

## 4

### Algoritmo para o Cálculo do APB com Efeito da Fluência do Sal

A inicialização do programa é feita com a alimentação dos parâmetros de geometria do poço (código Geometria), perfis de temperatura (código Temperatura) e, posteriormente, com o cálculo das massas específicas dos fluidos dos anulares na condição de pressão e temperatura inicial, através do código PVT1. De posse das massas específicas e geometria do poço são calculados o volume e massa de fluido, em cada intervalo  $k$  de cada anular  $i$ . Deve-se saber que, para modelagem do fenômeno de APB, o poço é dividido em seções  $s$  compostas por intervalos  $k$  e que a seção  $s$  é caracterizada por uma extensão do poço com geometria e condições de contorno semelhantes, conforme Figura 4.1).

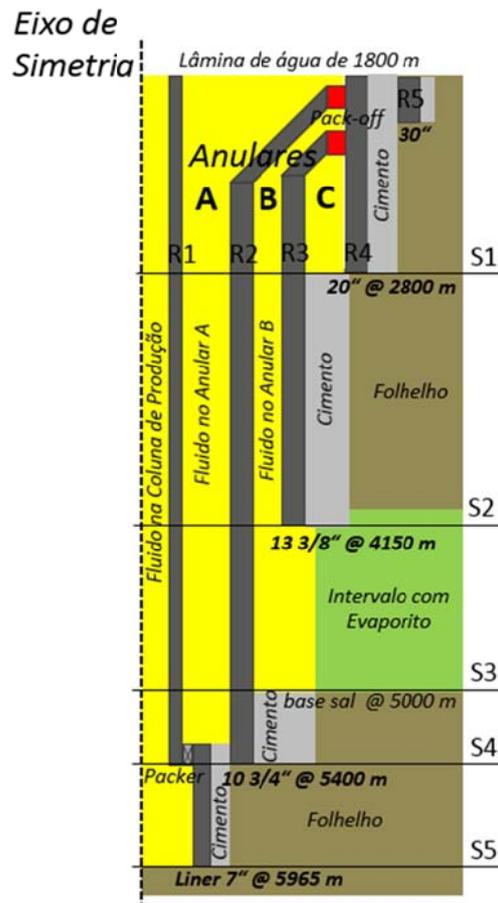


Figura 4.1: Configuração convencional de um poço marítimo.

A rotina prossegue com o cálculo do perfil de pressão do poço para nova condição de equilíbrio, resultante da variação de volume nos anulares com a fluência do sal ou variação do perfil de temperatura no poço durante a produção. Para isso são efetuados cálculos iterativos do perfil de massa específica do fluido a partir do perfil de pressão hidrostática, perfil de temperatura no anular analisado e APB gerado no próprio anular e anulares adjacentes.

A rotina tem início a partir de uma estimativa inicial de APB, que calcula a massa específica do fluido de modo iterativo até a convergência através do código PVT2. Com o perfil de massa específica do fluido do poço na nova condição de equilíbrio, calcula-se fluência do sal no intervalo não cimentado do anular do poço no passo de tempo  $\Delta t$ , através do código DVsal, e calcula-se a variação de volume do anular. Na etapa seguinte, calcula-se a variação de volume em cada anular, resultante de incremento no perfil de pressão e temperatura dos anulares, através do código LamFlex que utiliza a solução de Lamé.

De posse da variação de volume dos anulares, devido à fluência do sal, incremento de pressão e expansão térmica do aço, estima-se o APB que resulta em conservação de massa do fluido nos anulares. Nesta etapa, realiza-se um balanço de massa e compara-se a massa de fluido na condição inicial e na nova condição de equilíbrio em cada anular, através do código BMassa. Esta condição é satisfeita quando a variação de volume dos anulares é igual à variação de volume do fluido contido nos anulares, segundo eq. (2.14), considerando como volume de controle o anular fechado e selado.

No problema modelado foi utilizado o método de bisseção para calcular o valor de APB, sendo 0 psi o intervalo inferior de busca e 10.000 psi o intervalo superior de busca. Diversas iterações são realizadas até obter o valor de APB, que satisfaz a condição de conservação de massa. O método numérico de convergência, e todas as rotinas programadas, são compiladas e manipuladas através do código principal APBsal. Um melhor entendimento do código descrito pode ser obtido através do fluxograma apresentado na Figura 4.2).

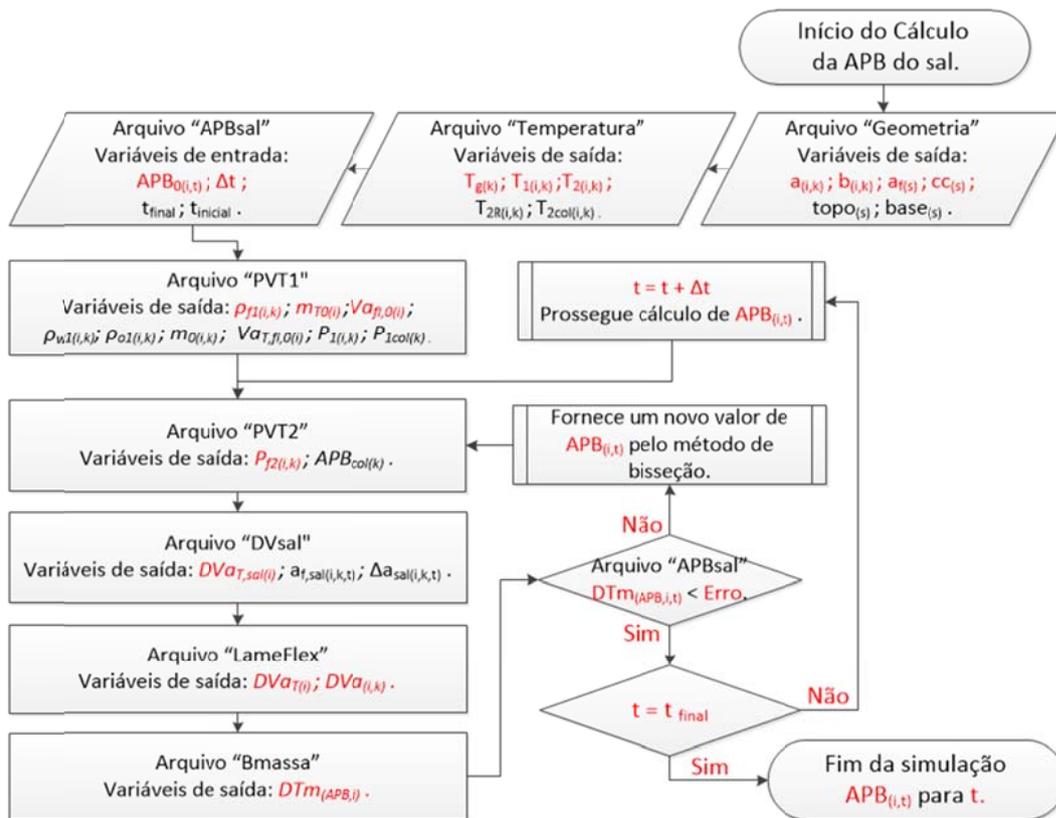


Figura 4.2: Fluxograma do processo de cálculo do APB do sal.

#### 4.1. Geometria e Perfis de Temperatura

O primeiro passo do programa é a alimentar os perfis de temperatura, que serão utilizados para determinar a condição 1 (inicial) e a condição 2 do fluido (equilíbrio ou final). O perfil de temperatura adotado para a condição inicial do fluido é o perfil geotérmico do poço. Deve-se lembrar de que durante a perfuração da fase do poço há uma mudança no perfil térmico, devido ao resfriamento das rochas na circulação do fluido de perfuração. Porém o tempo para equipar o poço é razoavelmente suficiente para o poço voltar à condição inicial de temperatura.

