5 Simulação e Resultados

5.1. Alimentação de Dados para Simulação

Para realizar a simulação, conforme descrito ao longo da dissertação, é necessário definir o esquema básico do projeto de poço e alimentar os parâmetros para iniciar a simulação. O esquema do poço é o produto do assentamento de sapatas, curva de geopressões, coluna litológica perfurada, diâmetros de fases e revestimentos, topos de cimento nos anulares, cargas de projeto, premissas de segurança de poço, fluido de perfuração, modelo de produção e outros fatores intrínsecos de cada poço. Para o estudo de caso foi escolhido um poço do pré-sal com revestimentos convencionais e um sal profundo (soterramento no pós-sal superior a 2000 m) que ocorre em algumas regiões na Bacia de Santos.

Tabela 5.1: Geometria e revestimentos utilizados na simulação para anular B com intervalo de poço aberto não cimentado no sal.

Fase [in]	OD [in]	ID [in]	Peso [lb/ft]	Tipo [Kpsi]	Topo [m]	Base [m]	TOC [m]
36	30	28	456,4	Grau B	1800	1860	1800
26	20	18	203	X-70	1800	2800	1800
17,5	13 5/8"	12,375	88,2	VM-110 HC	1800	4150	2799
12 ¼" x 14 ¾"	10 3⁄4"	9,156	85,3	VM-110 HC	1800	5400	5000
8,5	7	6,0	32	VM-125 HC	5300	5965	5300
Tubing	6 5/8 x 5"	5,791	28	P-110	1800	5400	

Definida a geometria do poço e a posição das sapatas são simuladas as cargas nos revestimentos com auxílio do software StressCheck, que é muito utilizado na indústria de petróleo, para definir espessura de parede dos revestimentos, tipos de conexões, calcular fatores de segurança e otimizar custos. Para simplificar a simulação utilizaram-se colunas de revestimentos homogêneas com o mesmo peso linear em cada fase do poço. A partir da Tabela 5.1 verifica-se que o poço foi dividido em 5 seções com semelhanças de geometria e condições de contorno (ver também fFigura 4.1). Como o liner de 7" está cimentado e sem fluido no anular externo descartou-se a seção 5 para simplificar a geometria analisada.

Após a definição da geometria, e divisão do poço em seções *s*, alimenta-se o perfil geotérmico, que é utilizado como condição inicial para o poço sem fluxo na coluna de produção. No poço em questão utilizou-se um perfil geotérmico equivalente ao tipo de poço de pré-sal adotado, conforme Figura 4.3.

De posse do perfil geotérmico define-se a massa específica e composição do fluido de perfuração das fases, que estarão confinados nos anulares do poço. Em um poço típico de pré-sal são comuns massas especícicas de fluido da ordem de 11 a 13 ppg para perfurar trechos com evaporitos e, no caso do poço escolhido, reservatórios com pressão moderada. Em resumo, para a fase de 12 ¼" x 14 ¾" e 8 ½" foi definido uma massa específica de fluido em torno de 12,0 ppg. Para a fase de 17 ½", para simplificação na análise do APB, também foi utilizado massa específica de fluido em torno de 12,0 ppg, porém são mais comuns valores da ordem de 10 a 11 ppg no pós-sal.



Figura 5.1: Massa específica do fluido composicional em função de propriedades PVT (Zamora, et al., 2013).

A partir dos parâmetros da Tabela 4.1, e composição apresentada no capítulo 4.2, elaborou-se a curva PVT do fluido de perfuração em função de diversas faixas de temperatura e pressão, conforme Figura 5.1. Na coluna de produção assumiu-se óleo mineral puro sendo as constantes também referenciadas na coluna 4 da Tabela 4.1.

Com a geometria de poço definida, perfil geotérmico alimentado e composição de fluido definida, arbitrou-se uma vazão de produção típica para o poço e determinou-se o perfil de temperatura nos anulares e revestimentos durante a produção em regime estacionário, que é o cenário mais adverso. Como determinar o perfil de temperatura não é o foco da dissertação, e o conhecimento de transferência térmica é amplamente difundido, utilizou-se o simulador Wellcat para obtenção dos perfis térmicos para produção de 5000 bbl/d.

Para facilitar a entrada de dados no código programado no Matlab foram efetuadas regressões estatísticas nos pontos dos perfis de temperatura fornecidos pelo Wellcat (Figura 4.3), para cada anular e revestimento em função da profundidade, com auxílio do programa Excel 2013.





Figura 5.2: Perfis térmicos gerados a partir das eq. (5.1) a (5.10) utilizando dados da simulação térmica realizada no Wellcat.

Os resultados das regressões são apresentados na Figura 5.2 e as equações das curvas que compõem este gráfico são apresentadas a seguir:

Gradiente Geotérmico:

$$T_{\text{geo},k} = 103,22.\ln(k) - 769,09\,[^{\circ}\text{C}]$$
(5.1)

Gradiente de temperatura do fluido no interior do tubing de produção:

$$T2_{tub,k} = 16,15 \cdot \ln(k) - 12,90 [^{\circ}C]$$
(5.2)

Gradiente de temperatura para o estado de equilíbrio no anular A:

$$T2_{a1,k} = 27,82 \cdot \ln(k) - 115,12 [°C]$$
(5.3)

Gradiente de temperatura para o estado de equilíbrio no anular B:

$$T2_{a2,k} = 39,02 \cdot \ln(k) - 212,18 [°C]$$
(5.4)

Gradiente de temperatura para o estado de equilíbrio no anular C:

$$T2_{a3,k} = 53,01 \cdot \ln(k) - 329,65 [°C]$$
(5.5)

