6 Estudos de caso aplicados por modelagem de bacias

Os estudos deste capítulo utilizam a modelagem de bacias para investigar os efeitos de processos geológicos diversos na distribuição de pressão de poros em bacias evaporíticas, dentre eles: (i) o momento em que os evaporitos se depositaram na bacia; (ii) sua extensão lateral; (iii) ambientes de sedimentação; (iv) formas de crescimento geradas por diferentes cenários de tensões e fraturamento por eles imposto; (v) presença de falhas.

6.1. Reprodução de estudos de caso da literatura

6.1.1. O'Brien *et al.* (1993) – lente de sal

O estudo de caso apresentado pelos autores simula dois casos com efeito de selo gerado por um corpo salino autóctone plano com 6 km de extensão posicionados na área central de uma seção 2D de 40 km. O caso base apresenta uma bacia composta apenas por folhelhos e o corpo salino. Em seguida os autores inserem uma lente de arenitos abaixo de uma das extremidades do sal para verificar o potencial de drenagem. As hipóteses adotadas pelos autores são:

- Para evitar a influência de efeitos de base, os autores modelaram a seção com 7000m de profundidade, sendo os últimos 1000m compostos por duas camadas de 500m cada compostas respectivamente de folhelho e de arenito. Analisaram, contudo, apenas os resultados dos primeiros 5000m.
- Taxa de sedimentação de 200 m/Ma
- Deposição de corpo plano de sal na idade de 15 Ma.
- Para o sal foi adotada uma porosidade desprezível e permeabilidade constante de 10⁻⁵ mD e densidade de 2.2 g/cm³.
- Para o arenito, adotam permeabilidade elevada não especificada.
- Para o folhelho, os autores adotam as curvas de compactação e de porosidade vs permeabilidade vertical apresentadas na Equação 6.1 e na Equação 6.2. Adotam permeabilidade lateral de 5 vezes a vertical.
- Não apresentam considerações sobre parâmetros cinéticos e modelagem de temperatura.

 $\epsilon/\epsilon^* = (Pf/Pf^*)^A$ Equação 6.1 $\epsilon = \emptyset/(1 - \emptyset)$ $k/k^* = (\epsilon/\epsilon^*)^B$ Equação 6.2

Pf* é a pressão de fluido de superfície

 $k^* \cong 1 \ mD$ é a permeabilidade de superfície

$$A = -1/3 e B \cong 3$$

 $\varepsilon^* = 1$ é o índice de vazios da superfície

A Figura 6.1 e a Figura 6.2 ilustram os resultados obtidos pelos autores. Notar que a taxa de sedimentação de 200 m/Ma já é suficiente para gerar sobrepressões consideráveis pela subcompactação dos folhelhos, mesmo sem a presença do sal, como ilustrado por Hantschel e Kaureaulf (2009), Figura 5.14.



Figura 6.1 – Previsão de excesso de pressão de poros em seção de bacia argilosa com a presença de sal (Editado de O'Brien *et al.*, 1993).

197



Figura 6.2 - Previsão de excesso de pressão de poros em seção de bacia argilosa com a presença de sal e arenito (Editado de O'Brien *et al.*, 1993).

O'Brien *et al.* (1993) estudam o excesso de pressão representando o ambiente local (atravessando o sal) e o regional (bordas da seção, longe do sal) em poços verticais. Mesmo que a camada de sal não se prolongue por toda a extensão lateral modelada, (Figura 6.1) os autores observam que a influência do corpo salino no cenário de pressões (C e D) é considerável em relação ao cenário regional (A). Observam-se menores pressões acima e maiores pressões abaixo do sal em relação ao cenário regional.

Analisando os processos de evolução da bacia, o resultado é explicado pelos processos de compactação e drenagem de fluidos (item 5.3.2). Ao ser depositado um corpo salino na bacia, não haverá qualquer drenagem vertical de fluido de baixo para cima onde o mesmo se encontra depositado (Figura 6.1, locação C). Se os elementos acima do sal não recebem excesso de fluido

proveniente dos elementos abaixo, o excesso de pressão gerado pelo balanço de massa entre sobrecarga e entrada e saída de fluido será menor. Da mesma forma, para os elementos imediatamente abaixo, este balanço levará a grandes excessos de pressão em função do bloqueio para a saída vertical de fluido.