O perfil térmico na nova condição de equilíbrio do poço depende de diversos fatores, que englobam o perfil geotérmico, a vazão de produção do poço, a geometria do poço, as propriedades dos fluidos, as propriedades do aço, etc. Este perfil térmico deve ser obtido para cada anular e coluna de revestimento, com a finalidade de calcular as dilatações do aço e expansão térmica dos fluidos com maior precisão. Normalmente utilizam-se simuladores comerciais, próprios da área de petróleo, para o cálculo do perfil térmico transiente e estacionário de testes

de formação e produção. É muito importante a obtenção de valores confiáveis nos perfis de temperatura para não introduzir erros significativos nos cálculos de APB. Para a dissertação utilizou-se o Wellcat, que é um software comercial de grande abrangência no mundo do petróleo, a fim de calcular os perfis de temperatura em cada anular e revestimento, na condição de produção de 5000 bbl/dia em estado estacionário.

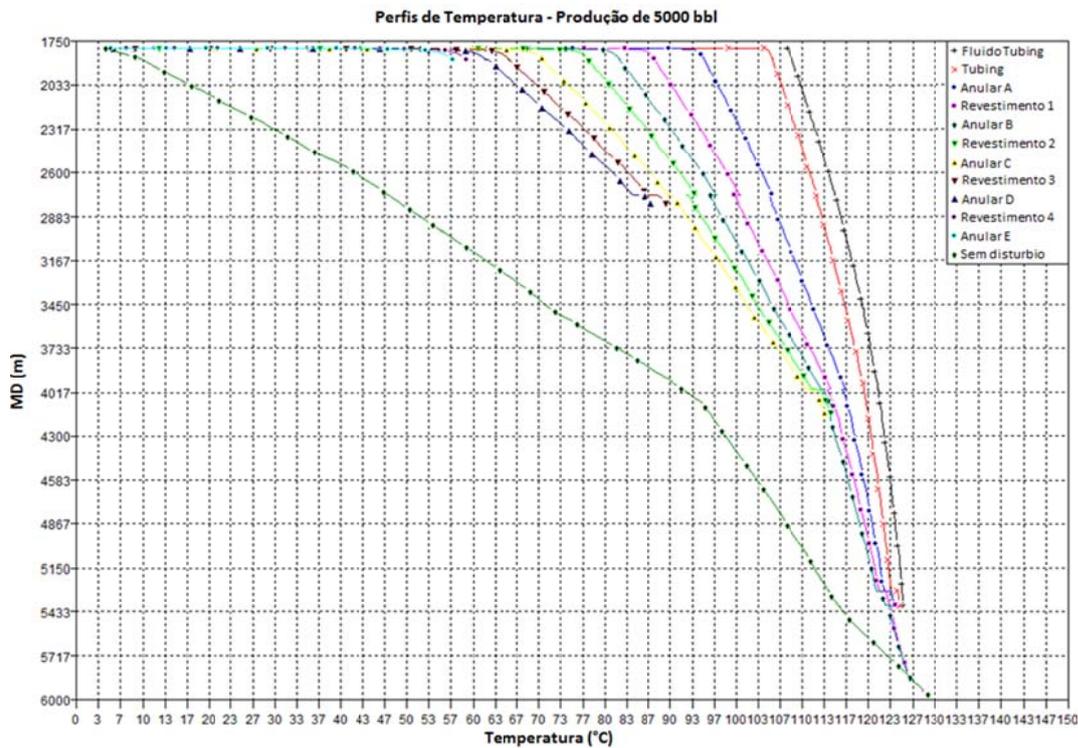


Figura 4.3: Perfis térmicos obtidos no Wellcat para produção de 5000 bbl/dia.

Para a alimentação da geometria dividiu-se o poço em seções axiais, com geometria e condição de contorno semelhante. Isto inclui anular cimentado ou não cimentado, exposição ao sal e diâmetro de poço aberto. Para cada seção axial  $s$ , composta por intervalos  $k$ , foram alimentados sete parâmetros de geometria: diâmetro interno e diâmetro externo de cada revestimento, diâmetro do poço aberto, número de anulares de cada seção, topo e base de cada seção e tipo de condição de contorno. Denominou-se como 1 a condição de contorno para seção do anular cimentada e 2 a condição de contorno para seção do anular não cimentada e preenchida com fluido.

## 4.2.

### Cálculo da Massa Específica para a Condição Inicial

Para realizar o cálculo do perfil de massa específica é necessário a composição do fluido que será modelado em cada fase do poço e o fluido que será produzido para o interior da coluna de produção. Para os anulares do poço foi definida a utilização de um fluido de perfuração composto pelas seguintes frações mássicas (f): 62,5% de base orgânica (6,85 ppg), 20% de base salina (9,85 ppg), 16,5% de baritina (35,8 ppg) e 1% de químicos (9,5 ppg).

Tabela 4.1: Tabela com constantes dos fluidos utilizados na simulação de APB (Zamora, et al., 2013).

Base	Orgânica (S <sub>2</sub> )	Salmoura (B <sub>4</sub> )	Óleo (MO <sub>2</sub> )
<b>Coefficientes de Pressão</b>			
a <sub>1</sub> [lb/gal]	6,8467	9,8426	6,8701
b <sub>1</sub> [lb/gal/psi]	3,05E-5	1,95e-5	3,13E-5
c <sub>1</sub> [lb/gal/psi <sup>2</sup> ]	-2,43E-11	-1,01e-10	-2,22E-10
<b>Coefficientes de Temperatura</b>			
a <sub>2</sub> [lb/gal/°F]	-2,72E-3	-3,14e-3	-2,82E-3
b <sub>2</sub> [lb/gal/psi/°F]	5,35E-8	2,31e-8	6,11E-8
c <sub>2</sub> [lb/gal/psi <sup>2</sup> /°F]	-6,99E-13	-8,74e-14	-9,47E-13
<b>Ajuste dos Dados à Curva</b>			
Coefficiente de Correlação [r <sup>2</sup> ]	0,998	0,997	0,998
Erro Médio [%]	0,21	0,33	0,19

Com isso obteve-se uma massa específica de fluido próxima de 12.0 ppg para todas as fases e anulares do poço, que é comum em perfuração de fases com evaporito e reservatório. Esta massa específica do fluido pode ser facilmente ajustada variando-se a fração de sólidos em cada fase, porém adotou-se a mesma fração de sólidos  $f_{s,i}$  para facilitar a análise do fenômeno de APB. Definida a composição do fluido é necessário calcular o perfil pressão hidrostática, que depende da massa específica do fluido e, conseqüentemente, da massa específica das bases que compõem o fluido de perfuração.

Para efetuar esse cálculo deve-se estimar uma massa específica inicial para as bases que compõem o fluido. Uma boa aproximação é utilizar a constante  $a_l$  da eq. (2.17), que corresponde a valor apresentados na Tabela 4.1).

$$\rho_{o1,e}(P, T) = a_{1,s2} \quad (4.1)$$

$$\rho_{w1,e}(P, T) = a_{1,B4} \quad (4.2)$$

Com a estimativa da massa específica das bases estima-se a massa específica do fluido na condição inicial através da eq. (2.18).

$$\begin{aligned} \rho_{fl1e,i,k}(P_1, T_1) = & \rho_{o1e,i,k}(P_1, T_1)f_{o,i} + \rho_{w1e,i,k}(P_1, T_1)f_{w,i} + \rho_s f_{s,i} \\ & + \rho_c f_{c,i} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Estimado o perfil de massa específica pode-se calcular o perfil de pressão hidrostática do fluido, que é o resultado da integração ao longo de um intervalo vertical do poço.

$$\int dP_{h,i,k} = 0,1704 \cdot \int \rho_{fl,i,k}(P, T) dL \quad (4.4)$$

Onde  $P_h$  é a pressão hidrostática do fluido no anular em *psi*,  $\rho_f$  é a massa específica do fluido em *ppg* e  $dL$  é o diferencial da profundidade expresso em *m*.

