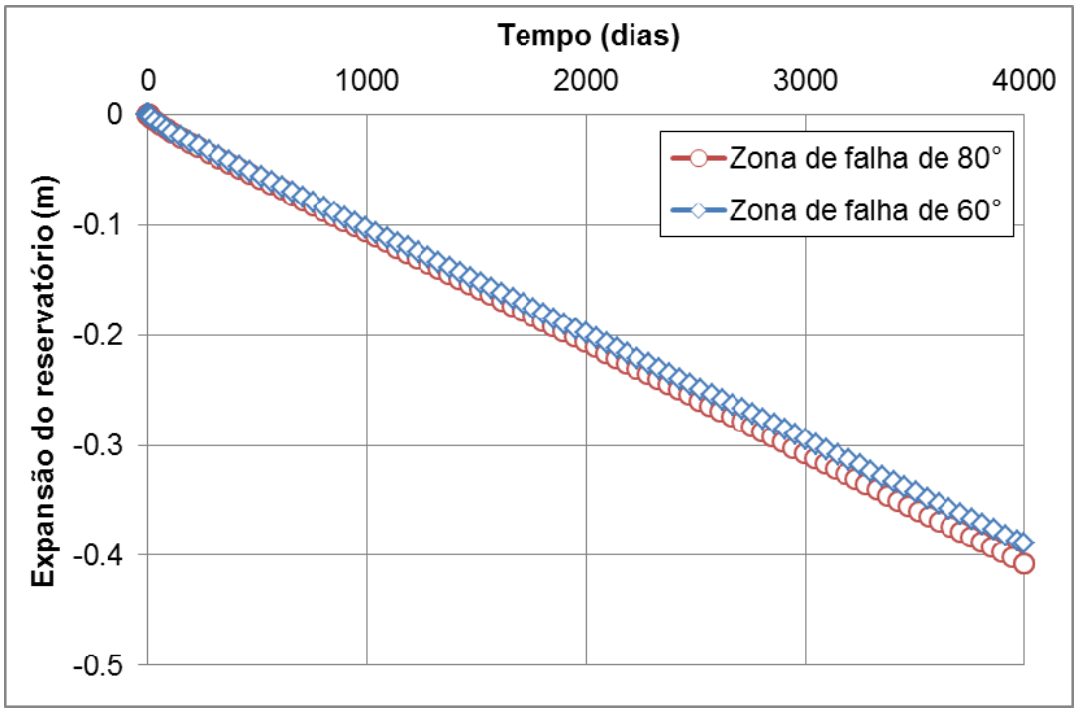

Figura 4.94 – Comparação da expansão vertical do reservatório para os modelos numéricos de zona de falha de 80º e 60°

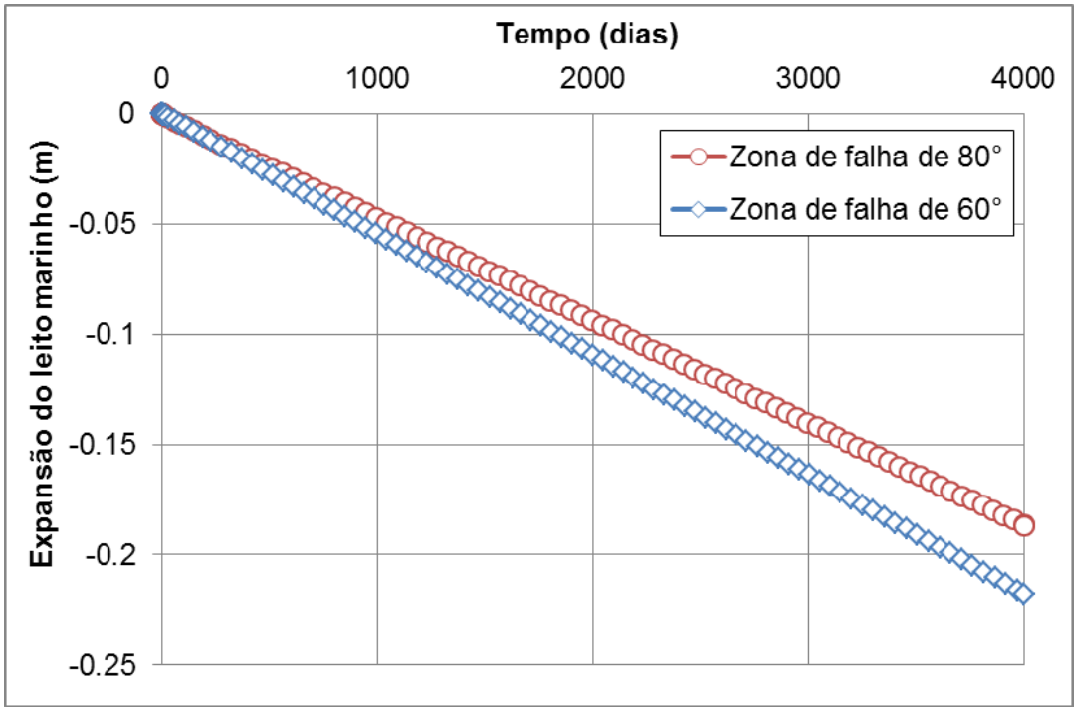

Figura 4.95 – Comparação do deslocamento vertical do leito marinho para os modelos numéricos de zona de falha de 80º e 60°

