

6

Conclusões

O desenvolvimento apresentado nos capítulos anteriores focou na ampliação do conhecimento sobre as rochas evaporíticas, em especial da anidrita, da halita, da carnalita e da taquidrita, e a realização de análises paramétricas através de simulações numéricas pelo método dos elementos finitos de poços de petróleo em zonas de sal. O trabalho reportado nesta tese é resumido neste capítulo e algumas conclusões são expostas. Sugestões para futuros desenvolvimentos também são apresentadas.

6.1.

Considerações Gerais

Este trabalho teve como objetivo ampliar o conhecimento sobre as rochas evaporíticas e o desenvolvimento de metodologias de simulação numérica de poços de petróleo em zonas de sal de modo a auxiliar nas estratégias de perfuração, construção e operação de poços de petróleo em zonas de sal.

Compreende-se do exposto no trabalho, que são necessários estudos que minimizem ou eliminem os riscos de acidentes na construção e ao longo da vida útil de poços em zonas de sal, já que sua ocorrência tem interesses sociais, econômicos e ambientais. Ademais, há carência de estudos nesta área de conhecimento, principalmente com relação às propriedades geomecânicas das rochas evaporíticas como carnalita e taquidrita e até mesmo da halita, quando submetidas a diferentes estados de tensões e temperaturas, assim como de metodologias para a modelagem numérica de poços através de camadas de sal ou próximos à estruturas salíferas.

Esta pesquisa demonstrou que o procedimento desenvolvido nessa tese para testemunhagem, transporte, armazenamento, assim como o preparo de corpos de prova de rochas evaporíticas, como anidrita, halita, carnalita e taquidrita é eficaz.

A melhoria nos equipamentos e procedimentos de realização dos ensaios triaxiais de fluência consistiram em aprimorar o controle de temperatura no laboratório onde estão instaladas as unidades de ensaio, replicar a unidade

piloto para mais cinco unidades triaxiais de fluência e em melhorias nas rotinas do programa do sistema de aquisição de sinais, de forma a poder realizar os ensaios e encerrá-los independentemente. A instalação de *no-breaks* é importante para fornecer uma fonte de energia alternativa no momento de eventuais cortes no fornecimento elétrico até que um motor estacionário acoplado a um gerador elétrico entrasse em funcionamento.

6.2. Conclusões e sugestões

Para os ensaios triaxiais de fluência realizados foi possível detectar a passagem de um mecanismo de fluência para outro nas seguintes condições:

1. halita na temperatura de 86 °C;
2. carnalita na temperatura de 130 °C;
3. taquidrita na temperatura de 86 °C.

Nas mesmas condições de ensaio triaxial de fluência, a halita testemunhada na UO-SEAL demonstrou comportamento intermediário entre as halitas testemunhadas na região Big Hill e West Hackberry (EUA), que são consideradas rochas de baixa resistência, por apresentarem alta taxa de deformação. A comparação, nas mesmas condições de ensaio triaxial de fluência, da halita testemunhada do campo de Mad Dog situado no Golfo do México com a halita testemunhada na UO-SEAL, mostra que a segunda apresenta taxa de deformação em regime permanente de fluência 3,3 vezes maior que a primeira. Portanto, os riscos associados à construção de poços no Brasil é maior do que no Golfo do México.

O limiar da mudança do mecanismo de deformação dominante obtido nos ensaios laboratoriais, pouco difere do par isolado na mina de TV, com a taxa de deformação por fluência de referência em regime permanente corrigida pelo fator de ativação térmica. Em princípio a semelhança entre esses valores é uma indicação que a correção pela aplicação do termo exponencial que trata a ativação térmica molecular do sal é válida para os intervalos de temperatura testados, portanto, a equação constitutiva compilada a partir dos ensaios laboratoriais pode ser adotada na previsão do comportamento de poços em zonas de sal.

Quanto às tensões de confinamento nos ensaios de triaxiais de fluência em halita, verificou-se um significativo efeito não linear da mesma nos resultados.