Na primeira aproximação a estimativa da massa específica não varia com a temperatura e profundidade, mas deverá ser considerada como uma função das mesmas nos cálculos iterativos seguintes. Uma boa aproximação para a integral do perfil de pressão, apresentado na eq. (4.4), é efetuar o somatório dos incrementos de pressão em função da profundidade para  $dL = 1m$ .

$$P_{1,i,k} = 0,1704 \cdot \sum_{L=1}^k [\rho_{fl1,i,k}(P_1, T_1) \cdot dL] \quad (4.5)$$

Estimado o perfil de pressão inicial, com a eq. (4.5), pode-se realizar a primeira iteração para calcular a massa específica das bases com todos os termos da eq. (2.17).

$$\begin{aligned} \rho_{b1,i,k}(P, T) = & (a_{1,b} + b_{1,b}P_{1,i,k} + c_{1,b}P_{1,i,k}^2) \\ & + (a_{2,b} + b_{2,b}P_{1,i,k} + c_{2,b}P_{1,i,k}^2) \cdot T_{1,i,k} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Onde o subscrito  $b$  é utilizado para indicar a base do fluido de modo genérico. A partir da massa específica das bases calcula-se novamente a massa específica do fluido, com a eq. (2.18) simplificada, e obtém-se a massa específica do fluido para a primeira iteração.

$$\rho_{fl1,i,k}(P_1, T_1) = \rho_{o1,i,k}(P_1, T_1)f_{o,i} + \rho_{w1,i,k}(P_1, T_1)f_{w,i} + \rho_s f_{s,i} + \rho_c f_{c,i} \quad (4.7)$$

Como a massa específica de cada base é dependente da temperatura e pressão, que variam em função da pressão hidrostática, é necessário prosseguir com o cálculo iterativo até que ocorra a convergência da massa específica do fluido para um erro inferior ao limite estabelecido.

Esse cálculo deve ser realizado iterativamente até a convergência em cada intervalo  $k$  de cada anular  $i$ . Isso onera computacionalmente o programa e torna-se importante a aplicação de algum método numérico, para acelerar a convergência da rotina de massa específica do fluido e reduzir o tempo de simulação. Como a massa específica é expressa por equações polinomiais, decidiu-se aplicar o método de Newton-Raphson (Lobão, 2015) para acelerar a convergência, devido à elevada eficiência deste método. Trata-se de um método de ponto fixo que requer o conhecimento da forma analítica da função e de suas derivadas.

#### 4.2.1.

#### Aplicação do Método de Newton-Raphson para o Fluido na Condição Inicial

Para aplicar o algoritmo de Newton-Raphson é necessário expressar a função de interesse, eq. (4.7), no formato  $f(\rho_{fl1,i,k}) = 0$ .

$$f(\rho_{fl1,i,k}) = \rho_{o1,i,k}(P_1, T_1)f_{o,i} + \rho_{w1,i,k}(P_1, T_1)f_{w,i} + \rho_s f_{s,i} + \rho_c f_{c,i} - \rho_{fl1,i,k}(P_1, T_1) \quad (4.8)$$

O passo seguinte é expressar a formulação de recorrência do método de Newton-Raphson para o cálculo da massa específica do fluido:

$$\rho_{fl1,i,k}^{n+1} = \rho_{fl1,i,k}^n + \frac{f(\rho_{fl1,i,k}^n)}{f'(\rho_{fl1,i,k}^n)} \quad (4.9)$$

Onde o índice  $n$  realiza a contagem das iterações e  $f'$  é a derivada da função  $f$ . Quando  $[\rho_{fl1,i,k}^{n+1} - \rho_{fl1,i,k}^n] < erro$  estipulado obtém-se a convergência da função de recorrência dada pela eq. (4.9). Com o algoritmo detalhado parte-se para o cálculo da derivada da eq. (4.8), referente à massa específica do fluido, que

está no denominador do segundo termo da eq. (4.9). Esta derivada pode ser expressa por:

$$\frac{df(\rho_{fl1,i,k})}{d\rho_{fl1,i,k}} = \frac{d\rho_{o1,i,k}}{d\rho_{fl1,i,k}} f_{o,i} + \frac{d\rho_{w1,i,k}}{d\rho_{fl1,i,k}} f_{w,i} + \rho_s f_{s,i} + \rho_c f_{c,i} - 1 \quad (4.10)$$

Como a massa específica da base é dependente da massa específica do fluido, que por sua vez é dependente da pressão hidrostática, calculam-se as derivadas da eq. (4.11) aplicando a regra da cadeia. Deste modo, tem-se que a derivada da função (4.8) é expressa por:

$$\frac{df(\rho_{fl1,i,k})}{d\rho_{fl1,i,k}} = \frac{d\rho_{o1,i,k}}{dP_{1,i,k}} \frac{dP_{1,i,k}}{d\rho_{fl1,i,k}} f_{o,i} + \frac{d\rho_{w1,i,k}}{dP_{1,i,k}} \frac{dP_{1,i,k}}{d\rho_{fl1,i,k}} f_{w,i} + \rho_s f_{s,i} + \rho_c f_{c,i} - 1 \quad (4.11)$$

Onde:

$$\frac{d\rho_{b1,i,k}}{dP_{1,i,k}} = [b_{1,b} + 2c_{1,b}P_{1,i,k} + (b_{2,b} + 2c_{2,b}P_{1,i,k})T_{1,i,k}] \quad (4.12)$$

$$\frac{dP_{1,i,k}}{d\rho_{fl1,i,k}} = 0,1704 \cdot k \quad (4.13)$$

Como se observa na eq. (4.12) e (4.13), as derivadas dos termos de massa específica das bases em relação ao perfil de pressão e de pressão em relação ao perfil de massa específica do fluido foram calculadas a partir da derivada da eq. (4.6) e derivada da eq. (4.5), respectivamente. Conhecidas todas as variáveis pode-se prosseguir com a formulação de recorrência de Newton-Raphson, através da eq. (4.9), e obter a convergência da função após uma a três iterações, a depender do erro máximo estabelecido e da condição inicial do fluido. Para a rotina PVT1, que é calculado apenas uma vez durante a simulação do problema, foi adotado erro de 10<sup>-6</sup> ppg como critério de convergência.

### 4.3.

#### Cálculo do Volume e Massa de Fluido na Condição Inicial

O cálculo do volume inicial de fluido em cada anular é simples. Utiliza-se a eq. (3.1) para calcular o volume  $V_{a,i,k}$  de cada intervalo  $k$  em cada anular  $i$  e a eq. (3.7) para calcular o volume total em cada anular.

Para calcular a variação de volume do fluido, devido à fluência do sal, aquecimento do poço e APB resultante, utiliza-se o princípio de conservação de massa. Com essa premissa pode-se correlacionar a condição inicial e final do fluido contido em cada anular. Para isso calcula-se a massa total de fluido através do produto do volume e da massa específica em cada intervalo  $k$  para cada anular  $i$ .

$$m_{fl,i} = \pi \cdot \sum_{L=L_a}^k [(a_{i,R,k}^2 - b_{i,k}^2) \cdot dL \cdot \rho_{fl,i,k}] \cdot uc_{rho} \quad (4.14)$$

Onde  $m_{fl,i}$  é a massa de fluido de cada anular em  $kg$  e  $dL$  é a extensão do intervalo  $k$  em  $m$ , que é utilizado para calcular a massa em cada volume de controle. A massa específica é inserida na equação em  $ppg$  e convertida para  $kg/m^3$  através do termo de conversão  $uc_{rho}$  [ $119,826 \text{ kg/lb.gal/m}^3$ ].

#### 4.4.

#### Cálculo da Massa Específica para a Condição de Equilíbrio

Para a estimativa do perfil de massa específica do fluido na condição final, pode-se utilizar a massa específica do fluido na condição inicial como estimativa. Uma segunda opção é utilizar o valor da constante  $a_1$  da Tabela 4.1 para a massa específica das bases, e aplicar novamente a ponderação através da eq. (2.18). A escolha de uma ou outra metodologia não tem impacto significativo na convergência, visto à eficiência do método Newton-Raphson.