Gradiente de temperatura para o estado de equilíbrio no anular D:

$$T2_{a4,k} = 53,01 \cdot \ln(k) - 329,65 [°C]$$
(5.6)

Gradiente de temperatura no estado de equilíbrio do tubing:

$$T2_{R1,k} = 18,01 \cdot \ln(k) - 30,26 [°C]$$
(5.7)

Gradiente de temperatura no estado de equilíbrio do revestimento 10 3/4":

$$T2_{R2,k} = 33,83 \cdot \ln(k) - 167,48 [°C]$$
(5.8)

Gradiente de temperatura no estado de equilíbrio do revestimento 13 5/8":

$$T2_{R3,k} = 44,41 \cdot \ln(k) - 257,94 [°C]$$
(5.9)

Gradiente de temperatura no estado de equilíbrio do revestimento 20":

$$T2_{R4,k} = 57,14 \cdot \ln(k) - 365,45 [°C]$$
(5.10)

As eq. (5.1) a (5.10) apresentaram muito boa correlação com os pontos do perfil térmico fornecidos pelo Wellcat. O erro obtido foi da ordem de 10⁻³, ou seja, inferior a 1°C no perfil térmico. Exceto para os 10 m abaixo do fundo do mar que sofrem influência maior da temperatura da água, mas sem grande prejuízo por ser uma extensão inferior a 1% da fase. Foram utilizadas correlações logaritmas para gerar as curvas e os resultados podem ser visualizados na Figura 5.2.

O passo seguinte foi alimentar o modelo de fluência de sal. Utilizou-se o software EPsal (Poiate & Amaral, 2014) para geração das taxas de fechamento do sal (halita) em função da massa especifica equivalente, soterramento e tempo. Para facilitar a entrada e manipulação dos dados, na programação realizada no Matlab, foram efetuadas regressões estatísticas nas curvas fornecidos pelo programa EPsal, em cada intervalo de profundidade e faixa de massa específica de fluido a partir do programa Excel 2013.

Os cálculos de fechamento do sal iniciam com os dados da curva a partir de 72 horas, pois se leva em consideração que o tempo de perfuração da fase, repasse do poço na retirada da coluna de perfuração e descida do revestimento ocorrem antes de confinar o fluido no anular. Assim não se contabiliza o período cujo transiente da curva de fechamento do sal é muito agudo e que afeta basicamente a perfuração do poço. Utilizou-se t_m para expressar a variável tempo, necessária para o cálculo da fluência, onde o subscrito *m* é o indicador do passo da iteração na rotina interna do código.

Para a profundidade de 4150 a 4250 m têm-se as seguintes equações:

$$\dot{\varepsilon}_{4200;12,0} = 2,9441 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,46736} \, [\rm{in/h}] \tag{5.11}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4200;12,5} = 2,0288 \cdot 10^{-4} \cdot t_{m}^{-0,44941} [in/h]$$
 (5.12)

$$\dot{\varepsilon}_{4200;13,0} = 1,1325 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,41242} \, [\rm{in}/\rm{h}] \tag{5.13}$$

$$\dot{\epsilon}_{4200;13.5} = 6,1853 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\rm m}^{-0,42392} \, [{\rm in}/{\rm h}]$$
(5.14)

$$\dot{\varepsilon}_{4200;14,0} = 2,2423 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\rm m}^{-0,79378} \, [\rm{in}/h]$$
(5.15)

$$\dot{\varepsilon}_{4200;14,5} = -1,1424 \cdot 10^{-5} \,[\text{in/h}] \tag{5.16}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4200;15,0} = -2,3055 \cdot 10^{-5} [in/h]$$
(5.17)

$$\dot{\varepsilon}_{4200;15,5} = -4,9203 \cdot 10^{-5} [in/h]$$
(5.18)

$$\dot{\varepsilon}_{4200;16,0} = -7,5351 \cdot 10^{-5} [in/h]$$
(5.19)



Figura 5.3: Evolução da fluência do sal na profundidade de 4200 m.

Para a profundidade de 4250 a 4350 m têm-se as seguintes equações:

$$\dot{\epsilon}_{4300;12,0} = 3,6724 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,45393} \, [{\rm in}/{\rm h}]$$
(5.20)

$$\dot{\varepsilon}_{4300;12,5} = 2,5397 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,43787} \, [\rm{in}/h] \tag{5.21}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4300;13,0} = 1,4197 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,40358} \, [\rm{in}/h] \tag{5.22}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4300;13.5} = 7,6071 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\rm m}^{-0,40718} \, [{\rm in/h}]$$
(5.23)

$$\varepsilon_{4300;14,0} = 1,0539 \cdot 10^{-5} \cdot t_{m}^{-0,47362} \text{ [in/h]}$$
(5.24)

$$\dot{\varepsilon}_{4300;14,5} = -1,0694 \cdot 10^{-5} \,[\text{in/h}] \tag{5.25}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4300;15,0} = -2,8913 \cdot 10^{-5} \,[\text{in/h}] \tag{5.26}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4300;15,5} = -6,2100 \cdot 10^{-5} [in/h]$$
(5.27)

 $\dot{\varepsilon}_{4300;16,0} = -9,5286 \cdot 10^{-5} \, [\text{in/h}] \tag{5.28}$



Figura 5.4: Evolução da fluência do sal na profundidade de 4300 m.