Pelas análises dos deslocamentos verticais do reservatório, pode ser observado que os valores não apresentam uma diferença significativa. Em

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

termos de magnitude, o processo contínuo de injeção por 4000 dias resultou em um deslocamento vertical do reservatório de praticamente 40 centímetros. Como esperado o deslocamento vertical do leito marinho apresentou-se menor em relação ao deslocamento vertical do reservatório uma vez que existe a necessidade de deslocamento do *overburden*. A magnitude do deslocamento vertical do leito marinho foi menor que 20 centímetros para modelo de 80° e maior do que 20 centímetros para o modelo de 60°. Sendo assim, a inclinação da falha não teve influência na magnitude dos deslocamentos verticais do reservatório. No entanto, os deslocamentos verticais do leito marinho se apresentaram diferentes para os dois modelos com zonas de falha.

Surpreendentemente, os resultados obtidos com relação ao início e propagação do processo de plastificação do material de ambas as zonas de falha foi similar. O início da ruptura da zona de falha de 80° ocorreu para 1963 dias, já para o modelo com zona de falha de 60°, a ruptura se iniciou após 2163 dias de injeção. De posse destes resultados, buscou-se confrontá-los com os resultados provenientes do acoplamento total (poroelasticidade), o qual fornece a resposta que o acoplamento parcial, empregado nesta dissertação, visa obter na simulação hidromecânica. Além do acoplamento total, realizou-se também uma simulação de fluxo pura utilizando apenas o simulador de fluxo Eclipse. Os aspectos teórico-numéricos do acoplamento total podem ser encontrados nos trabalhos de Biot (1941), Detournay & Cheng (1993) e Zienkiewicz et. al (1999).

Para tanto, fez-se uma análise temporal da pressão de poros para os dois modelos de zona de falha considerando as três metodologias (total e parcialmente acoplada e simulação de fluxo pura). Primeiramente, serão apresentados os resultados da simulação totalmente acoplada. Vale salientar que para a realização da simulação poroelástica, houve a necessidade de confecção de novos modelos que seguissem as mesmas diretrizes dos modelos apresentado no Capítulo 3. O ponto de aferição da pressão de poros está apresentado nas Figuras 4.96. As coordenadas x, y e z deste ponto são respectivamente: 6, 6 e 7. Cabe ser ressaltado que a zona de falha, apresentada na Figura 4.96, foi colocada vertical apenas como uma representação idealizada das zonas de 80° e 60°.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

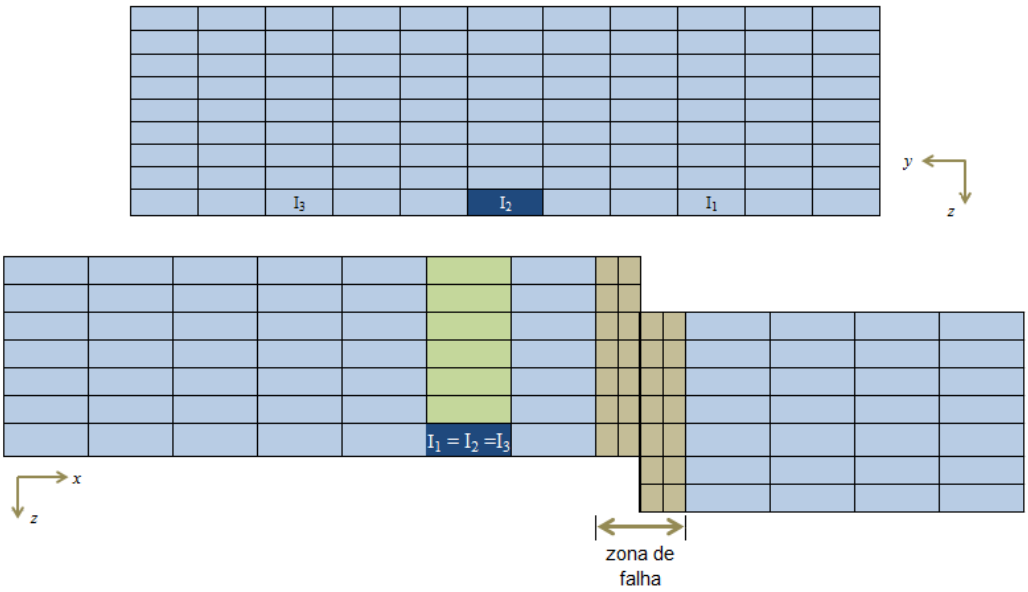

Figura 4.96 – Elemento/célula de aferição, destacado em azul escuro, da pressão de poros para os modelos de zonas de falha de 80° e 60° para as três metodologias analisadas

A Figura 4.97 apresenta a variação temporal da pressão de poros para os dois modelos com zona de falha considerando o acoplamento total entre fluxo-tensões.