A água, contudo, não é totalmente retida, pois a modelagem descrita é 2D, possibilitando a drenagem lateral para as bordas do sal (multiplicador de 5 entre as permeabilidades lateral e vertical). A porção de fluido drenada tende a seguir seu fluxo vertical pelas bordas do elemento salino, mas como a permeabilidade dos folhelhos é muito baixa, este efeito é pouco efetivo. Notar o suave aumento na inclinação da curva de excesso de pressão da locação B em relação à A.

Comparando-se ainda as locações C e D, verificar o efeito da drenagem lateral na locação C em relação à D. Como se trata de folhelhos, o alcance da drenagem é pequeno (locações C e D distam 2 km entre si).

No segundo caso (Figura 6.2), uma lente de areia (permeabilidade elevada) de extensão limitada é inserida abaixo de uma das laterais da lente de sal. Notar que a introdução do arenito (locações C e D) facilita a drenagem do excesso de pressão e reduz o excesso de pressão local em relação à locação da outra extremidade do sal (B) e em relação ao cenário regional (A).

Nota-se ainda que a efetividade da drenagem pela camada de areia seria maior se a mesma não se encontrasse enclausurada entre folhelhos. Neste caso, mesmo sendo o arenito uma rocha de alta permeabilidade, o balanço de massa é fortemente influenciado pelos elementos de contorno, de baixa permeabilidade.

Para reproduzir os resultados apresentados pelos autores, as seguintes hipóteses complementares foram adotadas:

- Não foram introduzidos parâmetros cinéticos para a análise de geração de HCs.
- Para a modelagem de temperatura, foram adotados valores de temperatura de superfície e gradiente de temperatura padrão do simulador TemisFlow.
- Para as curvas de paleobatimetria, adotou-se a superfície da bacia plana e na cota zero para todas as idades de deposição.
- Buscou-se reproduzir de forma fiel as curvas de porosidade e permeabilidade indicadas pelos autores, mas o decaimento de porosidade com a profundidade gerado pela curva dos autores não foi capaz de reproduzir os resultados apresentados. Foram portanto, realizados ajustes nas curva de compactação e de permeabilidade vs porosidade.

Com o avanço dos modeladores, foi possível não só gerar os resultados como também a visualização em seção 2D no Temis (Figura 6.3), facilitando a compreensão de distribuição de pressões como um todo.



Figura 6.3 – Excesso de pressão de poros reproduzido no Temis para a seção do caso base de O'Brien et al (1993).

Para o caso base, com resultados apresentados acima, notar que o poço A não é absolutamente afetado pela presença do corpo salino, captando apenas a tendência regional de sobrepressões decorrentes da subcompactação dos folhelhos. Nota-se também que o poço B, localizado a 1 km do corpo salino, sofre pouca influência das sobrepressões geradas pelo selo imposto pelo sal, indicando pequeno alcance lateral da redistribuição de pressões. Dessa pequena contribuição, forma-se um "cone" de influência de pressão abaixo e acima do sal.

O poço D, que atravessa o centro do sal, apresenta o maior excesso de pressão abaixo do sal, enquanto o poço B, que atravessa o sal próximo à sua borda, apresenta leve redução em relação a B, consequente do escape de fluidos pela lateral do corpo salino. Para a comparação direta entre os resultados (Figura 6.4), foi realizada a conversão de unidade de pressão (1 MPa ~ 9.9 bar). Notar o bom ajuste dos resultados de excesso de pressão e de porosidade (obs.: A suposta pressão de poros no sal se deve ao uso de uma porosidade irredutível).

Da mesma forma foi reproduzido o estudo com a presença de uma lente de areia abaixo de uma das laterais do corpo salino (Figura 6.5). Notar que, mesmo confinada entre espessa e extensa massa de folhelhos e posicionada apenas em uma das laterais do corpo salino, a lente de areia é capaz de reduzir substancialmente o excesso de pressão de poros local. A lateral direita do corpo salino, onde se encontra a lente de areia, dispersa o excesso de pressão de poros abaixo e eleva levemente as pressões em profundidades acima do corpo salino, efeito direto da drenagem que o corpo de elevada permeabilidade exerce nas células do entorno.