Para a profundidade de 4350 a 4450 m têm-se as seguintes equações:

$$\dot{\varepsilon}_{4400;12,0} = 4,9869 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,46667} \, [\rm{in/h}] \tag{5.29}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4400;12,5} = 3,2533 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,43829} \, [\rm{in}/h] \tag{5.30}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4400;13,0} = 1,6222 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,37986} \, [\rm{in}/h] \tag{5.31}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4400;13.5} = 8,6310 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\rm m}^{-0,37791} \, [\rm{in}/h]$$
(5.32)

$$\dot{\varepsilon}_{4400;14,0} = 1,0538 \cdot 10^{-5} \cdot t_m^{-0,35242} [in/h]$$
 (5.33)

$$\dot{\varepsilon}_{4400;14,5} = -1,7698 \cdot 10^{-5} \,[\text{in/h}] \tag{5.34}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4400;15,0} = -3,6597 \cdot 10^{-5} [in/h]$$
 (5.35)

$$\dot{\varepsilon}_{4400;15,5} = -7,9109 \cdot 10^{-5} [in/h]$$
 (5.36)

$$\dot{\varepsilon}_{4400;16,0} = -1,2162 \cdot 10^{-4} \,[\text{in/h}] \tag{5.37}$$



Figura 5.5: Evolução da fluência do sal na profundidade de 4400 m.

Para a profundidade de 4450 a 4550 m têm-se as seguintes equações:

$$\dot{\varepsilon}_{4500;12,0} = 5,7913 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,44856} \, [{\rm in}/{\rm h}]$$
(5.38)

$$\dot{\varepsilon}_{4500;12,5} = 3,7025 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,41611} \, [\rm{in}/h] \tag{5.39}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4500;13,0} = 1,7770 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,35001} \, [\rm{in}/h] \tag{5.40}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4500;13.5} = 9,5221 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\rm m}^{-0,34538} \, [\rm{in}/h] \tag{5.41}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4500;14,0} = 1,3225 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\rm m}^{-0,29787} \, [\rm{in}/\rm{h}] \tag{5.42}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4500;14,5} = -1,6567 \cdot 10^{-5} \,[\text{in/h}] \tag{5.43}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4500;15,0} = -4,6634 \cdot 10^{-5} \,[\text{in/h}] \tag{5.44}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4500;15,5} = -1,0141 \cdot 10^{-4} \, [\text{in/h}] \tag{5.45}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4500;16,0} = -1,5619 \cdot 10^{-4} \, [\text{in/h}] \tag{5.46}$$



Evolução da Fluência do Sal no Tempo (4500)

Figura 5.6: Evolução da fluência do sal na profundidade de 4500 m.

Para a profundidade de 4550 a 4650 m têm-se as seguintes equações:

$$\dot{\varepsilon}_{4600;12,0} = 6,6208 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,42891} \, [\rm{in}/h] \tag{5.47}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4600;12,5} = 4,1639 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,39302} \, [\rm{in}/\rm{h}] \tag{5.48}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4600;13,0} = 1,9406 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,32072} \, [\rm{in}/h] \tag{5.49}$$

$$\dot{\epsilon}_{4600;13.5} = 1,0593 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,31597} \, [in/h]$$
(5.50)

$$\dot{\epsilon}_{4600;14,0} = 1,8241 \cdot 10^{-5} \cdot t_m^{-0,27533} [in/h]$$
 (5.51)

$$\dot{\varepsilon}_{4600;14,5} = -2,8203 \cdot 10^{-5} [in/h]$$
 (5.52)

$$\dot{\varepsilon}_{4600;15,0} = -5,9629 \cdot 10^{-5} \,[\text{in/h}]$$
(5.53)

$$\dot{\varepsilon}_{4600;15,5} = -1,3036 \cdot 10^{-4} \, [in/h]$$
(5.54)

$$\dot{\varepsilon}_{4600;16,0} = -2,0110 \cdot 10^{-4} \text{ [in/h]}$$
(5.55)



Figura 5.7: Evolução da fluência do sal na profundidade de 4600 m.

Para a profundidade de 4650 a 4750 m foram alimentadas as seguintes equações:

$$\dot{\varepsilon}_{4700;12,0} = 7,5405 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,40966} \, [\rm{in/h}] \tag{5.56}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4700;12,5} = 4,7064 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,37187} \, [\rm{in/h}] \tag{5.57}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4700;13,0} = 2,1707 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,29671} \, [\rm{in/h}] \tag{5.58}$$

$$\dot{\epsilon}_{4700;13.5} = 1,2158 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,29358} \, [\rm{in}/h]$$
(5.59)

$$\dot{\varepsilon}_{4700;14,0} = 2,6180 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\rm m}^{-0,27013} \, [{\rm in}/{\rm h}]$$
(5.60)

$$\dot{\varepsilon}_{4700;14,5} = -2,6195 \cdot 10^{-5} \,[\text{in/h}] \tag{5.61}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4700;15,0} = -1,2401 \cdot 10^{-4} \,[\text{in/h}] \tag{5.62}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4700;15,5} = -1,9141 \cdot 10^{-4} [in/h]$$
(5.63)

 $\dot{\epsilon}_{4700;16,0} = -2,5881\cdot 10^{-4}~[in/h]$



Figura 5.8: Evolução da fluência do sal na profundidade de 4700 m.