Estimado o perfil de massa específica do fluido para a condição final, estima-se o perfil de pressão hidrostática do fluido. Essa pressão hidrostática na nova condição de equilíbrio é calculada de forma semelhante à pressão hidrostática do fluido na condição inicial. Integra-se o perfil de massa específica em função da profundidade, através do somatório das parcelas de pressão de cada intervalo  $L_k$ , porém adiciona-se a componente de pressão relativa ao APB.

Como a energização do packoff ocorre com o riser de perfuração preenchido com o fluido na condição inicial, após a cimentação do revestimento, calcula-se a pressão imediatamente abaixo da cabeça do poço, com a eq. (4.15), através do somatório dos incrementos de pressão da superfície até a cabeça do poço em intervalos de profundidade  $dL = 1 \text{ m}$ .

$$P_{h1,i,LA} = 0,1704 \cdot \sum_{L=1}^{LA} [\rho_{fl1,i,k}(P_1, T_1)dL] \quad (4.15)$$

Conhecida a pressão  $P_{h1,i,LA}$  trapeada na cabeça do poço, referente a condição inicial na energização do packoff, e o APB, referente ao fechamento do sal e expansão térmica do fluido e dos revestimentos, calcula-se a estimativa do perfil de pressão na nova condição de equilíbrio:

$$P_{2,i,k} = APB_i + P_{h1,i,LA} + 0,1704 \sum_{L=LA}^k [\rho_{fl2,i,k}(P_1, T_1)dL] \quad (4.16)$$

Com o perfil de pressão calculado, através da eq. (4.16), calcula-se a massa específica das bases do fluido na nova condição de equilíbrio:

$$\rho_{b2,i,k}(P, T) = (a_{1,b} + b_{1,b}P_{2,i,k} + c_{1,b}P_{2,i,k}^2) + (a_{2,b} + b_{2,b}P_{2,i,k} + c_{2,b}P_{2,i,k}^2)T_{2,i,k} \quad (4.17)$$

Estimada a massa específica das bases, a partir da eq. (4.17), inicializa-se o processo de iteração a partir da eq. (2.18):

$$\rho_{fl2,i,k}(P_2, T_2) = \frac{\rho_{fl1,i,k}(P_1, T_1)}{1 + f_{o,i} \left( \frac{\rho_{o1,i,k}}{\rho_{o2,i,k}} - 1 \right) + f_{w,i} \left( \frac{\rho_{w1,i,k}}{\rho_{w2,i,k}} - 1 \right)} \quad (4.18)$$

A massa específica de cada base é dependente da pressão e temperatura, que varia em função do APB e do perfil de massa específica do fluido em cada anular. Isso resulta em um cálculo iterativo até a convergência da massa específica do fluido com um erro inferior ao limite estabelecido. Assim como no cálculo da massa específica para a condição inicial, utiliza-se o algoritmo de Newton-Raphson para acelerar a convergência.

#### 4.4.1.

#### Aplicação do Método de Newton-Raphson para o Fluido na Condição de Equilíbrio

Para aplicar o algoritmo de Newton-Raphson é necessário expressar a massa específica, que é a função de interesse, no formato  $f(\rho_{fl2,i,k}) = 0$ . Deste modo chega-se a:

$$f(\rho_{fl2,i,k}) = \frac{\rho_{fl1,i,k}(P_1, T_1)}{1 + f_{o,i} \left( \frac{\rho_{o1,i,k}}{\rho_{o2,i,k}} - 1 \right) + f_{w,i} \left( \frac{\rho_{w1,i,k}}{\rho_{w2,i,k}} - 1 \right)} - \rho_{fl2,i,k}(P_2, T_2) \quad (4.19)$$

O passo seguinte é expressar a formulação de recorrência do método de Newton-Raphson para aplicar o método:

$$\rho_{fl2,i,k}^{n+1} = \rho_{fl2,i,k}^n + \frac{f(\rho_{fl2,i,k}^n)}{f'(\rho_{fl2,i,k}^n)} \quad (4.20)$$

Onde o índice  $n$  realiza a contagem das iterações e  $f'$  é a derivada da função. Quando  $[\rho_{fl2,i,k}^{n+1} - \rho_{fl2,i,k}^n] < erro$  estipulado obtém-se a convergência da função de recorrência dada pela eq. (4.20). Com o algoritmo detalhado, parte-se para o cálculo da derivada da eq. (4.19), referente à massa específica do fluido na condição 2, para obter o denominador do segundo termo da eq. (4.20). Esta derivada pode ser expressa por:

$$\frac{df(\rho_{fl2,i,k})}{d\rho_{fl2,i,k}} = \frac{df(\rho_{fl2,i,k})}{dP_{2,i,k}} \frac{dP_{2,i,k}}{d\rho_{fl2,i,k}} - 1 \quad (4.21)$$

Para facilitar a manipulação algébrica e visualização efetua-se uma mudança de variável no denominador do primeiro termo da eq. (4.19) substituindo-o por  $u$ . Deste modo, a função (4.21), que representa a derivada da função (4.19), resulta na seguinte expressão:

$$\frac{df(\rho_{fl2,i,k})}{d\rho_{fl2,i,k}} = -\rho_{fl1,i,k} \frac{1}{u^2} \frac{du}{dP_{2,i,k}} \frac{dP_{2,i,k}}{d\rho_{fl2,i,k}} - 1 \quad (4.22)$$

Onde:

$$u = 1 + f_{o,i} \left( \frac{\rho_{o1,i,k}}{\rho_{o2,i,k}} - 1 \right) + f_{w,i} \left( \frac{\rho_{w1,i,k}}{\rho_{w2,i,k}} - 1 \right) \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} & \frac{du}{dP_{2,i,k}} \\ &= -f_{o,i} \rho_{o1,i,k} \left( \frac{1}{\rho_{o2,i,k}^2} \right) \frac{d\rho_{o2,i,k}}{dP_{2,i,k}} - f_{w,i} \rho_{w1,i,k} \left( \frac{1}{\rho_{w2,i,k}^2} \right) \frac{d\rho_{w2,i,k}}{dP_{2,i,k}} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\frac{d\rho_{b2,i,k}}{dP_{2,i,k}} = [b_{1,b} + 2c_{1,b}P_{2,i,k} + (b_{2,b} + 2c_{2,b}P_{2,i,k})T_{1,i,k}] \quad (4.25)$$

$$\frac{dP_{2,i,k}}{d\rho_{fl2,i,k}} = 0.172 \cdot (k - La) \quad (4.26)$$

Como se pode observar a eq. (4.25) é a derivada da massa específica da base do fluido calculada a partir da eq. (4.17). A eq. (4.26) é a derivada do perfil de pressão calculado a partir da eq. (4.16) e a eq. (4.24) é a derivada interna da variável  $u$  apresentada na eq. (4.23).

Conhecidas todas as variáveis pode-se prosseguir com a formulação de recorrência de Newton-Raphson através da eq. (4.20) e obter a convergência da função após uma a três iterações, a depender do erro máximo estabelecido e da condição inicial do fluido. Para a rotina PVT2, que é calculada a cada iteração de APB durante a simulação do problema, foi adotado erro de  $10^{-4}$  ppg como critério de convergência para não onerar demasiadamente o tempo de simulação.

#### 4.5.

#### **Cálculo da Variação de Volume Resultante do Fechamento do Sal**

A partir da eq. (2.19) para o modelo de duplo mecanismo, calcula-se a taxa de fechamento do sal na parede do poço que está em contato com o fluido do anular não cimentado. Esta taxa de fechamento depende da energia de ativação do sal, temperatura, fluência de referência, tempo e principalmente da tensão efetiva. A tensão efetiva ou desviatória (apresentada no capítulo 2.3.1) é uma variável que depende da massa específica do fluido e das tensões envolvidas no fenômeno de fluência. O cálculo é complicado devido às dificuldades de manipulação algébrica resultantes da estrutura cilíndrica do poço e da variação do campo de tensões ao redor do poço. Devido a isto são utilizados simuladores de elementos finitos nesta empreitada. Outro fator importante a ser avaliado para o comportamento da fluência do sal é o estágio de fluência, que pode ser classificado como: primário, secundário ou terciário. Para o caso de revestimento e cimentação do poço já se tem predominância da fluência no segundo estágio, que é caracterizada por um estado estacionário.