Figura 6.4 - Comparação entre os resultados obtidos (curva cheia) e os dos autores (pontos em cruz).

Ao avaliar os modelos de curvas de compactação dos folhelhos, quando ainda em pequenas profundidades de soterramento, a porosidade dos folhelhos é suficiente para proporcioná-lo permeabilidade suficiente para a drenagem de fluidos para a superfície. A permeabilidade horizontal adotada foi de 10 vezes a permeabilidade vertical, logo, a areia funciona como um dreno para onde o excesso de fluido dos folhelhos abaixo e ao lado se direcionam e migram para camadas superiores. Ao aumentar o soterramento, a camada de areia se mantém encapsulada nos folhelhos já com baixa permeabilidade e perde seu efeito de dreno, mantendo pressão em equilíbrio com as células de entorno.



Figura 6.5 – Excesso de pressão de poros reproduzido no Temis para a seção com lente lateral de areia de O'Brien et al (1993).

Da reprodução do presente estudo de caso é possível perceber o efeito da presença de corpos salinos no estado de pressões de entorno. Seu efeito de selo implica em cenários como apresentados por Karpa (2001) *apud* Saleh *et al.* (2013) e Rohleder *et al.* (2003) no item 2.2.3, e explicados por O'Brien *et al.* (1993) de acordo com os processos de compactação de sedimentos simulados pela modelagem de bacias.

As pressões imediatamente abaixo do corpo salino são anormalmente altas, pois recebem fluido pressurizado decorrente da compactação de células abaixo, mas o selo superior impede a expulsão de fluido neste sentido, sobrecarregando o estado de pressões na célula. As pressões acima, pelo contrário, se apresentam consideravelmente inferiores, pois os elementos porosos não recebem a entrada de fluidos pressurizados de células abaixo e podem drenar parcialmente os fluidos para células superiores.

6.1.2. Allwardt *et al.* (2009) – mini-bacia formada por recuo de sal

Allwardt *et al.* (2009) simulam o efeito da movimentação e recuo de corpos salinos, e consequente formação de mini-bacia, geram no cenário de pressão de poros local. A apresentação geral do caso encontra-se no item 2.3.6, portanto serão aqui abordadas apenas as hipóteses adotadas pelos autores para o desenvolvimento do estudo e a comparação e discussão dos resultados obtidos.

Hipóteses do estudo:

- Modelagem de 2 seções perpendiculares para representação espacial;
- Litologias formadas por mistura folhelho/areias na proporção 70:30, sal e calcáreos para o Jurássico e Cretáceo. Valores de caracterização das litologias dadas em artigo não encontrado.
- Curvas de compactação e relação entre permeabilidade e porosidade dadas pela Figura 6.6;
- Idades dos topos dados pela Tabela 6.1;
- Calibração pelo poço 1 e validação para os poços 2 e 3;
- Condições de fluxo livre nas bordas e fechado na base;
- Células acima do horizonte PL1 ~130m e abaixo ~400m.



Figura 6.6 – Curvas de compactação (a – linha cheia) e de relação porosidade *vs* permeabilidade (b – linha cheia inferior) de Allwardt *et al.* (2009).

Por não ter acesso ao conjunto de informações para as litologias, os dados complementares adotados para as litologias informadas foram obtidos na

biblioteca do IFPEN, disponível no Temis. Também não foram explicitadas considerações quanto às condições de contorno de temperatura, portanto adotouse temperatura de 10 °C na superfície e gradiente geotérmico de 30 °C/km.

Horizonte	Sigla	Idade (Ma)
Pleistoceno 1	P1	0.75
Pleistoceno 3	P3	1.75
Plioceno 1	PL1	2.76
Plioceno 3	PL3	4.04
Plioceno 5	PL5	5
Mioceno 1	M1	5.8
"Late" Mioceno 1	LM1	8.2
"Late" Mioceno 2	LM2	9.1
T. Oligoceno	T Olig	23.7
T. Cretáceo	T Cret	65.6

Tabela 6.1 – Idades estratigráficas adotadas por Allwardt et al. (2009).

Neste caso, em que há grande movimentação dos corpos salinos (ver Figura 2.51) é preciso estabelecer manualmente os formatos desses corpos ao longo do processo de evolução da bacia. A entrada e saída do sal ao longo do tempo em diferentes locações é elemento chave no contexto de permeabilidade, geração e redistribuição de pressões na bacia ao longo de sua evolução, conforme apresentado em caso de geometria simples em O'Brien *et al.* (1993) e no estudo de Malloy *et al.* (1996), também apresentado no item 2.3.6.