Para a profundidade de 4750 a 4850 m têm-se as seguintes equações:

$$\dot{\varepsilon}_{4800;12,0} = 8,6250 \cdot 10^{-4} \cdot t_m^{-0,39209} [in/h]$$
(5.65)

$$\dot{\varepsilon}_{4800;12,5} = 5,4033 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,35438} \, [{\rm in}/{\rm h}]$$
(5.66)

$$\dot{\epsilon}_{4800;13,0} = 2,5252 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,28051} \, [{\rm in/h}]$$
(5.67)

$$\dot{\epsilon}_{4800;13.5} = 1,4533 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,27978} \, [{\rm in}/{\rm h}]$$
(5.68)

$$\dot{\epsilon}_{4800;14,0} = 3,8031 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\rm m}^{-0,27458} \, [\rm{in}/h]$$
(5.69)

$$\dot{\varepsilon}_{4800;14,5} = -4,5345 \cdot 10^{-5} \,[\text{in/h}] \tag{5.70}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4800;15,0} = -9,7415 \cdot 10^{-5} \,[\text{in/h}] \tag{5.71}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4800;15,5} = -2,1482 \cdot 10^{-4} [in/h]$$
 (5.72)

(5.64)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221992/CA

 $\dot{\epsilon}_{4800;16,0} = -3,3222\cdot 10^{-4}~[in/h]$



Figura 5.9: Evolução da fluência do sal na profundidade de 4800 m.

Para a profundidade de 4850 a 4950 m têm-se as seguintes equações:

$$\dot{\varepsilon}_{4900;12,0} = 9,9528 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,37685} \, [\rm{in}/h] \tag{5.74}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4900;12,5} = 6,3305 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,34126} \, [\rm{in}/h] \tag{5.75}$$

$$\dot{\epsilon}_{4900;13,0} = 3,6609 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,27270} \, [{\rm in}/{\rm h}]$$
(5.76)

$$\dot{\epsilon}_{4900;13.5} = 1,8086 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,27437} \, [in/h]$$
(5.77)

$$\dot{\varepsilon}_{4900;14,0} = 5,5034 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\rm m}^{-0,28407} \, [\rm{in}/\rm{h}] \tag{5.78}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4900;14,5} = -4,1563 \cdot 10^{-5} [in/h]$$
 (5.79)

$$\dot{\varepsilon}_{4900;15,0} = -1,2401 \cdot 10^{-4} \,[\text{in/h}] \tag{5.80}$$

$$\dot{\varepsilon}_{4900;15,5} = -2,7442 \cdot 10^{-4} \, [\text{in/h}] \tag{5.81}$$

(5.73)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221992/CA

 $\dot{\epsilon}_{4900;16,0} = -4,\!2483\cdot 10^{-4}~[in/h]$



Figura 5.10: Evolução da fluência do sal na profundidade de 4900 m.

E, finalmente, para a profundidade de 4950 a 5000 m tem-se:

$$\dot{\varepsilon}_{5000;12,0} = 1,1018 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\rm m}^{-0,35304} \, [{\rm in}/{\rm h}]$$
(5.83)

$$\dot{\varepsilon}_{5000;12,5} = 7,3205 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,32528} \, [{\rm in}/{\rm h}]$$
(5.84)

$$\dot{\varepsilon}_{5000;13,0} = 3,8693 \cdot 10^{-4} \cdot t_m^{-0,27232} \text{ [in/h]}$$
(5.85)

$$\dot{\varepsilon}_{5000;13.5} = 2,3250 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\rm m}^{-0,27584} \, [{\rm in}/{\rm h}]$$
(5.86)

$$\dot{\varepsilon}_{5000;14,0} = 7,8526 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\rm m}^{-0,29556} \, [\rm{in}/h] \tag{5.87}$$

$$\dot{\varepsilon}_{5000;14,5} = -7,2487 \cdot 10^{-5} [in/h]$$
 (5.88)

$$\dot{\varepsilon}_{5000;15,0} = -1,5727 \cdot 10^{-4} \,[\text{in/h}] \tag{5.89}$$

$$\dot{\varepsilon}_{5000;15,5} = -3,4906 \cdot 10^{-4} \,[\text{in/h}] \tag{5.90}$$

(5.82)

Evolução da Fluência do Sal no Tempo (4900)

 $\dot{\varepsilon}_{4900;16,0} = -5,4084 \cdot 10^{-4}$ [in/h]



Figura 5.11: Evolução da fluência do sal na profundidade de 5000 m.

Para o intervalo de massa específica de fluido equivalente entre 12,0 e 14,0 ppg (coluna hidrostática + APB) a regressão de potência mostrou-se uma boa opção com correlação elevada. Para a abertura do sal foi adotado valor de taxa constante. Este critério foi assumido pelo fato do comportamento da fluência do sal para abertura, nas primeiras 48h após o corte da rocha, ser difícil de representar aplicando regressão nos pontos. Logo, para os intervalos de massa específica de fluido equivalente de 14,25 a 16,0 ppg adotou-se um valor constante na taxa de fluência, que corresponde a fluência após 480 h decorridas desde a perfuração da rocha.

Ressalta-se que o software EPsal afirma que o modelo não está totalmente validado para massa específica de fluido superior a 14,25 ppg que normalmente reverte a fluência do sal, embora o modelo de duplo mecanismo prevê a reversão do fechamento do sal para abertura, assim como alguns indícios de campo.

80

Evolução da Fluência do Sal no Tempo (5000)

5.2. Validação do Modelo

O código para cálculo de APB, programado no Matlab, foi validado através da utilização do software comercial Wellcat, que é amplamente empregado na indústria do petróleo. Alguns dos empregos mais frequentes do Wellcat são em cálculo de perfis térmicos de produção, simulação de APB e cálculo de esforços em revestimentos e equipamentos do poço. Porém este software não inclui particularidades referentes à fluência do sal, cargas originadas de cimentação de revestimentos descentralizados, canalizações, etc. Estes são parâmetros que são calculados normalmente em softwares que utilizam elementos finitos.

Como o pacote de fluência do sal não está incluso no Wellcat, realizou-se a validação da proposta da dissertação em uma etapa intermediária, que inclui apenas o APB resultante da carga térmica. No código programado no Matlab, nomeado como APBsal, incluiu-se o cálculo da variação de volume decorrente da fluência do sal com o arquivo DVsal, conforme a proposta da eq. (4.36), e consequentemente as variáveis decorrentes deste cálculo como taxa de fluência em função do soterramento, temperatura e APB em função do tempo. O processo pode ser mais bem visualizado através do fluxograma apresentado na Figura 4.2.

