

## 6

### Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

O APB do sal é um efeito não simulado nos softwares comerciais utilizados para simulação de APB, que consideram apenas as cargas térmicas decorrentes da produção do poço. O acréscimo do APB devido à fluência do sal foi efetuado de modo simples, através do acoplamento das variações de volume do fluido decorrentes do fechamento do sal no anular não cimentado e variação de volume decorrente do aquecimento do poço.

Para isso partiu-se da premissa de conservação de massa de fluido nos anulares. A validação do código foi realizada considerando apenas o efeito térmico com uma diferença máxima de 2% em relação ao software comercial no estudo de caso. Já as curvas de fluência do sal foram implementadas a partir dos resultados fornecidos no software EPsal. Um ponto bastante relevante, implementado no código do APBsal, foi calcular a fluência do sal como função da contrapressão gerada pela massa específica do fluido e do próprio APB durante o fechamento do poço.

A simulação de APB devido à fluência do sal apresentou um incremento de pressão significativo no anular B no estudo de caso. Este incremento foi gradual até o momento em que ocorreu uma estabilização das pressões nos anulares. Neste momento foi observado que não havia mais variação de volume nos anulares do poço, isto é, ocorreu uma estabilização dinâmica do volume do anular B. A pressão atingida no anular B foi de 1808 psi, o que resultou em pressões de 359 psi no anular A e 277 psi no anular C decorridos 387 dias de fluência do sal contra o anular B após confinamento do fluido.

A estabilização também pôde ser verificada no diâmetro do poço. Para manter o volume do anular constante e fechamento dos sais com maior soterramento de rochas ocorreu inversão no sentido de fluência do sal no intervalo de sal mais raso que possui o menor soterramento. Este resultado é válido considerando todo o intervalo de evaporito como halita. Caso houvesse

intercalações de sais móveis os resultados poderiam ser diferentes como tempo até estabilização e intervalo com inversão do sentido de fluência do sal.

A simulação de APB para produção do poço, sem considerar a fluência do sal e com o modelo de PVT do fluido utilizando as constantes do estudo de Zamora, apresentou os valores de 3939 psi, 2793 psi e 4881 psi para os anulares A, B e C, respectivamente. Quando efetuada a simulação acoplada com a fluência do sal há um acréscimo significativo nas pressões finais de APB, a depender do tempo de fluência do sal até o momento de iniciar a produção do poço. Focando apenas no anular B, que é o mais atingido pela fluência do sal no estudo de caso simulado, a pressão atinge 3801 psi quando a produção do poço é iniciada após 56 dias (8 semanas), o que representa um acréscimo de 36% ao APB térmico. Quando a produção do poço é iniciada após 196 dias (28 semanas) a pressão no anular B atinge 4388 psi, o que representa um acréscimo de 57% ao valor do APB térmico. No caso extremo, quando o sal atingiu equilíbrio dinâmico no volume do anular (54 semanas), a pressão no anular B atinge 4578 psi, o que representa um acréscimo de 64% ao valor do APB térmico.

Nesse cálculo de variação de volume, decorrente da fluência do sal, há uma grande influência do modelo adotado para o evaporito. Utilizou-se o modelo de duplo mecanismo, simplificação do modelo apresentado por Munson (Poiate, et al., 2006), que descreve a fluência do sal na fase estacionária. Em poços de subsal são normalmente encontradas intercalações no sal, com presença de anidrita, halita, taquidrita, carnalita, etc. A carnalita e taquidrita apresentam maior fluência, o que a depender da profundidade podem modificar a resposta de APB geradas a partir da fluência do sal.

Ressalta-se que a mudança no sentido de fluência do sal no topo do evaporito, calculada no software EPsal, ainda não está totalmente validada para profundidades elevadas. Têm-se muitos dados para mineração em cavernas de sal, porém as condições encontradas em poços de águas profundas, de elevadíssimas temperaturas e pressões, dificultam a calibração de modelos com dados experimentais de campo. Os resultados teóricos de fluência do sal ainda não são unanimidades e, mesmo com a grande evolução apresentada nas últimas décadas, a validação em campo de cada modelo é necessária.

No estudo de caso não se considerou a possibilidade da fratura do sal na sapata do revestimento anterior, pois gera controvérsias devido à amplitude de

variáveis que o tema abrange. Em alguns projetos de poços, o dimensionamento dos revestimentos e demais equipamentos considera o valor de sobrecarga das rochas na profundidade da sapata como pressão em que ocorre a fratura no sal, com consequente alívio de pressão. Em outros projetos, o valor de 1,2 vezes a pressão de sobrecarga na sapata é utilizado como valor para a fratura da formação com alívio de pressão. Mais detalhes sobre o assunto podem ser consultados no anexo A, que apresenta um breve resumo de critérios de falha. Destaca-se o critério de dilatação como um possível método para quantificar a tensão em que ocorre a falha da rocha de sal quanto à permeabilidade ou fratura.