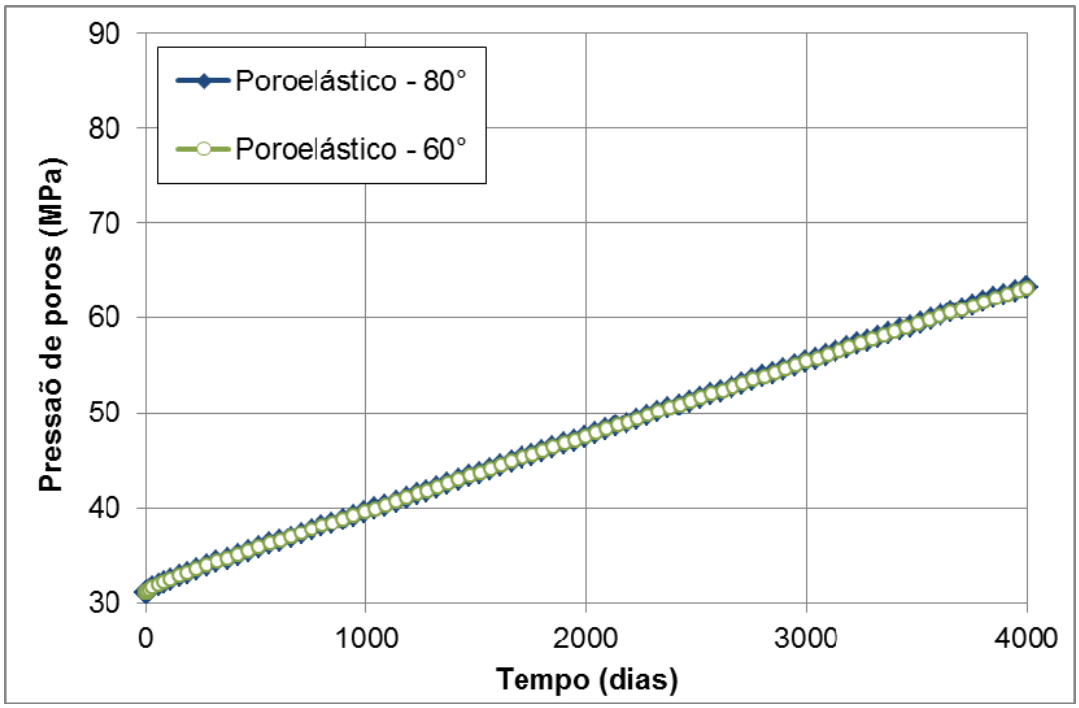

Figura 4.97 – Pressão de poros em função do tempo de injeção considerando o acoplamento total entre fluxo-tensões para os modelos com zona de falha de 80° e 60°

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

Para os modelos em que foi considerado o acoplamento total, verificou-se que o início do processo de plastificação do material da zona de falha de 80° ocorreu após 2137 dias de injeção de água. Já para a zona de falha de 60°, o processo de reativação ocorreu após 2143 dias de injeção. Portanto, o comportamento foi similar no sentido de que o início do processo de plastificação para os dois modelos de zona de falha ocorrem em intervalos de tempo muito próximos. Isso é corroborado pelas curvas apresentadas na Figura 4.97, onde a evolução da pressão de poros com o período de injeção não apresenta diferença com respeito às diferentes inclinações das zonas de falha.

As mesmas curvas foram confeccionadas considerando o acoplamento parcialmente acoplado (*two-way*), conforme apresentado na Figura 4.98, e para a simulação de fluxo pura (Eclipse), apresentada na Figura 4.99.