A seção NS com os resultados obtidos pelos autores e aquela aqui reproduzida são apresentadas na Figura 6.7. Notar a boa representação dos resultados obtidos para a seção 2D. A análise comparativa entre os resultados obtidos e os dados reais de poço são apresentados na Figura 6.8.



Figura 6.7 – Gradiente de pressão atual (0 Ma) reproduzido neste trabalho (a) e simulado (b) por Allwardt *et al.* (2009) para a seção NS.



Figura 6.8 – Calibração das curvas obtidas (linha cheia) e dados do poço de calibração (pontos em cruz).

Os dados de pressão são leituras de RFT informadas pelos autores e os dados de porosidade foram por eles calculados a partir de análise de perfis de poço. Os resultados de pressão medidos em poço são bem reproduzidos pela modelagem de bacias. Os resultados de porosidade também são bem aproximados, porém um pouco acima dos valores de poço. A variação entre ambas pode ser gerada por motivos diversos, sendo um deles a obtenção indireta da porosidade a partir de perfis de poço.

Calibrados os parâmetros de modelagem para a seção NS, a seção LO foi modelada com os mesmos dados de litologia, sem mudança nas propriedades do material. A seção LO também teve sua geometria ajustada para os diversos intervalos de tempo conforme seções apresentadas pelos autores e conforme ajustes necessários.

A Figura 6.9 apresenta a evolução da bacia, incluindo o cenário de fácies litológicas e o gradiente de pressão de poros simulado para algumas idades estratigráficas. Nota-se o efeito de formação de mini bacia, concentrando pressões no interior da região selada pelo sal no passado e a retenção de maiores valores de pressão abaixo dos corpos salinos e nas laterais da mini bacia central para a idade de 0 Ma. Esse comportamento ilustra casos estudados hipoteticamente por Malloy *et al.* (1996), item 2.3.6, e ilustrados em estudo de caso real com modelagem 3D por den Boer *et al.* (2011) no item 2.3.4.

O efeito de mini bacia se deve ao selo por corpos laterais de sal desde o "Late" Mioceno 2 (9.1 Ma) até antes do Pleistoceno 3 (1.75 Ma), quando houve recuo total desses corpos laterais de sal. Recuadas as "paredes" de sal, liberouse a comunicação de fluxo entre a mini bacia central e as mini bacias laterais, mas o fluido retido já não pode ser completamente expulso para camadas superiores, como discutido por Malloy *et al.* (1996) em estudos 1D.



Figura 6.9 – Simulação dos diferentes cenários de pressão de poros frente à movimentação de sal na bacia para diferentes idades estratigráficas.

Novamente vale ressaltar a suposta pressão de poros no sal em função da porosidade desprezível diferente de zero. A validação dos resultados é apresentada na Figura 6.10 para os três poços (dados reais) apresentados na Figura 6.9. Verifica-se, também neste caso, boa aproximação entre os dados de poços e os resultados simulados, com leve superestimação de pressões. Tal superestimação, contudo, encontra-se dentro de boa margem de incerteza (~ 1,0 lb/gal) e foi mantida para que as curvas de compactação das duas seções perpendiculares se mantenham as mesmas, já que se tratam da mesma bacia.



Figura 6.10 – Comparação entre resultados simulados para a seção LO (curvas cheias) e dados de poço (pontos).

Como conclusão, é possível notar o potencial da técnica para a aproximação do cenário de pressões em diferentes locações de bacias com complexidade geológica como a presença de corpos salinos, captando a variabilidade lateral das pressões e o efeito de redistribuição de pressões quando da movimentação desses corpos.

Ainda, nas observações de Allwardt *et al.* (2009) sobre a modelagem de seções 2D, os autores ressaltam que estudos 1D tendem a superestimar as pressões em relação a cenários 2D e as seções 2D podem superestimar as pressões em relação a cenários 3D. Entende-se que a modelagem 3D evitaria o leve efeito de superestimação apresentado pela seção LO e equilibraria ainda mais os resultados entre as mesmas, aproximando-se mais do cenário real.