Com o equipamento e a metodologia desenvolvidos para a realização de ensaios triaxiais em cilindros vazados, foi possível realizar ensaios tanto de fluência quanto de fraturamento hidráulico no laboratório, simulando-se poço em rochas salinas em escala reduzida. Comparando-se os valores da relação tensão de ruptura/tensão confinante (TR/TC), obtidos nos ensaios de campo com os obtidos no laboratório, verificou-se a tendência da aproximação dos resultados com o aumento da tensão de confinamento. Todavia, com estes ensaios foi possível confirmar a capacidade das rochas salinas em suportarem pressões acima do gradiente de soterramento, resultados que favorecem a aplicação de pesos de fluidos adequados ao comportamento de fluência das rochas evaporíticas durante a perfuração de poços em condições extremas de estado de tensões e temperaturas.

A taxa de deformação por fluência em regime permanente obtida por simulação numérica reproduz fielmente os resultados experimentais dos ensaios triaxiais de fluência, com diferença relativa inferior a 1%, validando assim a metodologia utilizada para determinação dos parâmetros de fluência da equação constitutiva de fluência de mecanismo duplo de deformação e a sua aplicação e em simulações numéricas nos estudo de estabilidade e integridade de poços em sal.

O simulador ANVEC3D foi validado através do ANVEC2D, o qual foi aplicado, com os parâmetros de fluência obtidos neste trabalho, na validação do mesmo por meio da comparação com as medidas de convergência realizadas na galeria experimental D1 da galeria C1D1 na mina de TV (COSTA, 1984). Os resultados obtidos por simulação numérica 2D e 3D mostram excelente concordância com fechamento medido na galeria experimental.

Na avaliação dos diversos aspectos que influenciam a estabilidade de poço perfurado através de camadas de sal e a integridade estrutural de poço revestido foi essencial a geração de modelos numéricos para as simulações através das interfaces gráficas concebidas com módulos parametrizados específicos para a geração paramétrica dos modelos numéricos (Templates) avaliados.

Perfurar espessas camadas de sal é preferível a perfurar camadas delgadas de sal em termos de estabilidade do poço (fechamento), quando submetidas às mesmas condições de soterramento, pois devido à elevada condutividade térmica do sal, quanto maior a sua espessura, menor será o gradiente de temperatura e como consequência maior a deformação por fluência.

A taxa de fechamento do poço devido à fluência é linearmente proporcional ao aumento no diâmetro do poço, mas o aumento no peso de fluido reduz a taxa de fechamento do poço não linearmente.

A utilização do peso de fluido adequado ao comportamento de fluência do poço desde o início da perfuração da camada de sal é benéfico, “freinando” seu comportamento e assim reduzindo efeitos inerciais desde o princípio. O aumento do peso linearmente ao longo da profundidade, até o peso adequado, tem efeito similar, mas atenção deve ser dada às camadas mais rasas e de maior deformação por fluência.

Em cenário de possíveis perdas na base do sal, em que o custo de combate é alto e/ou elevado risco de prisão irreversível da coluna de perfuração, levando ao desvio de poço, a perfuração da camada de sal em duas etapas seria adequada. A perfuração da primeira camada seria com um peso de fluido mais alto, instalando-se nesse primeiro trecho uma fase de revestimento e a seguir perfurando-se a segunda fase com um peso de fluido mais leve, compatível com a taxa de fechamento do poço, o qual não ocasionasse problemas operacionais (prisões e perdas).

A influência da taxa de perfuração em termos de comportamento estrutural do poço é desprezível. Entretanto, vale notar que quanto menor for a taxa de perfuração, maior será o tempo em que a coluna de perfuração ficará exposta ao comportamento de fluência do poço, portanto, quanto maior for a taxa de perfuração, menor será a exposição ao risco de uma prisão de coluna no poço.

Em termos de comportamento estrutural do poço, existe diferença significativa quando adotadas operações de reperfurações no poço, mas em termos de fechamento do poço devido à resposta elástica inicial da rocha, após o corte da mesma. Devido à relaxação das tensões na parede do poço ao longo do tempo, operações de reperfuração/repasso ou escariação da parede do poço ocorrem numa condição de menor tensão desviatória na parede do poço, o que faz com que a deformação elástica inicial da rocha seja menor e que o comportamento de fluência em regime permanente de fluência seja atingido em menor tempo, em relação ao primeiro corte da rocha. Quanto menor for a rigidez e maior os efeitos de fluência, maior é o efeito benéfico do repasse no poço.