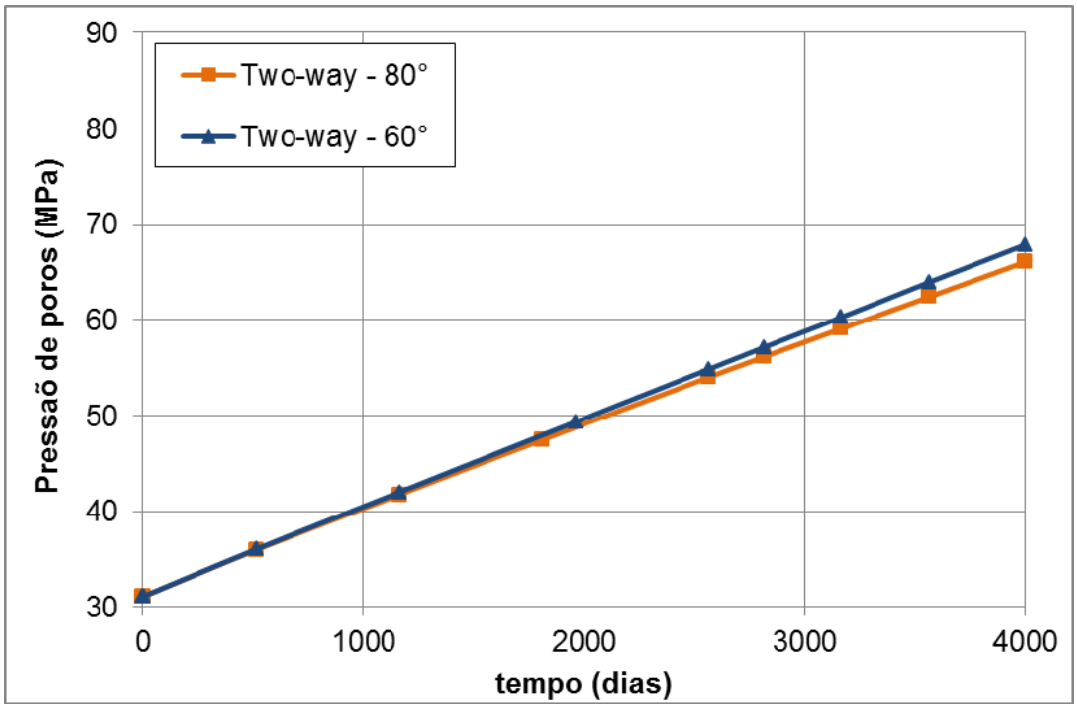

Figura 4.98 – Pressão de poros em função do tempo de injeção considerando o acoplamento parcial (*two-way*) para os modelos com zona de falha de 80° e 60°

Pode ser observado que evolução da pressão de poros é muito similar em ambos os modelos de zona de falha quando se considera o acoplamento parcial, o que justifica o fato do início do processo de plastificação ocorrer para intervalos de tempo próximos. Na simulação de fluxo pura, pode ser percebido que a inclinação da zona de falha não tem influência nenhuma no processo de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

desenvolvimento de pressão de poros, uma vez que as curvas apresentam-se sobrepostas.

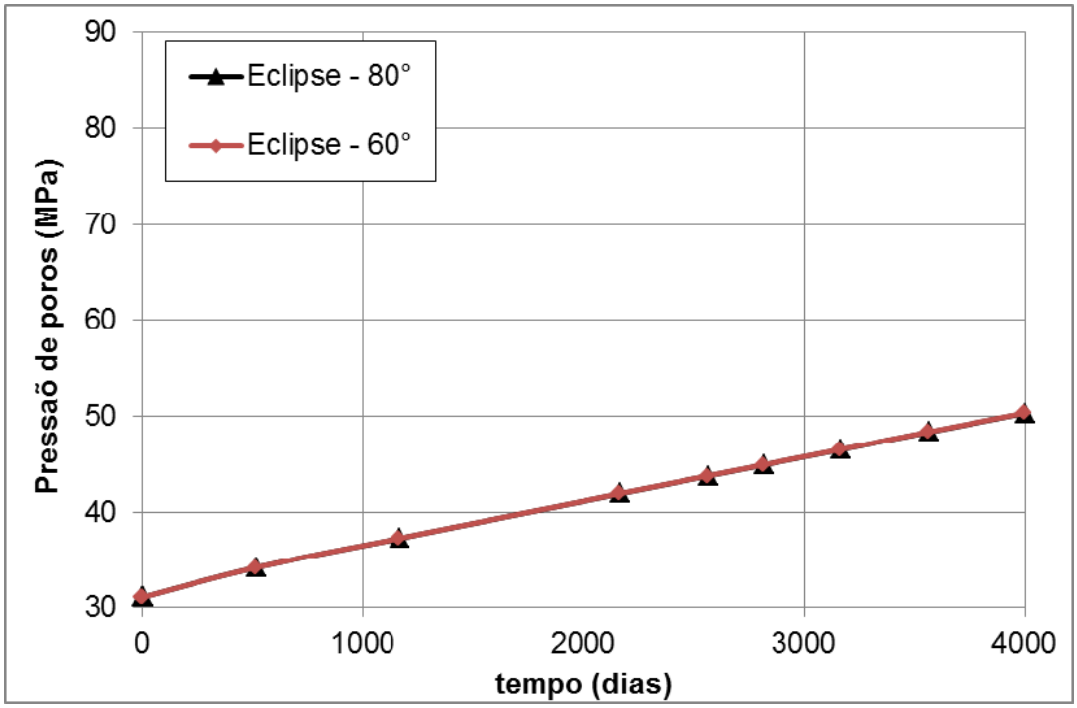

Figura 4.99 – Pressão de poros em função do tempo de injeção considerando a simulação de fluxo pura para os modelos com zona de falha de 80° e 60°

A Figura 4.100 ilustra a comparação entre as três metodologias analisadas para ambos os modelos de zona de falha.