Através da simulação no Wellcat obteve-se o perfil de temperatura da Figura 5.2, que foi utilizado nas simulações do código APBsal e equivale ao perfil térmico apresentado na Figura 4.3. Nota-se que há uma pequena diferença nos perfis de temperatura em torno da profundidade da cabeça do poço, que foi uma opção para preservar a boa correlação nas equações dos perfis de temperatura dos anulares e revestimentos gerados a partir dos pontos fornecidos pelo Wellcat. Porém, não introduz erro significativo na simulação de APB por tratar-se de um intervalo muito pequeno.

5.2.1. Simulação do APB para Seção de Poço Aberto Não Cimentado

Primeiramente calculou-se o APB para os fluidos padrões do Wellcat ajustando apenas a massa específica dos mesmos. Para a simulação considerou-se a produção de 5000 bbl/dia com o intervalo de sal não cimentado de 4150 a 5000 m, que corresponde à condição de contorno desenvolvida no capítulo 3.1.2. A seguir um quadro resumo com os topos de cimento e geometria do poço (Tabela 5.2 e Figura 5.12), que foram utilizadas no Wellcat e simuladas para efeitos de comparação e validação dos resultados obtidos com o código APBsal.

Revestimento	OD	ID	Hanger	TOC	Base	Poço	Fluido Sintético
	[in]	[in]	[m]	[m]	[m]	[in]	Padrão WellCat
Condutor	30	28	1800	1800	1872	36	-
Superfície	20	18	1800	1800	2800	26	-
Intermediário	13,625	12,375	1800	2799	4150	17,5	12 ppg
Produção	10,75	9,156	1800	5000	5400	14,75	12 ppg
Liner Prod.	7,0	6,0	5300	5300	5965	8 1/2	12 ppg
СОР	6 5/8	5,791	1800	-	5400	-	Diesel Oil

Tabela 5.2: Geometria para seção de poço aberto não cimentado.



Figura 5.12: Esquema para seção de poço aberto não cimentado.

O resultado de APB com o fluido padrão do Wellcat mostrou-se bastante elevado conforme Tabela 5.3.

Nomeneleture	Anular	Resultado do APB	Volume Incremental	
Nomenciatura	Referenciado	[psi]	do APB [bbl]	
А	10 ¾" x COP	6469	14,4	
В	13 5/8" x 10 ¾"	4474	13,3	
С	20" x 13 5/8"	8283	16,4	

Tabela 5.3: Resultado da simulação de APB no Wellcat para modelo "multistring" com anular não cimentado (Figura 5.12) e fluido padrão.

Para efetuar a calibração dos modelos de APB foi necessário utilizar um modelo PVT coerente com o que foi utilizado no código programado, pois o mesmo influencia muito no resultado. Optou-se por realizar nova simulação no Wellcat com as propriedades PVT da Tabela 4.1, que correspondem as curvas da Figura 5.1.

Tabela 5.4: Resultado de APB do Wellcat para simulação "multistring" com anular não cimentado (Figura 5.12) e fluido com PVT da Tabela 4.1.

Nomenclatura	Anular	Resultado do	Volume Incremental	
	Referenciado	APB [psi]	do APB [bbl]	
А	10 ¾" x COP	3939	5,6	
В	13 5/8" x 10 ¾"	2793	6,7	
С	20" x 13 5/8"	4881	7,8	

O resultado das simulações no Wellcat, apresentados na Tabela 5.3 e Tabela 5.4, para a mesma geometria de poço e mesmas massas específicas, foi muito diferente. A utilização de diferentes bases de fluido no modelo PVT resultou em diferença superior a 60% nos resultados de APB em todos os anulares, o que pode ser de extrema importância no dimensionamento dos revestimentos e equipamentos para produção de um poço ou um campo. Para a validação do código APBsal comparou-se os resultados com o Wellcat para a mesma geometria de poço e mesmo modelo PVT. A comparação dos resultados pode ser visualizada na Tabela 5.5, sendo a coluna 2 referente ao resultado para o fluido padrão do Wellcat e as colunas 3 e 4 para o modelo PVT composicional de Zamora:

Anular	WellCat [psi]	WellCat [psi]	APBsal [psi]	Diferença
Referenciado	Fluido Padrão	Zamora	Zamora	Zamora (%)
10 ¾" x COP (A)	6469	3939	4026	2,2
13 5/8" x 10 ¾" (B)	4474	2793	2792	0,0
20" x 13 5/8" (C)	8283	4881	4889	0,2

Tabela 5.5: Comparação de resultados do Wellcat e do código APBsal com anular não cimentado (Figura 5.12) para validação do programa.

Nota-se que os resultados calculados no código APBsal apresentaram bastante coerência com os valores gerados no Wellcat para o mesmo tipo de fluido (fluido Zamora). A diferença máxima entre os dois programas, conforme Tabela 5.5, foi da ordem de dois por cento no anular confinado entre os revestimentos de 10 3/4" e a coluna de produção de 6 5/8" (anular B). O resultado da simulação com o fluido padrão do Wellcat consta na segunda coluna apenas para ter-se ideia de sensibilidade do fenômeno de APB quanto ao modelo PVT.

5.2.2. Simulação do APB para Seção de Poço Aberto Cimentado

A validação de simulação térmica do código APBsal também foi realizada para o poço com a seção do evaporito totalmente cimentada, que corresponde a condição de contorno desenvolvida no capítulo 3.1.1. Nesta simulação também foi utilizado o modelo PVT de fluido com as constantes apresentadas por Zamora.