A ocorrência de anisotropia de tensões na perfuração através de camadas de sal é extremamente preocupante, devido a sua resposta não linear no fechamento do poço. Portanto, poços locados em cenário de domínio tectônico compressional merecem atenção, assim como os locados em flanco de estruturas salíferas. Este último, devido a sua menor espessura de rochas

salinas com comportamento de fluência, faz com que a relaxação de tensões nesta região seja menos efetiva do que na região de maior espessura da estrutura de sal, quando submetida a qualquer alteração no campo de tensões, seja por carga de soterramento, ou por o movimento das placas tectônicas.

Verificou-se que o efeito do ângulo de perfuração através da camada de sal é mais significativo nas camadas de taquidrita e de carnalita do que na de halita. Quanto maior o ângulo de perfuração do poço, maior é o comprimento a ser perfurado e com isso maior será o tempo em que a coluna de perfuração ficará exposta ao comportamento de fluência do poço. Vale citar que a presença de camadas delgadas de sais mais móveis podem se transformar em longos comprimentos a serem perfurados, a depender do ângulo de perfuração. Portanto, altos ângulos frente a estas rochas devem ser evitados. Já no caso da anidrita, uma rocha com comportamento de fluência desprezível quando comparada com as demais avaliadas, mas com maior resistência à compressão e à tração, o tempo de perfuração é maior. Numa condição de perfuração desta rocha em altos ângulos, além de aumentar o tempo de exposição da coluna de perfuração, aumenta o desgaste dos elementos cortantes da broca. Portanto, altos ângulos frente a estas rochas também devem ser evitados.

A desconsideração da interação geomecânica entre estruturas salíferas e o maciço hospedeiro pode conduzir a falhas na perfuração de poços próximos a tais estruturas devido ao processo de halocinese do sal que altera o estado de tensões gravitacional. Esta anomalia influencia na determinação do peso do fluido de perfuração a ser utilizado para evitar o colapso do poço. Mais ainda, em certas regiões as tensões podem ser altamente amplificadas, gerando assim regiões fraturadas. A metodologia desenvolvida para estudos de poços próximos a estruturas salíferas pode ser validada por meio de dados medidos em poço, como o peso de fluido utilizado, o cáliper corrido durante a perfuração do poço e as litologias encontradas.

Quanto ao dimensionamento de revestimentos frente à camadas de sal, verificou-se que o aumento da falha da cimentação aumenta as tensões resultantes no revestimento de maneira não linear, reduzindo a vida útil do mesmo. No modelo sem falha na cimentação as tensões resultantes seguem assintoticamente, bem abaixo do limite de escoamento, a partir do quarto ano da instalação do revestimento. Dessa forma verifica-se um papel importante na cimentação de poços através de zonas de sal, não somente como elemento de isolamento hidráulico, mas como elemento estrutural. Verificou-se também que acima de 20% de falha na cimentação os modelos 2D já não são adequados

devido a tridimensionalidade do problema. O colapso do revestimento não ocorre mais pelo efeito do sal envelopar (abraçar) o mesmo. O revestimento é “empurrado” para a parede do poço pelo processo de fluência do sal devido à redução da área de contato com o cimento. A depender do comprimento livre (sem ancoragem) do revestimento, pode ocorrer ruptura por cisalhamento, nas extremidades do ancoramento, ou por flexão (dobramento/flambagem), na região sem ancoragem.

O aumento das propriedades mecânicas como módulo de deformabilidade, coesão e ângulo de atrito da pasta de cimento, assim como a utilização de uma pasta de cimento com propriedades reológicas similares às da rocha salina têm efeito benéfico no comportamento estrutural do poço revestido.

