

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

Realizaram-se neste trabalho modelagens computacionais mediante o uso de um programa comercial de elementos finitos, em que foi proposto um comportamento geomecânico em poços de petróleo em zonas de sal. Analisaram-se os deslocamentos, deformações e tensões na parede do poço e em sua vizinhança para diversos pesos de fluido de perfuração utilizando o método dos elementos finitos. Foram realizadas simulações numéricas por meio da análise de deformação plana e da análise axissimétrica, que puderam prever o comportamento elástico e, principalmente, o de fluência (“*creep*”) do sal.

Na análise de deformação plana, o Capítulo 4 apresentou o comportamento mecânico do sal, em que foi simulada numericamente uma perfuração de um poço de petróleo a partir de uma seção horizontal a 6000m de profundidade abaixo do nível do mar (2000m lâmina de água, 2000m outros estratos e 2000m sal) conforme representação esquemática da Figura 4-1.

Já na análise axissimétrica (abordada no Capítulo 5), a modelagem numérica consistiu em estudar o comportamento do estrato salino desde uma profundidade de 6000 até 6020m (Figura 5-1). Esta análise foi dividida em 10 estágios de escavação, em que pôde ser analisada também a influência da perfuração no comportamento do sal.

Avaliando os deslocamentos e as deformações radiais após a perfuração do poço em sal, observou-se que quando se fez a modelagem com maiores pesos de fluido de perfuração os deslocamentos e as deformações na parede do poço foram menores tanto para a análise de deformação plana quanto para a análise axissimétrica. Isto acontece porque para maiores pesos de fluido de perfuração ocorreu uma menor diferença entre as tensões horizontais “*in situ*” e as pressões provocadas pelo peso do fluido de perfuração, que ocasionaram menores deslocamentos e deformações na parede do poço.

Ainda com relação aos deslocamentos e às deformações, pôde-se constatar em ambas as análises que os deslocamentos e deformações gerados pela relação constitutiva elástica do sal foram desprezíveis quando comparados com os deslocamentos causados pela fluência para períodos superiores a um dia. Vale destacar também que os deslocamentos e as deformações foram maiores nas primeiras horas após a perfuração do poço quando confrontados com os resultados das demais horas.

Pôde-se concluir ainda que os valores de deslocamentos e deformações por fluência dependem diretamente da lei de fluência e dos parâmetros adotados na modelagem para as duas análises realizadas nesta dissertação (deformação plana e axissimétrica). Uma alteração nos valores das constantes empíricas, por exemplo, resultaria em diferentes valores de deformações. Sendo assim, nos casos práticos, os parâmetros elásticos e as constantes empíricas de fluência têm de ser bem definidos, pois influenciam diretamente os resultados, sejam superestimando ou subestimando os valores de deslocamentos e deformações na parede do poço. Nesta dissertação, os parâmetros elásticos foram extraídos de ensaios realizados em amostras de sal da mineração de Taquari Vassouras (item 4.4.1). E as constantes empíricas da lei de fluência, a partir dos parâmetros determinados para o projeto de Salt Vault (item 4.4.2).

Foi feita também uma avaliação da vizinhança do poço tanto na análise de deformação plana quanto na análise axissimétrica e percebeu-se que os deslocamentos na parede do poço foram maiores e decresceram à medida que se afastam dele, independentemente do peso de fluido de perfuração utilizado na simulação. Vale destacar que os deslocamentos significativos acontecem em geral somente até um afastamento de cinco vezes o raio do poço. Isto acontece porque na parede do poço ocorre uma maior perturbação nas tensões que estavam constantes antes de escavação. Quando o ponto de análise está mais afastado do poço, ocorrem menores perturbações de tensões, que provocam menores deslocamentos por fluência. Isto significa que à medida que são analisados pontos mais afastados do poço as diferenças de tensões são menores, o que geram pequenos deslocamentos horizontais.

Com relação às análises das taxas de deformações ou velocidade de deformação na parede do poço, pôde-se observar que a taxa de deformação decresceu com o tempo, principalmente nos primeiros dias. Isso foi apresentado na análise de deformação plana e pode ser explicado em virtude de a fluência estar ligada diretamente com as diferenças de tensões, que foram maiores no momento da escavação. Com o tempo, as diferenças entre as tensões diminuem

e a velocidade de deformação também tende a cair, justamente o que pode ser observado nas curvas do gráfico das figuras 4.21 e 4.22. Verifica-se também nesta última figura que a velocidade de deformação para um determinado tempo é maior quanto menor for o peso do fluido de perfuração. Isto pode ser explicado pela maior diferença de tensões quando se utiliza um menor peso de fluido de perfuração. Esta maior diferença de tensões desviadoras, ocasionadas pelas tensões “*in situ*” e as pressões geradas na parede do poço pelo fluido de perfuração, provoca maiores taxas de deformações radiais. Passado um período de tempo, as tensões entram em equilíbrio e as diferenças entre as curvas de taxas de deformações atingem um valor mínimo. Outro ponto importante é que os valores e as formas das curvas de taxa de deformação também estão ligados diretamente aos parâmetros e à lei de fluência utilizados.