Pela comparação das curvas apresentadas na Figura 4.100, pode ser concluído que os resultados do acoplamento parcial apresentam-se muito próximos dos resultados do acoplamento total, enfatizando assim, a robustez da metodologia desenvolvida por Fontoura & Inoue (2009). A diferença entre os acoplamentos total e parcial pode ser atribuída ao critério de convergência empregado (Capítulo 3). Esta diferença pode ainda ser diminuída com a adoção de uma tolerância menor a cada *timestep*.

O Quadro 4.1 apresenta uma comparação entre os erros relativos de cada metodologia em relação aos resultados do acoplamento total. Cabe salientar que a pressão de poros média apresentada no Quadro 4.1 se refere a uma média efetuada em todos os elementos/células que compõe o reservatório e a zona de falha.

Além disso, foi observado que a solução poroelástica também forneceu resultados de início de plastificação coerentes com os resultados discutidos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

anteriormente nos subitens de cada zona de falha, isto é, ambas as zonas de falha apresentaram plastificação para intervalos de tempo próximos.

O que pode ser concluído a respeito disto é que pontualmente, na região da zona de falha correspondente ao reservatório, a inclinação da zona de falha não apresenta influência significativa, uma vez que a escala do reservatório é menor frente ao modelo completo, onde é considerado as rochas adjacentes. Este fato é corroborado pelos resultados da simulação de fluxo pura, apresentado na Figura 4.99. Portanto, embora os resultados de início de plastificação apresentem pouca diferença, podemos considerá-los, de maneira geral, como sendo no entorno de 2000 dias de injeção. Em termos de pressão de poros necessária para ruptura, o início da plastificação para os modelos em que é considerado o acoplamento hidromecânico ocorreu para um valor médio de pressão de poros igual a 48.5 MPa, conforme apresentado no Quadro 4.2. Cabe lembrar que o ponto de aferição a pressão de poros está apresentado na Figura 4.96.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

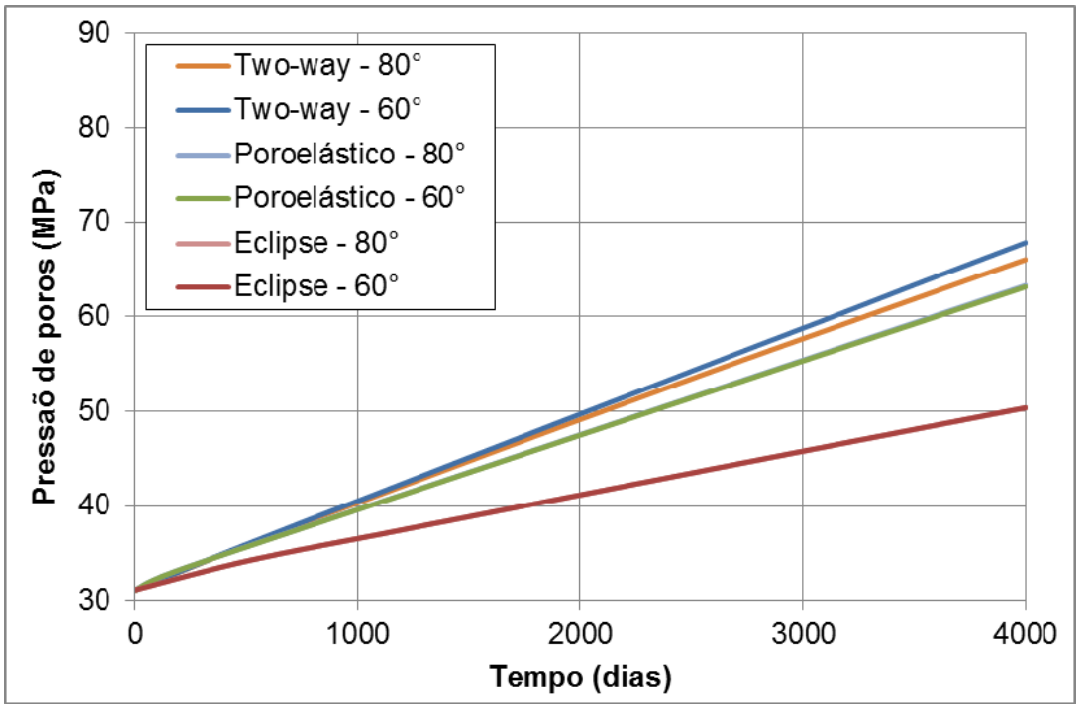

Figura 4.100 – Pressão de poros em função do tempo de injeção considerando as três metodologias comparadas para os modelos com zona de falha de 80° e 60°

Avaliou-se também o campo de deslocamentos resultantes do processo de injeção de água para os dois modelos de zona de falha. A seção apresentada nas Figuras 4.101 – 4.104 se refere a um plano longitudinal (na direção x) ao

modelo que passa pelo poço injetor 2, destacado na Figura 4.96. Vale ressaltar que serão apresentados apenas os resultados do acoplamento parcial, uma vez que já foi comprovada a sua acurácia em relação à solução do acoplamento total.