A redução das pressões exercidas pela hidrostática do fluido de perfuração, em equilíbrio com o colchão de cimentação, durante a cura da pasta de cimentação, causaria a plastificação do revestimento em menos de dois anos depois de sua instalação, podendo provocar colapso do mesmo. Como não se tem registro de campo deste evento, admite-se que as pressões exercidas pela hidrostática do fluido de perfuração, em equilíbrio com o colchão de cimentação quando ainda em sua fase líquida, na parede do poço e do revestimento mantém-se constante após a cura da pasta de cimento.

Na condição de manter o percentual máximo de falha na cimentação de 10%, mas reduzir a razão de *Stand Off* de 100 para 10%, tem-se um efeito desprezível em termos do comportamento estrutural do poço revestido. Entretanto, tem-se uma significativa redução da capacidade estrutural do poço revestido de geometria com 10% do diâmetro do poço ovalizado (poço elíptico).

A redução do peso do revestimento (aumento da relação D/t) e a redução da pressão interna no interior do revestimento têm um efeito significativo na redução da capacidade estrutural do poço revestido, enquanto que variação na SYMS do aço tem um efeito linear, e a ovalização do revestimento tem efeito desprezível. A depender da vida útil do poço é necessário realizar o recobrimento do revestimento, por outro, antes de iniciar a sua plastificação, para mantê-lo íntegro durante a sua vida operacional. O intervalo de tempo máximo para a realização do recobrimento do revestimento, depende das condições construtivas do poço. Já a temperatura e a litologia fazem com que a taxa de carregamento de esforços atuantes no revestimento seja maior e no caso do revestimento resistir, alcançam um patamar de tensões altas mais rapidamente.

No aspecto computacional do trabalho o simulador ANVEC, com extensa aplicação na simulação do comportamento de escavações subterrâneas sujeitas ao fenômeno de visco-plasticidade/elasto-plasticidade, adaptado às condições de contorno do problema de estabilidade e integridade poços de petróleo em zonas de sal, demonstrou robustez e excelente convergência em todas as simulações realizadas, as quais se caracterizaram por um acentuado processo de redistribuição de tensões, tendo em vista os elevados níveis de temperatura e tensão diferencial na profundidade de análise.

A metodologia científica desenvolvida através deste trabalho para a modelagem numérica 2D e 3D pelo método dos elementos finitos através das ferramentas computacionais SIGMA 2D e 3D, para a geração de modelos geomecânicos e visualização dos resultados, e dos simuladores ANVEC 2D e 3D podem ser aplicados nas simulações de estabilidade de poço, durante a sua perfuração, e de integridade de poço revestido (conjunto poço/revestimento/cimento) em poço dentro da camada de sal, dada a robustez dos resultados alcançados, otimizando o procedimento operacional e o posicionamento das sapatas dos revestimentos, minimizando os riscos de aprisionamento da coluna de perfuração, e de colapso de poço revestido, que poderiam causar, desde atraso na execução dos poços (aumento de custos), até em casos extremos, a perda do poço.

Prevendo-se corretamente ou, no caso do poço já construído, indentificando-se ou medindo-se as litologias, os gradientes litostático e térmico e a geometria do poço ao longo da profundidade (diâmetro e condições de cimentação), através de perfis corridos no poço construído, é possível prever os esforços atuantes nos revestimentos de modo a se avaliar o risco de colapso e, se necessário programar o assentamento de outra coluna de revestimento frente ao sal.

A aplicação de metodologias sofisticadas de análise, conforme descrito neste trabalho, é plenamente justificável frente aos altos custos de perfuração de um poço de petróleo em zonas de sal, que pode atingir dezenas de milhões de dólares, sendo este um fator decisivo para que se reduzam os riscos de seu abandono por problemas operacionais, que hoje podem ser previstos pelos simuladores numéricos.