A seguir, um quadro resumo com os topos de cimento e geometria do poço (Tabela 5.6) que foram simuladas no Wellcat para validação do código APBsal, na condição de contorno de poço aberto com anulares cimentados. A única diferença em relação à simulação anterior encontra-se no topo de cimento do revestimento de produção, que está situado em frente ao intervalo com sal, conforme Figura 5.13. Tabela 5.6: Quadro resumo com geometria de poço simulada para seção de poço aberto com anulares cimentados até a sapata.

Revestimento	OD	ID	Hanger	TOC	Base	Poço	Fluido Sintético
	[in]	[in]	[m]	[m]	[m]	[in]	Padrão
Condutor	30	28	1800	1800	1872	36	-
Superfície	20	18	1800	1800	2800	26	-
Intermediário	13,625	12,375	1800	2799	4150	17,5	12 ppg
Produção	10,75	9,156	1800	4149	5400	14,75	12 ppg
Liner Prod.	7,0	6,0	5300	5300	5965	8 1/2	12 ppg
СОР	6 5/8	5,791	1800	-	5400	-	Diesel Oil



Figura 5.13: Esquema para seção de poço aberto cimentada.

O resultado obtido no Wellcat, com o modelo PVT de Zamora para poço aberto com anulares cimentados, foi bem coerente com o apresentado para o poço com a seção de poço aberto não cimentada, conforme Tabela 5.7.

Nomenclatura	Anular	Resultado do	Volume Incremental	
	Referenciado	APB [psi]	do APB [bbl]	
А	10 ¾" x COP	4256	5,6	
В	13 5/8" x 10 ¾"	4626	4,3	
С	20" x 13 5/8"	5237	7,8	

Tabela 5.7: Resultado de APB do Wellcat para simulação "multistring" com anular cimentado (Figura 5.13) e fluido com PVT da Tabela 4.1.

A diferença mais relevante ocorreu no anular B (Figura 5.13) com aumento de pressão superior a 60%, devido ao preenchimento do espaço anular com cimento e consequente redução do volume. Para o anular A e C, que mantiveram a mesma geometria, o aumento de pressão foi próximo de 8%, o que confirma a interferência da elevação de pressão no anular B no resultados dos anulares adjacentes.

Os resultados obtidos no código APBsal apresentaram valores bem próximos aos obtidos pelo Wellcat para a geometria da Figura 5.13 e mesmo fluido da simulação anterior, conforme tabela a seguir:

Tabela 5.8: Comparação de resultados do Wellcat e do código APBsal com poço aberto cimentado (Figura 5.13) para validação do programa.

Apular Avaliado	APBsal [psi]	WellCat [psi]	Diferença (%)	
Anulai Availauo	Zamora	Zamora	Zamora	
6 5/8" x 10 ¾"	4382	4256	+3,0	
10 ³ ⁄4" x 13 5/8"	4600	4626	-0,6	
13 5/8" x 20"	5160	5237	-1,5	

De um modo geral os resultados apresentados pelo código APBsal para a condição de contorno com seção de poço aberto cimentado também apresentaram um bom resultado, com diferença máxima da ordem de 3% para o anular confinado entre a coluna de produção e o revestimento de produção (anular A), conforme Tabela 5.8.

5.2.3. Possíveis Fontes de Diferença nos Resultados Simulados

Os resultados de APB obtidos no código APBsal, para o aquecimento do poço durante a produção, mostraram valores com uma diferença muito pequena quando comparados com os resultados do Wellcat, que é um simulador comercial de grande abrangência. As diferenças nos resultados das simulações podem ser atribuídas a diversas causas, entre as quais se destaca:

- Valor adotado para o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das formações (folhelho, sal, arenito): Para o código APBsal foram assumidos para a formação o módulo de elasticidade e a constante de Poisson do cimento, obtidos na literatura (Jandhyala, et al., 2013), e considerados constantes ao longo de todo o perfil do poço. Sabe-se que há grande variação dessas propriedades em função da profundidade e tipo de rocha.

- Consideração do cimento e rocha como homogêneos: Foi assumido que o cimento e a formação apresentam valores de mesma ordem de grandeza (Sathuvalli, et al., 2005), conforme condições de contorno desenvolvidas no capítulo 3.1. Deste modo obteve-se uma simplificação na modelagem da geometria do poço no código APBsal.

 Condição inicial de instalação da coluna de produção: Foi assumido que no momento da instalação da coluna de produção tem-se a pressão da hidrostática do fluido de perfuração no seu interior.

- Aproximação no perfil de temperatura: Aproximou-se o perfil de temperatura no intervalo próximo a cabeça do poço (10 m) para não prejudicar a boa correlação dos perfis térmicos obtidos por regressão nos dados fornecidos pelo Wellcat no restante do perfil do poço.

 Propriedades PVT do fluido produzido: Não foram alimentadas no Wellcat as propriedades PVT do fluido produzido, o que pode ter gerado alguma diferença nos resultados de APB referentes ao anular A quando comparados os resultados com o código APBsal.

 Premissas de modelagem diferentes: Possibilidade de adoção de algum critério diferente na modelagem das condições de contorno do código APBsal e no código do Wellcat.

5.3. Simulação do APB

O objetivo da dissertação é avaliar a influência do fechamento do sal nas pressões dos anulares do poço e calcular o APB resultante deste carregamento (APB do sal). São considerados dois cenários para análise: (1) simulação do APB resultante apenas da fluência do sal e (2) simulação de fluência do sal por um determinado período seguido de produção do poço, acoplando o fenômeno do APB do sal e APB térmido.