Quadro 4.1 – Comparação entre a pressão de poros média para nos modelos de zona de falha para as diferentes metodologias empregadas

Modelo	Metodologia	Tempo	Pressão de poros média (MPa)	Erro relativo (%)
Zona de falha de 80°	Acoplamento total	inicial	31.11	-
		final	63.30	0
	Acoplamento parcial	inicial	31.11	-
		final	66.05	-4.34
	Simulação de fluxo pura	inicial	31.11	-
		final	50.34	20.47
Zona de falha de 60°	Acoplamento total	inicial	31.11	-
		final	63.16	0
	Acoplamento parcial	inicial	31.11	-
		final	67.84	-7.17
	Simulação de fluxo pura	inicial	31.11	-
		final	50.37	20.43

Quadro 4.2 – Comparação entre a pressão de poros nos modelos de zona de falha para as diferentes metodologias empregadas

Modelo	Metodologia	Início da plastificação	Pressão de poros (MPa)
Zona de falha de 80°	Acoplamento total	2137 dias	48.6
	Acoplamento parcial	1963 dias	47.5
Zona de falha de 60°	Acoplamento total	2143 dias	48.6
	Acoplamento parcial	2163 dias	49.4
Pressão de poros média no início da plastificação			48.5

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

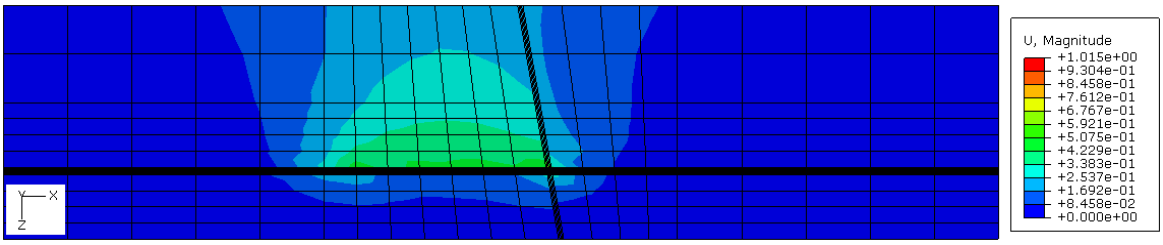

Figura 4.101 – Campo de deslocamentos resultantes na seção longitudinal intermediária do modelo de zona de falha de 80° após 4000 dias de injeção

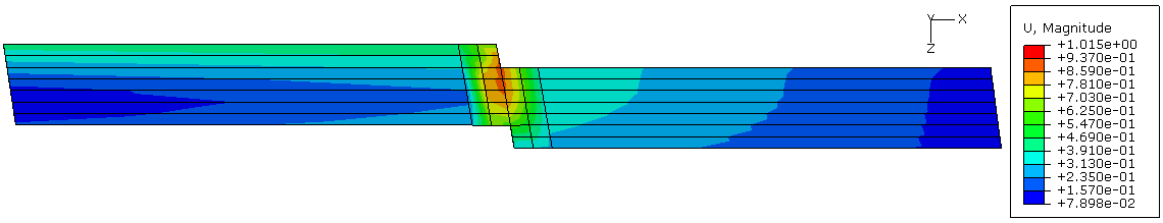

Figura 4.102 – Detalhe do campo de deslocamentos resultantes na seção longitudinal intermediária na região da zona de falha do modelo de 80° após 4000 dias de injeção

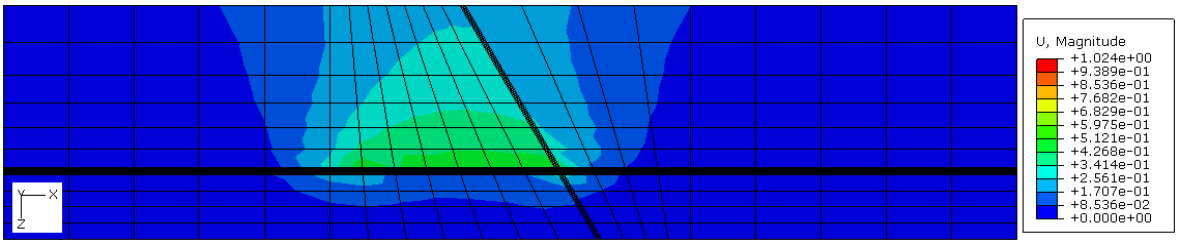

Figura 4.103 – Campo de deslocamentos resultantes na seção longitudinal intermediária do modelo de zona de falha de 60° após 4000 dias de injeção