Diante das diversas variáveis que influenciam a tensão desviatória, optou-se por calcular as taxas de fechamento do sal a partir do EPsal (Poiate & Amaral,

2014). O EPsal é um software interno da Petrobras desenvolvido em parceria com a UFAL (Universidade Federal de Alagoas) e registrado no INPI. O desenvolvimento deste software foi idealizado e adaptado através de templates gerados no programa SIGMA 2D, que contém a metodologia, parâmetros e propriedades das rochas evaporíticas. Com este software simulou-se a fluência do sal para diversos casos variando o soterramento, temperatura, lamina de água, massa específica de fluido, profundidade do sal e outros fatores e elaborou-se uma superfície de resposta para fluência do sal em função destas variáveis e do tempo.

Cerca de 30 mil modelos com diferentes características compõem o banco de dados de simulações. As análises numéricas foram realizadas através do simulador ANVEC 2D (Costa, 1984) e dos clusters da UFAL e da Petrobras. O EPsal é uma ferramenta para ser aplicada no projeto conceitual de perfuração de poços verticais com cenários de aplicação de até 4000 m de soterramento, lamina de água de até 2500 m, para análise de intervalos de 20 e 100 m de rochas de halita, carnalita e taquidrita intercaladas ou não com erro máximo de 10% no tempo para a perfuração do poço.

Com a utilização deste software alimentou-se os parâmetros do poço e foi gerada a resposta de fechamento do sal desde o topo até a base do sal espaçando-se as simulações de 100 em 100 m. Para cada uma destas profundidades simulou-se o fechamento do sal para massa específica de fluido variando de 12,0 ppg até 16,0 ppg com incrementos de 0,25 ppg a fim de simular o efeito de APB. Obtiveram-se diversas curvas com taxa de fechamento diametral do sal em função de profundidade, massa específica do fluido no poço e tempo, visto que a taxa de fechamento decresce com tempo e tende a um valor constante na fluência secundária.

Para a cota média de 4200 m e diâmetro inicial de 14  $\frac{3}{4}$ ", com intervalo composto por halita, o EPsal fornece: Fechamento diametral (Figura 4.4), taxa de fechamento diametral (Figura 4.5) e, para massa específica de fluido elevada, taxa de abertura do sal (Figura 4.6).

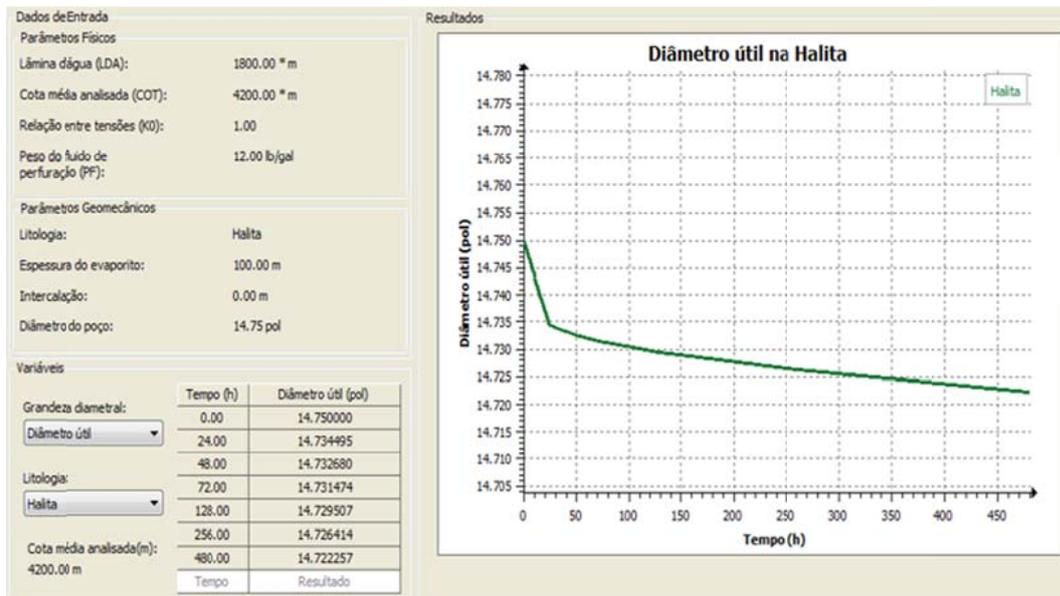


Figura 4.4: Fechamento diametral na cota média de 4200 m para o fluido com 12,0 ppg e diâmetro inicial de 14 ¾” em halita.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221992/CA

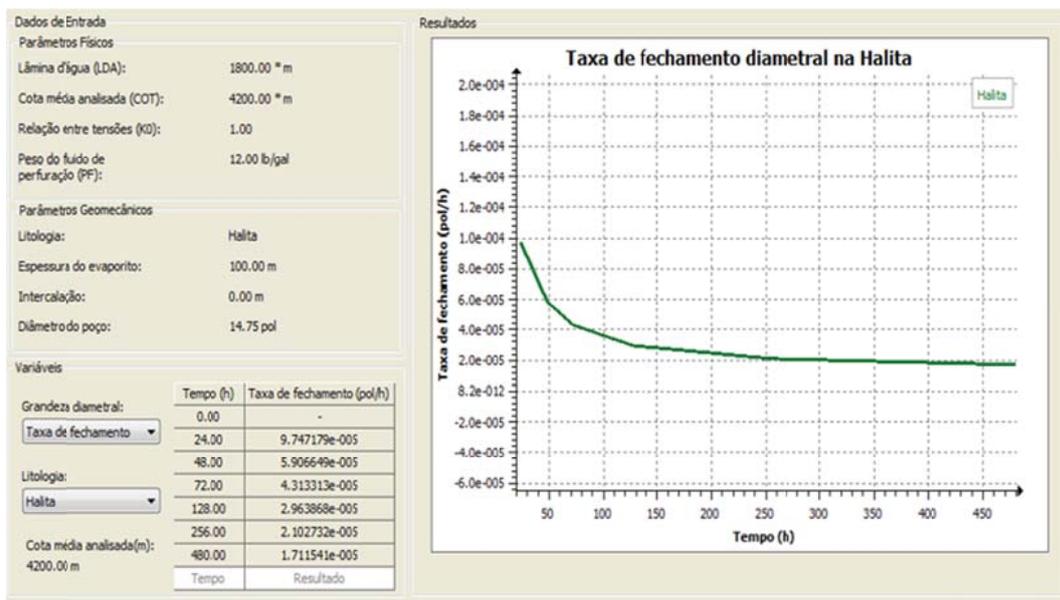


Figura 4.5: Taxa de fechamento diametral na cota média de 4200 m para o fluido com 12,0 ppg e diâmetro inicial de 14 ¾” em halita.