Na simulação utilizou-se o esquema de poço apresentado na Figura 5.12, em que se um intervalo de 850 m de poço aberto não cimentado no anular B. Este intervalo não cimentado está preenchido com fluido de perfuração e está confinado entre o revestimento de 10 ³/₄" e a coluna de sal na fase 12 ¹/₄" x 14 ³/₄".

5.3.1. Simulação do APB para Fluência do Sal com Poço sem Fluxo

Para a simulação do primeiro caso, com avaliação do comportamento do APB em função apenas da fluência do sal, optou-se por efetuar a análise no período de 480 dias (t_{final}) com um passo de tempo Δt de 24 h nas simulações de fechamento do sal, conforme fluxograma apresentado na Figura 4.2. Neste caso foi considerado poço sem fluxo e não se aplicou a carga térmica proveniente da produção. O passo Δt é um parâmetro importante na determinação da taxa de fechamento do sal, conforme Figura 5.3 a Figura 5.11, pois o comportamento da fluência do sal muda com o tempo devido às características do próprio evaporíto como também devido à variação da tensão efetiva ou desviatória atuante na parede do poço, conforme eq. (2.19).

Para melhor análise do resultado de APB, devido ao fechamento do sal, é apresentada a Figura 5.14 com a evolução da taxa de fechamento do sal no tempo. Pode-se atribuir parte desse efeito de queda na taxa de fechamento do sal ao próprio APB gerado pela redução no volume do anular. Pode-se afirmar que a fluência é mais elevada para profundidades maiores, devido à elevação de temperatura que ocorre no perfil geotérmico e devido à maior tensão efetiva gerada na diferença entre a sobrecarga e a pressão da coluna hidrostática + APB.



Taxa de Fechamento Radial do Sal com APB

Figura 5.14: Evolução da taxa de fechamento do sal no período de 240 dias considerando o efeito de APB na fluência.

Em profundidades mais rasas o efeito do APB na massa específica equivalente de fluido é mais pronunciado, conforme eq. (4.29), pois há um menor soterramento do sal. Deste modo há uma inversão no sentido de fluência do sal, que acarreta no fechamento do sal no intervalo mais profundo e aumento no diâmetro do poço no intervalo de sal mais raso a partir do equilíbrio dinâmico no volume do anular.



Evolução do Diametro do Poço no Sal com o APB

Figura 5.15: Evolução do diâmetro do poço no período de 480 dias em função da fluência do sal no anular B para diferentes profundidades.

A integral da taxa de fechamento do sal, apresentada na Figura 5.14, é apresentada claramente na Figura 5.15. Nota-se o fechamento do poço mais acentuado na porção mais profunda (curvas de 4800 e 5000 m) e que prossegue com uma velocidade constante a partir do ponto de equilíbrio dinâmico que está em torno de 378 dias. No intervalo superior do evaporito ocorre uma inversão no sentido da fluência do sal que passa do comportamento de redução para aumento do diâmetro do poço. Para as curvas do intervalo de 4400 e 4600 m o fechamento do poço é menos acentuado e torna-se praticamente nulo no equilíbrio dinâmico (Figura 5.16).





Figura 5.16: Equilíbrio dinâmico do volume do anular B em função da fluência do sal no período de 480 dias.

Na Figura 5.17 tem-se uma melhor visualização da evolução da massa específica equivalente resultante do efeito de APB do sal somado à hidrostática do fluido de perfuração nas profundidades de 4200, 4400, 4600, 4800 e 5000 m. Esse fato ajuda a entender o porquê da reversão no sentido de fluência do sal no intervalo superior do evaporito.



Figura 5.17: Evolução da massa específica equivalente, incluído o APB devido à fluência do sal, em diferentes intervalos de profundidade.

Através do cálculo do perfil de fechamento do sal obtém-se a variação de volume no intervalo de poço aberto do anular B devido à fluência do evaporito, conforme eq. (4.32). O resultado é apresentado na Figura 5.18 a seguir.



Figura 5.18: Evolução do volume de fechamento do sal no intervalo de poço aberto do anular B no período de 480 dias.

Após o cálculo do perfil de fechamento na seção de sal do intervalo de poço aberto do anular B é calculada a variação de volume total nos anulares e o APB do sal, conforme eq. (4.33).



Figura 5.19: Evolução da variação de volume total dos anulares devido ao APB gerado pela fluência do sal.



Figura 5.20: Crescimento de pressão nos anulares devido à fluência do sal (APB do sal).

Ressalta-se que a redução de volume no anular B verificada na figura 5.18, calculado a partir da eq. (4.32), é superior à redução de volume do anular B

verificada na figura 5.19, calculado a partir da eq. (4.36). Isto ocorre porque essa redução de volume na seção de poço aberto, equivalente ao intervalo em frente ao evaporito, gera uma compressão do fluido neste anular. Essa compressão do fluido gera um aumento de pressão, que expande o anular B contra os anulares adjacentes e formação no intervalo acima do evaporito. Consequentemente, há um novo equilíbrio de volume nos anulares, que resulta no APB do sal verificado na Figura 5.20.

Reafirma-se que estabilização das pressões nos anulares da Figura 5.20 ocorre em consonância com a estabilização no volume dos anulares, expresso na Figura 5.16, no ponto de equilíbrio dinâmico, decorrido o período de 378 dias do confinamento do fluido de perfuração nos anulares.