O desenvolvimento desta pesquisa resultou em conclusões importantes para o projeto, construção e operação de poços em zonas de sal, assim como os parâmetros geomecânicos das rochas evaporíticas obtidas e a metodologia de simulação desenvolvida e implementada contribuíram como uma ferramenta

para análises estruturais do comportamento de tais poços. Primeiramente, a estratégia de perfuração e descida de revestimento de um poço pode alterar-se significativamente a depender do estado de tensões e temperatura e dos tipos de rochas salinas presentes na locação do poço, por isso, estudos de dimensionamento de pesos de fluido adequados para a perfuração de camadas de sal são fundamentais na elaboração da estratégia do projeto do poço, no acompanhamento durante a perfuração e na descida do revestimento no intervalo evaporítico. Na definição do tipo de revestimento a ser instalado no poço frente às rochas evaporíticas, de forma a mantê-lo íntegro longo do tempo, suportando os carregamentos oriundos da fluência da rocha salina, fatores referentes a aspectos construtivos do poço, propriedades mecânicas dos revestimentos e das pastas de cimentação, variáveis de estado pressão e temperatura e o tipo de rocha salina que se encontra frente ao revestimento são variáveis importante a serem consideradas.

Entretanto, como consequência natural da evolução do conhecimento científico, novas dúvidas e problemas a resolver surgiram com esta tese. Dessa forma, como sugestões para a continuidade do tema em futuros estudos, os seguintes aspectos podem ser investigados, aprofundados ou implementados, na área de mecânica de rochas evaporíticas como:

- a) Realizar de ensaios triaxiais de fluência:
 1. para as litologias e temperaturas de 43, 86 e 130 °C em que não foi possível definir o mecanismo duplo de deformação;
 2. em outros patamares de temperatura e estado de tensões e vislumbrando a possibilidade de medir a fluência terciária;
 3. em diferentes níveis de tensões confinantes, mas mantendo-se a tensão desviatória para investigar melhor o efeito das tensões confinantes no comportamento de fluência;
- b) Retroanalisar os ensaios triaxiais de fluência realizados para avaliação da energia de ativação de cada uma das litologias ensaiadas;
- c) Aplicar a técnica de emissão acústica para identificar os mecanismos físicos de deformação durante ensaio triaxial de fluência;
- d) Desenvolver dispositivo ou adaptar câmara de ensaio para a medição da deformação radial do corpo de prova durante o ensaio triaxial de fluência;
- e) Realizar ensaios triaxiais de fluência e de fraturamento hidráulico em cilindro vazado para ampliar o conhecimento dos mecanismos de deformação e de iniciação de fraturamento na rocha, através;

1. da avaliação dos efeitos da variação do raio interno versus espessura da parede do cilindro vazado,
2. da aplicação de diferentes tensões de confinamento e temperaturas;
3. do desenvolvimento de novas metodologias para medida das deformações radiais e tangenciais da área interna do cilindro, como o uso de tomografia computadorizada simultaneamente com o desenvolvimento de tensões durante o ensaio e em seguida a reconstrução tridimensional das deformações na área interna do cilindro vazado;

f) Realizar ensaios cíclicos de compressão uniaxial com a medição da velocidade das ondas compressoriais e cisalhantes, para comparar os módulos estático e dinâmico e avaliar a redução do módulo de deformabilidade ao longo dos carregamentos;

g) Realizar ensaios de *pull-out* e *push-out* na interface de cimento aderido as rochas evaporíticas para avaliar os mecanismos de falha;

h) Desenvolver equipamento para avaliar os efeitos dos carregamentos não uniformes em estruturas tubulares, que podem ocorrer em poços em zonas de sal, para calibrar os modelos numéricos de simulação deste problema.

Na área de mecânica computacional são sugeridas alguns desenvolvimentos adicionais tanto para o refinamento dos modelos de análise quanto para a interpretação de resultados.

i) Aplicar incrementos de tempo variáveis, determinados automaticamente pelo processo de análise, que levam em conta as não linearidades do comportamento de fluência (tensões desviatórias, temperatura, tipo de rocha) durante a análise;

j) Aplicar elementos de contato para análise de poço revestido;

k) Aplicar o método de reconstrução no módulo 3D do ANVEC;

l) Desenvolvimento de interfaces gráficas com módulos parametrizados específicos para a geração paramétrica de modelos numéricos (*Templates*) para a análise de alteração do estado de tensões no maciço circundante às estruturas salíferas;

m) Geração de superfícies de resposta, com aplicação de análise probabilística, para análises de estabilidade e integridade de poços em zonas de sal, assim como para alteração do estado de tensões no maciço circundante às estruturas salíferas.