Quando o projeto considera um ponto de alívio de pressão como método de mitigação de APB, de alguma forma cria a possibilidade de migração de fluido do anular para a formação, uma vez que é rompida a integridade de uma rocha impermeável como é o caso do sal. Quando ocorre em outras formações como arenitos, por exemplo, pode ocorrer troca de fluidos com a formação. Em casos mais críticos, onde há falha dos revestimentos mais internos e fratura da formação, pode ocorrer migração de fluido até o fundo do mar, pois o anular com problemas de APB não estaria cimentado até a sapata do revestimento anterior.

Quando o projeto contempla a cimentação do anular até o fechamento da sapata anterior, o fluido é confinado com uma temperatura média mais baixa, devido ao gradiente geotérmico mais baixo nos intervalos mais rasos. Neste caso, o efeito do crescimento de pressão no anular devido ao fluxo de calor é mais acentuado, uma vez que há uma diferença mais elevada entre as médias de temperatura do fluido no intervalo confinado e do fluido na coluna de produção. Cimentar o anular até o cobrimento da sapata do revestimento anterior é uma prática mais segura, no sentido de evitar a migração de fluidos, porém não há ponto de alívio de pressão para a formação. Neste caso são necessários métodos de mitigação de APB quando há limitação dos equipamentos do poço.

Citam-se alguns métodos de mitigação mais conhecidos como: posicionamento de colchão de gás nitrogênio no anular, utilização de espuma sintética flexível aderida ao revestimento, instalação de discos de ruptura nos revestimentos para alívio da pressão, utilização de isolante térmico na coluna de produção (VIT), mistura de esferas ocas de vidro no fluido de perfuração para posicionar no anular confinado e canhoneio para perfuração do revestimento

externo do anular confinado. Porém, todos esses métodos possuem limitações e não são unanimidades.

O disco de ruptura tem sido um caminho adotado por muitas operadoras do mundo, porém tem limitações quanto à posição de instalação, confiabilidade da pressão de ruptura em condições de campo, além de permitir um caminho de migração do fluido do poço para a formação. Esta migração pode ser crítica em casos de falha do revestimento de produção, pois possibilita a migração de fluido para o fundo do mar em poços de águas profundas. O autor desse trabalho acredita na espuma sintética colapsável e no isolamento térmico da coluna de produção (VIT) como uma boa opção para mitigação de APB em sais com elevado soterramento. Porém são métodos que acarretam em redução do espaço anular, dificuldade de manuseio, incremento de custos e que são pouco utilizados no Brasil.

O crescimento de pressão em anulares tem um conceito simples e é facilmente entendido, porém a redução dos efeitos e modelagem do APB é complexa em termos práticos. Estes métodos necessitam um cálculo confiável do APB para o dimensionamento dos revestimentos e dos equipamentos que compõem o conjunto solidário de barreiras de segurança (N-2752, 2014), como packoff por exemplo, sendo imprescindível a consideração do APB resultante da fluência do sal para que a mitigação e dimensionamentos sejam efetivos.

Para trabalhos futuros há sugestões de estudos complementares a serem realizados. Listam-se os seguintes temas:

- Aprofundamento dos estudos na área de fratura do sal e incorporação em modelos de geomecânica para cálculos de alívio de pressão por fratura da rocha em simulações de APB;

- Programação da geometria do poço em elementos finitos para o cálculo dos parâmetros de tensão desviatória utilizados na fluência do sal, que são muito complexos para geometria cilíndrica do poço. No código implementado neste trabalho, utilizando o Matlab, foram utilizadas regressões lineares dos valores gerados no software EPsal para obter a taxa de fluência do sal referente ao modelo de duplo mecanismo;

- Análise de sensibilidade para outras geometrias de poço quanto ao volume de fluido confinado, análise de sensibilidade quanto ao perfil de temperatura através da modificação da vazão de produção do poço, análise de sensibilidade

incluindo intercalações de sais móveis no intervalo de halita e análise de sensibilidade utilizando outros modelos de fluência de sal que são apresentados na literatura sobre o assunto;

- Modelagem da espuma sintética colapsável aderida no revestimento e verificação de sua eficiência na redução do APB com efeito acoplado do sal. Neste caso, deve-se agregar uma análise hidráulica para a cimentação do revestimento com essa espuma aderida e verificar se há uma espessura ótima dessa espuma (Sathuvalli, et al., 2005);

- Integração do cálculo dos esforços sobre o revestimento em função do APB e inclusão de mitigações. Neste caso ainda pode-se efetuar a comparação dos modelos de falha dos revestimentos através da norma API, critério de Mises, Lamé ou modelagem de estado limite entre outros.