5.3.2. Simulação do APB para Poço em Fluxo após Fluência do Sal

O principal objetivo desse trabalho é ressaltar a importância de considerar o crescimento de pressão no anular resultante da fluência do sal (APB do sal) em poços que serão colocados em produção ou teste de formação após um longo período de tempo com o sal fluindo no anular. Primeiramente simula-se o comportamento das pressões dos anulares na produção do poço referentes apenas à carga térmica, isto é, sem considerar a fluência do sal. Para a geometria de poço adotada, que corresponde ao esquema apresentado na Figura 5.12, os resultados foram calculados e apresentados na validação do programa APBsal para anular não cimentado, conforme Tabela 5.5.

O passo seguinte foi conhecer a redução de volume na seção de poço aberto em contato com o evaporito do anular B, conforme Figura 5.18. Calculadas as variações de volume decorrentes da fluência do sal, simula-se a carga térmica acoplando essa variação de volume, decorrente da fluência do sal em diversos períodos de tempo decorrido, através de balanço de massa conforme eq. (4.36) e eq. (4.37).

A Figura 5.21 apresenta o APB acoplado gerado quando o poço é colocado em produção após 56 dias do confinamento do fluido do anular B. Verifica-se que a pressão, devido à fluência do sal, atinge 1009 psi com o poço em estática e 3801 psi após o início da produção do poço. Isso sugere um acréscimo de 36% no valor de 2792 psi da Tabela 5.5, decorrente apenas do efeito térmico.



Análise de APB Acoplando Fluência do Sal

Figura 5.21: Simulação de APB acoplado com início da produção do poço após 56 dias de fluência do sal.

A Figura 5.22 apresenta o APB acoplado gerado quando o poço é colocado em produção após 196 dias do confinamento do fluido do anular B. Verifica-se que a pressão, devido à fluência do sal, atinge 1596 psi com o poço em estática e 4388 psi após o início da produção do poço. Isso sugere um acréscimo de 57% no valor de APB decorrente apenas do efeito térmico.



Figura 5.22: Simulação de APB acoplado com início da produção do poço após 196 dias de fluência do sal.

A Figura 5.23 apresenta o APB acoplado gerado quando o poço é colocado em produção após 378 dias do confinamento do fluido do anular B. Nesse ponto ocorre o equilíbrio dinâmico no volume do anular B, quando o APB do sal se estabiliza. Verifica-se que a pressão atinge 1786 psi com o poço em estática e 4578 psi após o início da produção do poço. Isso significa um acréscimo de aproximadamente 64% no valor de APB decorrente apenas do efeito térmico.



Figura 5.23: Simulação de APB acoplado com início da produção do poço após 378 dias de fluência do sal.

A curva mais importante deste estudo, relacionando o resultado de APB acoplado à produção do poço após um determinado período de fluência do sal, é apresentada na Figura 5.24. Essa curva foi elaborada incluindo as curvas de APB devido ao fechamento do sal e as curvas de APB para início da produção em até 480 dias com o efeito acoplado. Foram também inseridos os pontos de APB acoplados apresentados na Figura 5.21, Figura 5.22 e Figura 5.23 para facilitar o entendimento.

95



Evolução do APB Térmico Acoplando Fluência do Sal

Figura 5.24: Cálculo do crescimento de pressão nos anulares associando fechamento do sal para início da produção do poço em diversos períodos.

Tempo [dias]	Pressão Anular A	Pressão Anular B	Pressão Anular C
	[psi]	Seção de Sal [psi]	[psi]
0	4026	2792	4889
14	4110	3223	4950
28	4158	3469	4991
42	4197	3650	5017
56	4225	3801	5038
70	4246	3914	5056
84	4266	4012	5072
98	4282	4089	5082
112	4291	4149	5092
126	4305	4210	5100
140	4314	4255	5105
154	4324	4294	5115
168	4329	4329	5118
182	4334	4361	5123
196	4340	4388	5126

Tabela 5.9: Evolução do APB térmico acoplado ao APB do sal.

210	4344	4414	5132
224	4349	4437	5135
238	4352	4458	5138
252	4359	4476	5140
266	4359	4491	5145
280	4362	4504	5146
294	4367	4516	5148
308	4367	4528	5148
322	4369	4539	5151
336	4373	4548	4154
350	4373	4558	5154
364	4372	4568	5154
378	4377	4578	5157
392	4376	4578	5157
406	4376	4578	5157
420	4376	4578	5157
434	4376	4578	5157
448	4376	4578	5157
462	4376	4578	5157
476	4376	4578	5157

A Tabela 5.9, com a evolução do APB térmico acoplado ao APB do sal, apresenta os valores dos pontos utilizados na construção da curva da Figura 5.24 até o momento do equilíbrio das pressões devido ao fechamento do sal. Os resultados são apresentados em passos de 14 dias de tempo (2 semanas) para facilitar a percepção da fluência do sal no resultado acoplado.

Para os valores de APB apresentados na Tabela 5.9 calcularam-se as massas específicas equivalentes nas profundidades de 4200, 4400, 4600, 4800 e 5000 m no período de 480 dias (Figura 5.25), a fim de facilitar a percepção da influência do APB em função da profundidade.



Evolução da Massa Específica Equivalente no Anular B

Figura 5.25: Cálculo da massa específica equivalente associando o efeito de APB acoplado nas profundidades de 4200, 4400, 4600, 4800 e 5000 m.

Nota-se que nas zonas superiores a massa específica equivalente é mais alta no momento em que o poço é colocado em produção, devido ao menor soterramento, conforme (4.29) citada anteriormente. Essa informação é importante para prever o comportamento do sal após o início da produção. Como se observa, há uma reversão no sentido de fluência do sal de fechamento para abertura do diâmetro do poço, conforme as curvas das figuras 5.3 a 5.11, quando a massa específica equivalente ultrapassa determinado valor para cada profundidade e tempo. Em cenários considerando fratura do sal esta informação é bastante relevante.