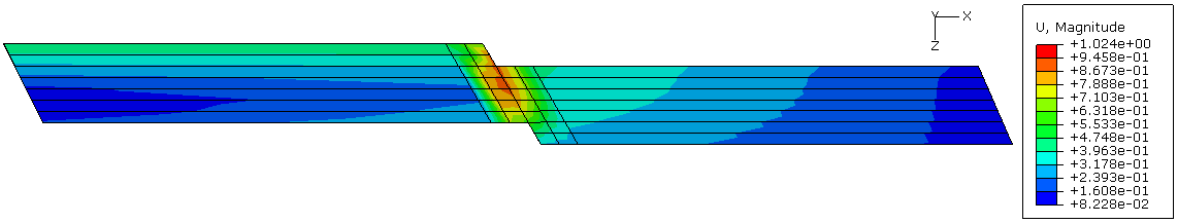

Figura 4.104 – Detalhe do campo de deslocamentos resultantes na seção longitudinal intermediária na região da zona de falha do modelo de 60° após 4000 dias de injeção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

Pela análise das Figuras 4.102 e 4.104 fica claro que, na escala do reservatório, o campo de deslocamentos resultantes não apresenta diferença significativa, salientando novamente os resultados obtidos em termos da ruptura do material da zona de falha ser praticamente independente da inclinação da zona de falha. No entanto, quando se compara as Figuras 4.101 e 4.103 fica evidente que o campo de deslocamentos no *overburden* apresenta diferença. No modelo de zona de falha de 60°, pode ser observada uma maior concentração de deslocamentos na região marginal a falha, fato que não ocorre de forma tão pronunciada no modelo de 80°.

De forma a avaliar quantitativamente os deslocamentos no *overburden*, adotou-se um trajetória ortogonal ao plano apresentado nas Figuras 4.101 – 4.104, conforme apresentado na Figura 4.105.

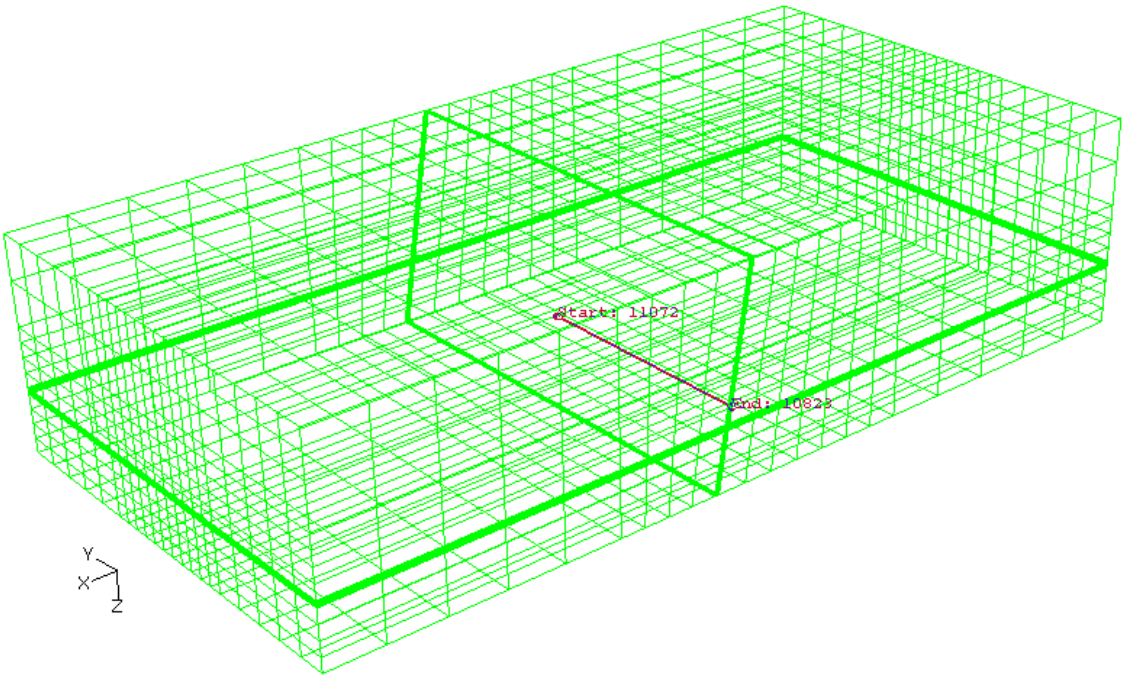

Figura 4.105 – Trajetória na direção y para aferição dos valores de deslocamento resultante nos modelos de zona de falha de 80° e 60°

As curvas referentes à trajetória de deslocamentos apresentada na Figura 4.105 estão apresentadas na Figura 4.106.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