6.2. Estudos de caso propostos

Os estudos propostos tratam, inicialmente, de introduzir novos elementos e análises de sensibilidade aos estudos previamente apresentados e calibrados, ilustrando: (i) o efeito da presença de falhas, abordando parcialmente os efeitos discutidos por Seymour et al. (1993) e por Dussealt et al. (2004); (ii) efeitos de modelagem de um mesmo cenário em 1, 2 e 3 dimensões, analisando aspectos levantados por Yardley e Swarbrick (2000) e por Allwardt et al. (2009).

São estudos sintéticos simples, mas representativos, demonstrando a possibilidade de aplicação a estudos de casos reais para fins de perfuração em previsão de pressão de poros.

6.3. Casos propostos

6.3.1.

Caso 1 – Introdução de novos elementos aos estudos de O'Brien *et al.* (1993)

Outras feições típicas de bacias evaporíticas são as falhas geradas pela movimentação salina, como o crescimento de domos, como apresentados por Seymour (1993), Alsop (2000), Zilberman *et al.* (2001) e Dussealt *et al.* (2004). A presença dessas falhas pode gerar compartimentos de pressão acima dos corpos salinos, aprisionando ou conectando reservatórios.

Para avaliar o efeito da inclusão de falhas conectando o aquífero abaixo do sal a um aquífero mais recente, acima do sal, foram verificadas duas situações: a

primeira delas foi a simples inclusão do aquífero, com as mesmas propriedades daquele inserido abaixo do sal; o segundo caso inclui também uma rede de falhas supostamente gerada por movimentação salina.

O estudo parte do produto final da reprodução do caso de O'Brien *et al.* (1993), ou seja, os mesmos dados e hipóteses são adotados e novos elementos são introduzidos, como em uma análise de sensibilidade.

No caso a), uma lente de areia de 13.500 m de extensão é depositada a entre 5 Ma e 3.75 Ma, posicionada no momento presente a uma profundidade de aproximadamente 700 m Figura 6.11, acima. No caso b), 3 falhas com elevada permeabilidade se formam na idade de 3.75Ma, conectando o topo do sal e o topo do arenito inferior à base do aquífero superior, conforme apresentado na Figura 6.11, abaixo.



Figura 6.11 – Efeito da introdução de aquífero próximo à superfície (a) e aquífero conectado por falha (b) ao estudo de caso de O'Brien *et al.* (1993). Idade atual.

No caso da introdução da lente de areia acima do sal, mas em profundidade de 700 m, pouco efeito é notado em relação ao caso original, já que a lente de areia se encontra posicionada em profundidades rasas de soterramento. Há apenas leve redução no estado de pressão de poros.

A introdução de falhas permeáveis, contudo, modifica drasticamente o cenário de pressão da bacia (Figura 6.12). O comportamento inicialmente

esperado poderia ser a geração de pressões anormalmente altas no aquífero superior, em função da comunicação com o aquífero inferior, anormalmente pressurizado quando da ausência de falhas. Nota-se, contudo, que para o caso apresentado, efeito contrário é obtido. Ao invés de gerar excesso de pressão no aquífero superior, há drenagem do excesso de pressão do aquífero inferior, pois gera um caminho facilitador de fluxo que viabiliza a conexão quase direta entre um aquífero em grandes profundidades a outro quase em superfície.





O excesso de fluido dos folhelhos dos arredores é drenado para a superfície por meio das falhas "instantaneamente" em termos de tempo geológico, tal como discutido por Liu e Katz (2013). Ao comparar os cenários de um poço a 1 km à direita da borda do corpo salino (Figura 6.12) verifica-se que para uma profundidade de aproximadamente 3.500 m há uma redução de aproximadamente 90 % do excesso de pressão de poros entre o caso a) e o caso d). O caso a) é o caso inicial de O'Brien *et al.* (1993), composto apenas por folhelhos e próximo a uma lente de sal posicionada entre 3.000 m e 3.500 m de profundidade. O caso d) é aquele com a introdução da lente de arenitos superficial e as falhas.