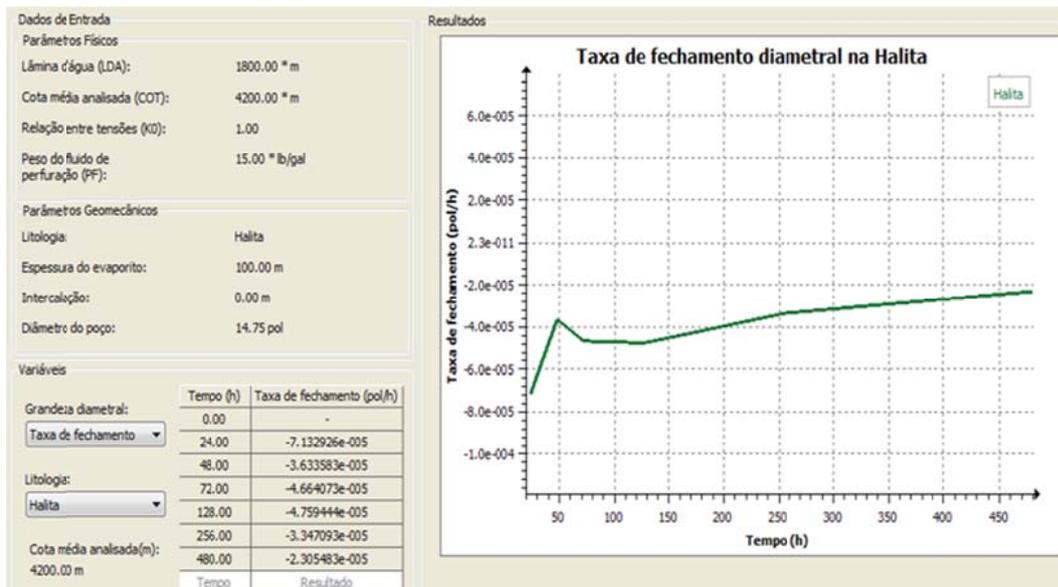


Figura 4.6: Taxa de abertura diametral na cota média de 4200 m para o fluido com 15,0 ppg e diâmetro inicial de 14 3/4” em halita.

De posse das curvas geradas pelo EPsal, com as taxas de fechamento do sal em função da massa específica de fluido em cada profundidade (Figura 4.5), foram ajustadas regressões de potência em função do tempo nestas curvas. Logo, a eq. (2.19) é reescrita de forma equivalente, através do ajuste de parâmetros em uma regressão de potência, da seguinte maneira:

$$\dot{\epsilon}_{sal,k}(P, t) = \gamma_{k,P,t} \cdot t^{-\theta_{k,P,t}} \tag{4.27}$$

Onde  $k$  é a profundidade analisada,  $P$  é a pressão hidrostática do fluido somado ao APB,  $t$  é o tempo decorrido na taxa de deslocamento calculada e  $\gamma$  e  $\theta$  são constantes da regressão de potência sobre os pontos. O intervalo de sal no anular não cimentado está confinado pelo packoff e ocorre redução do volume do anular resultante da fluência do sal. Esta variação do espaço anular acarreta em um aumento de pressão e afeta a taxa de fechamento do sal para cada profundidade em função do tempo. Esta pressão foi nomeada como APB do sal ( $APB_{sal}$ ) e incorporada na simulação de APB térmica. Deste modo calcula-se indiretamente a pressão em cada profundidade convertendo o APB do sal e a pressão hidrostática em massa específica equivalente através das seguintes relações:

$$P_{sal,i,k} = P_{h2,i,k} + APB_{sal} \tag{4.28}$$

$$\rho_{APBsal,i,k} = \frac{P_{sal,i,k}}{0,1704 * h} \quad (4.29)$$

Com a massa específica equivalente conhecida, para cada valor de APB em função da profundidade, efetua-se a comparação entre o valor obtido na eq. (4.29) e o intervalo de massa específica equivalente correspondente à curva ajustada pela eq. (4.27). Se durante a simulação do fechamento do sal a massa específica equivalente variar 0,25 ppg, uma nova curva com taxa de fechamento de sal é adotada.

A taxa de fechamento do sal é calculada para cada intervalo de tempo  $\Delta t$ . Como o interesse é calcular o fechamento total do sal no período de simulação, realiza-se a integração da taxa de fechamento do sal através da soma de todas as parcelas de fluência decorridas em cada intervalo de tempo  $\Delta t$  desde o tempo inicial  $t = 0$  até o tempo final  $t = t$ .

$$\Delta a_{sal,k} = \sum_{t=0}^t \dot{\epsilon}_{sal,k}(P, t) \quad (4.30)$$

A partir do fechamento acumulado do sal é calculado o raio do poço para cada profundidade do anular com fluido em contato com o sal.

$$a_{sal,k} = a_{iR,k} - \Delta a_{sal,k} \quad (4.31)$$

De posse da nova geometria do poço calcula-se a variação de volume do anular após o fechamento do sal, no tempo transcorrido  $t$ , utilizando o raio do poço calculado a partir da eq. (4.31). Essa variação de volume é a resultante da diferença entre o volume do anular calculado pela eq. (3.7) para o raio do poço na condição inicial e o volume do anular calculado para o fechamento acumulado do sal a partir do raio calculado na eq. (4.31).

$$\Delta V_{sal,i} = \pi \sum_{L=BS}^{TS} [(a_{sal,k}^2 - b_{i,k}^2) \cdot L_k] - \pi \sum_{h=BS}^{TS} [(a_{iR,k}^2 - b_{i,k}^2) \cdot L_k] \quad (4.32)$$

Onde BS refere é a profundidade da base do sal, TS é a profundidade do topo do sal e  $L_k$  é a extensão do segmento  $k$  no intervalo vertical.

#### 4.6. Cálculo da Variação de Volume dos Anulares Utilizando a Solução de Lamé

A variação de volume do anular ocasionada pela variação do perfil térmico durante a produção do poço, mudança no perfil de pressão do anular e variação do volume do anular devido à fluência do sal são os principais pontos abordados no cálculo do APB. Para calcular essa variação de volume nos anulares aplica-se a solução de Lamé no cálculo dos deslocamentos das paredes dos revestimentos, segundo deduções apresentadas no capítulo 3 deste trabalho.

Basicamente realiza-se um balanço de forças para cada parede do revestimento correlacionando as pressões adjacentes, à esquerda e à direita do anular, com a do próprio anular. Nesse cálculo inclui-se a variação de volume ocasionada pela dilatação térmica da parede das colunas de revestimento, o que pode ser verificado através nas eq. (3.17) e (3.18).

É importante ressaltar que a eq. (3.13) é aplicada para os anulares internos do poço. As condições de fronteira foram abordadas no capítulo 3.1 e os resultados foram expressos para condição de anular cimentado através da eq. (3.28) e anular não cimentado através da eq. (3.34). A aplicação das equações de variação de volume nos intervalos da seção em cada anular resulta em um sistema de equações, que foi apresentado de modo simplificado no capítulo 2 através da eq. (2.15).

Objetivando-se contabilizar o APB do sal, decorrente da variação de volume devido à fluência do sal no anular não cimentado, soma-se o termo  $\Delta V_{sal}$  na equação de variação de volume. Deste modo obtém-se uma matriz de equações dependente da pressão, temperatura e tempo, que deve ser resolvida simultaneamente devido à interdependência das pressões dos anulares, segundo eq. (2.16).

$$[\Delta V_{fl}] = [\Lambda][\Delta P] + [\psi][\Delta T] + [\Delta V_{sal}] \quad (4.33)$$

A variação de volume do fluido  $\Delta V_{fl}$  é o vetor que contabiliza a mudança de volume em cada anular,  $\Delta P$  é o vetor APB que registra a variação de pressão do estado inicial para o novo estado de equilíbrio,  $\Delta T$  é o vetor que contabiliza a variação do perfil de temperatura do estado inicial para o novo estado de equilíbrio e  $\Delta V_{sal}$  é o vetor contabiliza a variação de volume decorrente da

fluência do sal em função do tempo. O termo  $[A]$ , que expressa a matriz de rigidez, é a matriz resultante do agrupamento dos termos  $A$ ,  $B$  e  $C$ , dados pelas eq. (3.14), eq. (3.15) e eq. (3.16), respectivamente, e variações para condições de fronteira. O termo  $[\psi]$ , que contabiliza a variação de volume do anular devido à variação de temperatura nas colunas de revestimento, é a matriz resultante do agrupamento dos termos  $D$  e  $E$ , dados pelas eq. (3.17) e eq. (3.18), respectivamente.