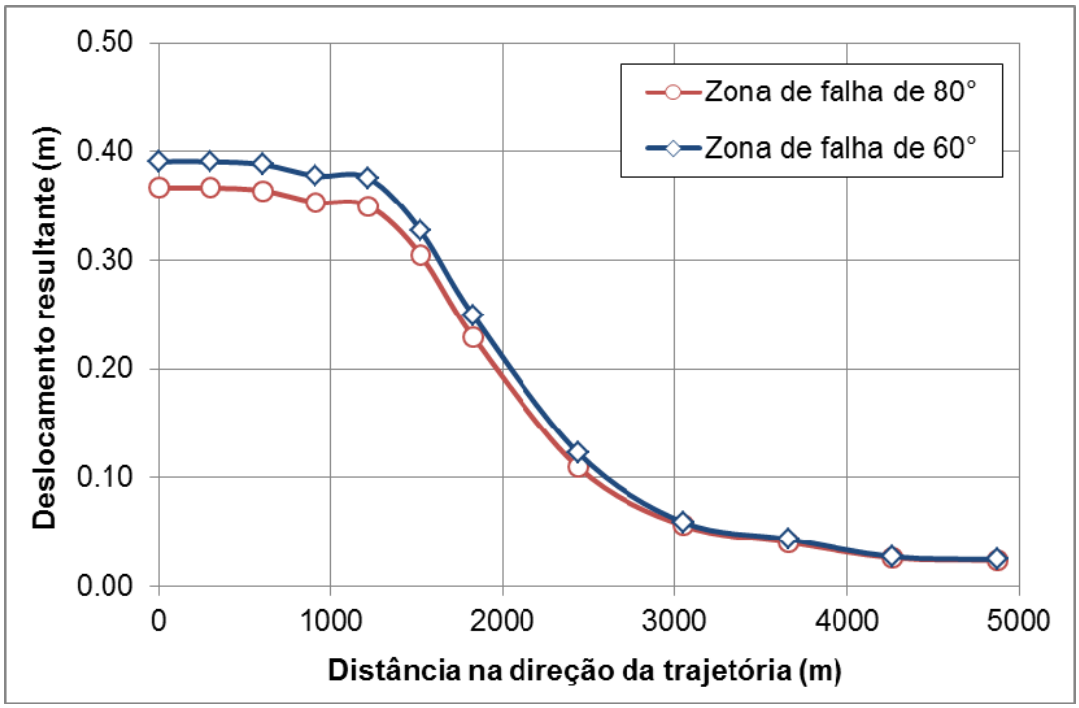

Figura 4.106 – Comparação entre o deslocamento resultante para os modelos de zona de falha de 80° e 60°

Pela análise da Figura 4.106, pode ser observado que o deslocamento resultante na face intermediária do modelo (plano longitudinal que passa pelo poço injetor 2) é maior no modelo com zona de falha de 60° quando comparado com o modelo com zona de falha de 80°. Além disso, pode ser observado, também, que a diferença entre os deslocamentos resultantes diminui ao passo que a trajetória se aproxima do *sideburden*, atingindo um valor próximo a zero.

Com esta análise fica evidenciado que a inclinação da zona da falha apresenta influência quando a análise é realizada em uma escala global, isto é, atentando não somente para o reservatório, e sim para as rochas adjacentes.

Em relação ao tempo de simulação das análises parcialmente acopladas, ambos os modelos com zona de falha necessitaram de aproximadamente 12 horas para realizar a simulação hidromecânica considerando plasticidade.

A influência da inclinação da zona de falha se mostrou importante no processo de plastificação quando se analisa o problema de uma forma global, isto é, considerando sua influência nas rochas adjacentes. Em escala de reservatório, a inclinação da zona de falha não se mostrou influente, uma vez que o início do processo de reativação teve início praticamente nos mesmos intervalos de tempo (2000 dias) e para um mesmo nível de aumento de pressão de poros (48.5 MPa).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA

Naturalmente, busca-se fazer uma analogia com as análises realizadas com o modelo de interações de contato, onde o raciocínio físico apresenta-se de forma mais direta. No entanto, no modelo de plasticidade, a ruptura não é governada pela tensão cisalhante e sim por uma combinação das tensões principais. Além disso, a ruptura no caso da utilização do modelo de Mohr-Coulomb está relacionada ao fato do critério de ruptura ter sido atingido, pelo elemento finito, devido à variação do estado de tensões. Já no caso do modelo com descontinuidade, a ruptura ocorre pelo aumento da tensão cisalhante atuante frente à tensão cisalhante resistente. Portanto, deve-se ter em mente que os modelos utilizados para estudar o problema de falhas ou zonas de falha em reservatórios podem apresentar mecanismos de ruptura diferentes.

De maneira global, para o caso onde o objetivo é determinar as máximas vazões de injeção de poços bem como sua configuração espacial visando à manutenção da produção do campo, pode-se afirmar que, nos casos estudados neste trabalho, a aplicação de uma vazão de 1100 m^3/dia resultará no início do processo de reativação para os modelos numéricos podendo comprometer, assim, a estanqueidade do reservatório. Além destes, outros problemas podem surgir como consequência da reativação, conforme já discutido no Capítulo 2, como a indução de sismos e o escape de hidrocarbonetos para o mar.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012283/CA