Analisando os quatro casos em paralelo, observa-se que arenitos posicionados abaixo de corpos salinos, a menos que estejam conectados a algum caminho de alívio de pressões, se encontrará sob estado pressão anormalmente alta e poderá apresentar os riscos de *kicks* ou mesmo *blowouts* abordados no item 2.2.3. A boa interpretação geológica espacial é fundamental a uma análise mais aproximada para previsões de pressão de poros.

Também em relação a esse aspecto, nota-se a importância do mapeamento de feições estruturais e do estudo de sua gênese para atribuí-las as devidas propriedades físicas e observar a implicação das mesmas na distribuição de pressões da bacia.

6.3.2. Caso 2 - Efeito de drenagem em cenários 1D, 2D e 3D

Outra feição a ser estudada a partir dos casos apresentados por O'Brien *et al.* (1993) é a importância do número de dimensões do estudo, 1D, 2D ou 3D, evidenciando a importância de estudos espacialmente mais abrangentes.

Aquui é apresentada uma análise 1D e 3D do caso apresentado por O'Brien *et al.* (1993) com lente de areia (Figura 6.2), comparando os resultados obtidos para os poços nas posições A, B, C e D. Esses cenários contemplam, até os 5.000 m de profundidade:

- A apenas folhelhos;
- B folhelho, sal (3.000 a 3.500 m) e folhelho;
- C folhelho, sal (3.000 a 3.500 m), arenito (3.500 a 3.750 m) e folhelho;
- D folhelho, arenito (3.500 a 3.750m) e folhelho.

As mesmas hipóteses de fluxo, temperatura, idades, espessuras e propriedades físicas adotadas para a reprodução do estudo 2D foram aqui adotas. Para o caso 3D foi replicada seção 2D na direção y sob as mesmas proporções de x, garantindo a presença da lente de areia apenas em uma das laterais do



corpo salino e com limite de extensão em profundidade conforme a própria extensão do sal. O cubo final (40 km x 40 km x 7,5 km) é ilustrado na Figura 6.13.

Figura 6.13 – Modelo de fácies 3D replicando caso 2D com lente de areia.

Os resultados obtidos são compilados junto com os resultados do estudo 2D (Figura 6.14) para cada poço individualmente, permitindo a comparação entre os resultados. O posicionamento dos poços é apresentado na Figura 6.5.

Notar que o poço A e D, disposto a 1 km da lateral esquerda do sal, apresenta resultados bastante similares para os três cenários, isso porque o aumento de 1 para 3 dimensões não implica em mudanças consideráveis em suas condições de fluxo. Como não há grande heterogeneidade, lateral ou vertical, e as bordas do modelo são fechadas ao fluxo, não há para onde drenar o excesso de pressão senão para o topo, implicando em condições coincidentes com o cenário 1D. Esse poço seria um caso em que métodos convencionais seriam capazes de gerar bons resultados de estimativa de pressão.

No poço B, que atravessa o sal 1km adentro de sua borda, as condições de heterogeneidade vertical implicam em variações consideráveis entre o cenário 1D e os cenários 2D e 3D. Nesse caso, a simulação 1D subestima a pressão acima do sal, uma vez que simula barreira perfeita de fluxo de fluido de baixo para cima do sal, facilitando a drenagem parcial do excesso de fluido dos poros para o topo. Nesse caso, a pressão abaixo do sal se aproxima da tensão vertical, comportando toda a carga de sedimentos depositada acima do selo.



Figura 6.14 – Comparação entre os resultados 1D (azul), 2D (verde) e 3D (laranja), para os poços A, B, C e D.

Nos cenários 2D e 3D, a presença de fluxo lateral permite drenagem parcial dos fluidos abaixo do sal para as bordas. Também os elementos acima equilibram pressões com elementos laterais, apresentando pressões um pouco mais

elevadas que aquelas simuladas pelo caso 1D. Notar que a drenagem no caso 3D é levemente mais efetiva que a 2D, como resultado da simetria do modelo.

O poço C apresenta comportamento bastante similar ao poço C, exceto pelas variações impostas pela presença da lente de arenito encapsulada abaixo do sal. Os valores de excesso de pressão dentro do arenito são levemente inferiores ao caso B.

O poço D apresenta comportamento bastante similar para os três cenários próximo à superfície, dispersando em seguida ao se aproximar do arenito e em todo o trecho abaixo do mesmo. Os resultados são efeito direto da drenagem parcial que essa lente implica nas respectivas dimensões.