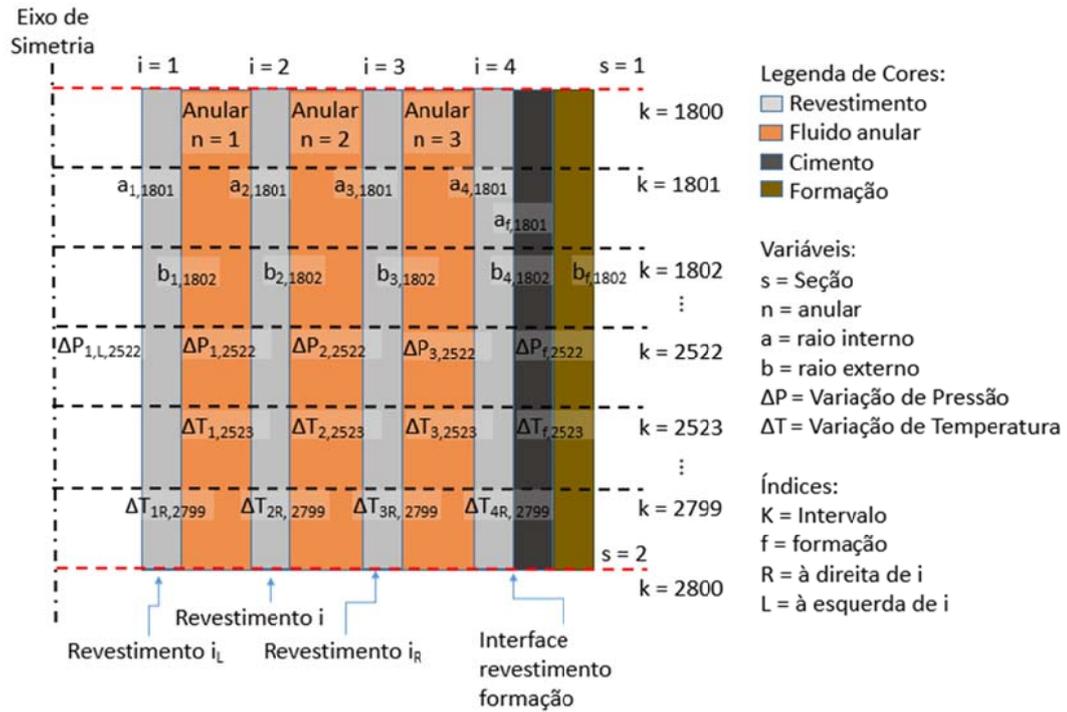


Figura 4.7: Seção radial do poço com intervalo cimentado de 1800 a 2800 e três anulares confinados.

Para o caso de uma seção  $s$  do poço com três anulares, condição de contorno com o anular cimentado e sem a fluência do sal, segundo Figura 4.7, tem-se o seguinte sistema de equações para cada intervalo  $k$ , segundo eq. (3.28):

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{a,1,k} \\ \Delta V_{a,2,k} \\ \Delta V_{a,3,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,k} & B_{1,k} & C_{1,R,k} & 0 \\ 0 & A_{2,k} & B_{2,k} & C_{2,R,k} \\ 0 & 0 & A_{3,k} & (B_{3,k} + C_{3,R,k}') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{1,L,k} \\ \Delta P_{1,k} \\ \Delta P_{2,k} \\ \Delta P_{3,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{1,k} & E_{1,R,k} & 0 & 0 \\ 0 & D_{2,k} & E_{2,R,k} & 0 \\ 0 & 0 & D_{3,k} & E_{3,R,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{1R,k} \\ \Delta T_{2Rk} \\ \Delta T_{3R,k} \\ \Delta T_{4R,k} \end{bmatrix} \tag{4.34}$$

Deste modo, calcula-se a variação de volume em cada intervalo  $k$  para cada anular. Nota-se que o termo  $A_{l,k}$  é afetado pela variação de pressão na coluna  $\Delta P_{l,L,k}$ , que é um valor conhecido. Logo, pode ser retirado da matriz e somado diretamente à variação de volume do primeiro anular  $\Delta V_{a,1,k}$ . O termo  $\Delta P_{f,k}$ , que é a pressão à direita do anular mais externo da seção, não aparece na eq. (4.34), pois trata-se de uma condição de contorno que foi expressa em função de  $\Delta P_{3,k}$  com a constante  $C_{3,R,k}$ , segundo eq. (4.27).

A eq. (4.34) é resolvida de modo iterativo para a pressão, pois a esta afeta os anulares adjacentes e modifica os volumes de fluido confinado em todos os anulares. O APB normalmente é calculado na cabeça do poço e é praticamente constante em todo o perfil de pressão do anular, pois é muito pouco afetado pela variação de massa específica. Assumido valor constante de APB em todo perfil do anular pode-se simplificar a matriz  $[A]$  da eq. (4.34). Soma-se todos os termos  $A_{i,k}$ ,  $B_{i,k}$  e  $C_{i,R,k}$  e obtém-se como resultado apenas uma pressão  $\Delta P_{i,k}$  em cada anular, o que equivale ao valor de APB na cabeça de poço para cada anular.

Resolvido o segundo termo da eq. (4.34), referente à dilatação térmica do aço, pode-se expressar a mesma para o poço inteiro através da seguinte matriz:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \sum_k \Delta V_{a,1,k} \\ \sum_k \Delta V_{a,2,k} \\ \sum_k \Delta V_{a,3,k} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \sum_k A_{1,k} & \sum_k B_{1,k} & \sum_k C_{1,R,k} & \sum_k 0 \\ \sum_k 0 & \sum_k A_{2,k} & \sum_k B_{2,k} & \sum_k C_{2,R,k} \\ \sum_k 0 & \sum_k 0 & \sum_k A_{3,k} & \sum_k (B_{3,k} + C_{3,R,k}') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{col} \\ \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} \sum_k \Delta V_{\Delta T,1,k} \\ \sum_k \Delta V_{\Delta T,2,k} \\ \sum_k \Delta V_{\Delta T,3,k} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.35}$$

Como o sistema apresentado na eq. (4.35) refere-se ao exemplo da Figura 4.7, com condição de contorno para anular cimentado, a variação de volume resultante da movimentação do sal não é incorporada. Para a condição de contorno

com anular não cimentado, no intervalo em contato com o sal, calcula-se a variação de volume decorrente da fluência do sal através da eq. (4.32) e soma-se o resultado na eq. (4.35). Logo, chega-se novamente na expressão equivalente a eq. (2.16):

$$\Delta V_{aT,i} = \sum \Delta V_{a,i,k} + \Delta V_{sal,i} \quad (4.36)$$

#### 4.7.

#### Balanco de Massa e Convergência no Valor de APB

Para o cálculo do APB realiza-se o acoplamento entre a variação de volume nos anulares e a variação de volume de fluido nos anulares através de balanço de massa (Halal & Mitchell, 1994). Primeiro calcula-se a massa total de fluido em cada anular, através da eq. (4.14), somando-se o produto do volume pela massa específica na condição inicial do poço em cada intervalo  $k$ .

Na condição de conservação de massa deve-se obter a convergência entre a massa de fluido na condição inicial e a massa de fluido na condição de equilíbrio. Para que isso ocorra resolve-se iterativamente o valor de APB na condição de equilíbrio, que resulta em uma massa específica e volume de anular que satisfaz essa igualdade. Na prática, estabelece-se um valor tolerável de erro absoluto de massa e calcula-se a diferença segundo a equação a seguir:

$$\Delta m_i = \sum (V_{fl2,i,k} \cdot \rho_{fl2,i,k}) - \sum (V_{fl1,i,k} \cdot \rho_{fl1,i,k}) \quad (4.37)$$

Onde,

$$V_{fl2,i,k} = V_{fl1,i,k} + \Delta V_{a,i,k} + \Delta V_{sal,i,k} \quad (4.38)$$

Efetuada uma análise de sensibilidade na eq. (4.37) percebe-se que para uma redução do volume de fluido do anular é necessário um aumento da massa específica para que a conservação de massa ocorra.