Foi feita uma avaliação das tensões radiais e tangenciais na parede de poço e em sua vizinhança. Constatou-se na análise de deformação plana que grande parte da redistribuição de tensões causada pela fluência aconteceu nos primeiros instantes após a escavação até a primeira hora. Depois desta hora as tensões ainda se alteraram lentamente até o primeiro dia e permaneceram praticamente constantes até os 30 dias, que foi o tempo final da análise deste trabalho. Sendo assim, nos instantes iniciais, principalmente no primeiro dia após a escavação, as grandes redistribuições de tensões influenciaram diretamente a deformação por fluência do sal.

Outra constatação em ambas as análises é que quanto menor o fluido de perfuração utilizado, maior a diferença entre as tensões (radial e tangencial) próximas do poço quando comparada com a tensão inicial antes da perfuração. Isso pode ser explicado pelo maior relaxamento de tensões para os menores pesos de fluidos que influenciaram diretamente uma maior fluência, pois, neste caso, as tensões “*in situ*” estavam mais distantes das pressões geradas pelo peso de fluido de perfuração.

Analisando as variações de tensões radiais e tangenciais na parede do poço com o tempo após a simulação da perfuração na análise de deformação plana (Figura 4-31), pôde-se observar que a grande variação de tensões ocorreu logo após a escavação e se equilibraram com os dias. Sendo assim, a pior situação para a estabilidade do poço é justamente nos instantes subseqüentes ao da escavação do poço, independente do peso do fluido de perfuração utilizado. Outro ponto importante a ser comentado é que a fluência continuou acontecendo com uma diferença constante entre as tensões, mesma condição imposta num ensaio de fluência.

Compararam-se os resultados da Teoria de Endurecimento por Tempo Transcorrido e a Teoria de Endurecimento por deformação tanto para análise de deformação plana quanto para a axissimétrica.

No estudo de caso da análise de deformação plana (Capítulo 4), uma vez feita a escavação, a variação do estado de tensões na rocha salina ocorreu lentamente até atingir o equilíbrio, ou seja, as tensões radiais e tangenciais se alteraram gradualmente ao longo do tempo e do afastamento da parede do poço. Sendo assim, como não ocorreram variações bruscas de tensões no tempo, as trajetórias das curvas “*time hardening*” e “*strain hardening*” foram coincidentes para este caso específico. Essas duas teorias de endurecimento foram abordadas no item 3.4. Mais especificamente na Figura 3.12, em que é possível visualizar a diferença entre as duas trajetórias a partir de uma variação brusca do estado de tensões. Daí a explicação das pequenas e desprezíveis diferenças de deslocamentos, deformações e tensões entre as teorias “*time hardening*” e “*strain hardening*” que puderam ser observadas em todos os gráficos do item 4.8 desta dissertação, ainda porque os parâmetros das duas formulações foram os mesmos.

Por outro lado, na modelagem axissimétrica (Capítulo 5), foi possível identificar a diferença entre as teorias de endurecimento por tempo transcorrido e a teoria de endurecimento por deformação porque esta simulação leva em consideração a seqüência de escavação. O andamento da perfuração do poço em etapas provocou uma variação brusca das tensões no corpo salino, que motivou a diferença entre as duas curvas da Figura 5-23. Segundo a literatura, discutida no item 3.4, a mudança repentina do estado de tensões provoca diferentes comportamentos dependendo da teoria adotada. Para este estudo de caso axissimétrico, tanto os deslocamentos quanto as deformações calculadas pela teoria de endurecimento por deformação foram maiores principalmente nos primeiros instantes após a escavação quando comparadas com a teoria de endurecimento por tempo transcorrido. Por exemplo, o formato da Figura 5-23 é similar ao das curvas apresentadas na literatura (Figura 3.12). Constatou-se ainda que, nas primeiras horas, as taxas de deformações também foram maiores para a teoria baseada nas deformações.

Ainda na análise axissimétrica, a maior redistribuição de tensões logo após a escavação para a versão “*strain hardening*” explica as maiores deformações e taxas de deformações iniciais observadas para esta teoria. Isto porque as redistribuições de tensões, nos primeiros instantes, acontecem mais

rapidamente na teoria de endurecimento por deformação quando se compara com a teoria de endurecimento por tempo transcorrido.

Depois de todas as análises gráficas comentadas e discutidas conclui-se que no comportamento de fluência do sal existe uma forte interdependência do processo de redistribuição e relaxação do estado de tensões com as deformações, pois a fluência está ligada diretamente às tensões desviatórias.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Uma recomendação para um trabalho futuro seria primeiramente a obtenção dos parâmetros elásticos e a calibração das constantes empíricas de fluência a partir de uma amostra de sal extraída nas condições reais de campo. Estes dados seriam o ponto de partida para realização de novas modelagens numéricas para obtenção do comportamento do sal.

Outra sugestão seria a análise do comportamento do estrato salino a partir da realização de simulações numéricas no Abaqus, em 3D, em situações reais de campo, como a perfuração de um poço inclinado em um meio anisotrópico. Além disso, a utilização de outras leis constitutivas de fluência também pode ser modelada neste programa de elementos finitos.