Por exemplo, para uma diferença negativa entre a massa na condição de equilíbrio e condição inicial, segundo eq. (4.37), incrementa-se a pressão estimada de APB. Depois recalculam-se as massas específicas, fechamento do sal no passo de tempo com o novo APB e variação de volumes dos anulares. Esse ciclo ocorre sucessivamente até que ocorra a convergência entre o volume do anular e volume do fluido no anular segundo eq. (2.14).

$$\Delta V_{aT,i} \approx \Delta V_{fl,i} = - \sum_k \left\{ V_{fl1,i,k} \cdot \frac{\rho_{fl2,i,k} - \rho_{fl1,i,k}}{\rho_{fl2,i,k}} \right\} \quad (4.39)$$

Um modo de verificar essa convergência é através do cálculo da variação de volume de fluido de modo independente através da eq. (4.39), que utiliza a variação das massas específicas e é equivalente a eq. (2.13).

#### 4.8. Rotina de Iteração para Obtenção do APB

O cálculo do APB é realizado através de um processo que é computacionalmente custoso, pois o cálculo é efetuado em todos intervalos  $k$  de cada anular  $i$ . Para cada iteração do valor de APB é necessário calcular a massa específica do fluido com o valor de APB estimado, a variação total de volume do anular decorrente do fechamento do sal (considerando o APB estimado na iteração) e a variação de volume decorrente da mudança do perfil térmico. Para obter a convergência do resultado necessita-se estimar o valor de APB da iteração seguinte que resulte na condição de conservação de massa do fluido, através da igualdade entre a variação de volume do anular e a variação de volume do fluido no anular, conforme eq. (4.37).

Para melhorar a estimativa do valor de APB na iteração seguinte, e acelerar o processo de convergência, torna-se importante a utilização de algum método numérico, do mesmo modo que se aplicou o método de Newton-Raphson na convergência das massas específicas nos capítulos 4.2.1 e 4.4.1. O método deve ser capaz de efetuar a busca unidirecional e propor correções nas direções de busca pelo mínimo da função.

Para uma direção de busca definida pode-se realizar a minimização da função através de diversos métodos, como por exemplo: método de busca unidirecional de passo constante ou passo incremental, método de Armijo, método de bissecção, método de seção áurea, etc.

Para definição da direção de busca, os métodos clássicos de otimização são classificados quanto à ordem. À medida que aumenta a ordem do método normalmente obtêm-se um menor número de iterações, porém são mais difíceis de implementar. Os métodos clássicos de ordem zero incluem método univariante, que minimiza a função por eixo ou variável e método de Powell, que aperfeiçoa as direções de busca a partir do método univariante para corrigir a direção de busca.

Os métodos clássicos de ordem 1 necessitam conhecer o gradiente da função e incluem o método do máximo declive, Fletcher-Reeves e BFGS. Para a segunda ordem tem-se o método de Newton que utiliza a matriz inversa da Hessiana para obter a direção de busca (Menezes, et al., 2015).

#### 4.8.1. Método de Bisseção

Pela simplicidade de programação e por tratar-se de um problema levemente não linear adotou-se o método de bisseção como método de busca unidirecional. Trata-se de um método de quebra que é geometricamente intuitivo, porém de convergência não muito rápida se comparado com Newton-Raphson. Neste método define-se um intervalo que contenha a raiz da função e particiona-se em intervalos menores que ainda contenham a raiz da função até obter-se a convergência (Lobão, 2015). Para aplicação deste método chamou-se o limite superior do intervalo de busca de  $APB_R$  e o limite inferior de  $APB_L$ . Conhecendo os limites de busca, determina-se o valor médio através da média destes valores:

$$APB_M = \frac{APB_R + APB_L}{2} \quad (4.40)$$

Calculado o valor médio dos limites de busca, divide-se o intervalo em dois segmentos, um intervalo à esquerda de  $APB_M$  denominado  $APB_A$ , conforme eq. (4.41), e outro à direita de  $APB_M$  denominado  $APB_B$ , conforme eq. (4.42). Com isso avalia-se a função  $f$ , eq. (3.37) referente ao balanço de massa, duas vezes: uma em 1/4 do intervalo de busca dado por  $f(APB_A)$  e outra em 3/4 do intervalo de busca dado por  $f(APB_B)$ .

$$APB_A = \frac{APB_L + APB_M}{2} \quad (4.41)$$

$$APB_B = \frac{APB_M + APB_R}{2} \quad (4.42)$$

Avaliada a função  $f$  nos pontos médios, para os valores de APB fornecidos pelas eq. (4.41) e (4.42), comparam-se ambos os resultados, descarta-se o intervalo em que a função  $f$  apresentar maior valor e redefine-se o intervalo de busca. Por exemplo: Se  $f(APB_A) < f(APB_B)$  descarta-se o intervalo de  $APB_B$  e mantém-se o intervalo de  $APB_A$ . O limite inferior do intervalo de busca  $APB_L$  é

mantido como  $APB_L$ , o limite superior de intervalo de busca recebe o valor de  $APB_M$  e calcula-se um novo ponto médio a partir da eq. (4.40). Caso  $f(APB_A) > f(APB_B)$  descarta-se o intervalo de  $APB_A$  e mantém-se o intervalo de  $APB_B$ . O limite inferior do intervalo de busca  $APB_L$  recebe o valor de  $APB_M$ , o limite superior do intervalo de busca  $APB_R$  é mantido e calcula-se um novo ponto médio a partir da eq. (4.40). Obtido o mínimo da função no intervalo de busca é necessário efetuar a correção na direção de busca.

Como se trata de uma função levemente não linear, o mínimo da função normalmente está próximo do ponto de convergência na direção de busca e não são necessárias muitas correções de direção. Neste caso, optou-se por utilizar uma variação do método univariante no qual se efetuam correções nas direções de busca do mínimo da função por variável ou eixo. Trata-se de um método simples de ordem zero e de fácil programação.

O intervalo inferior para a busca no método de bisseção foi estabelecido em 0 psi e o superior em 10000 psi. Para o critério de convergência estabelecido de 0,5 kg de erro no balanço de massa de cada anular, que corresponde a uma diferença da ordem de  $10^{-3}$  bbl no resultado de APB, foram necessários dez a quinze iterações na busca unidirecional e uma a três correções de direção para obter-se o mínimo da função.

A programação do método numérico da bisseção foi realizada no arquivo APBSal, que é o arquivo principal que gerencia as demais sub-rotinas. A programação de todos os arquivos foi realizada no programa de engenharia MATLAB versão R2013a. A implementação do método numérico para o cálculo de APB pode ser visualizado no fluxograma apresentado na Figura 4.2.

#### 4.9.

#### **Cálculo da Evolução do APB Devido à Fluência do Sal**

A metodologia explicada até o momento é utilizada para calcular o APB que ocorre devido à fluência do sal em um determinado instante  $t$ . Para gerar a curva do aumento de pressão no anular do poço devido à fluência do sal é necessário realizar uma integração da variação de volume do sal em função do tempo.

Em resumo, divide-se o intervalo de tempo simulado ( $t_{final}$ ) em intervalos de tempo  $\Delta t$  e calcula-se o APB em cada passo de tempo ( $APB_t$ ). Para isso utiliza-se a

variação de volume acumulada decorrente da fluência do sal ( $\Delta V_{sal,t}$ ) que ocorre em intervalos de tempo  $\Delta t$  até atingir  $t_{final}$ , que é o objetivo da simulação.

Deste modo, reescreve-se a variação de volume dos anulares, dado pela eq. (4.36), em função do tempo  $t$ :

$$\Delta V_{aT,i,t} = \sum \Delta V_{a,i,k} + \sum \Delta V_{sal,i,k,t} \quad (4.43)$$

Considerando que a fluência do sal é dependente do APB, deve-se calcular a fluência em intervalos de tempo  $\Delta t$  razoavelmente pequenos, para que não ocorra erro significativo na integração da variação de volume do sal ( $\Delta V_{sal,t}$ ).