

### 3

## Aplicação dos Métodos Baseados em Perfilagem

O presente capítulo tem como objetivo principal avaliar os efeitos da escolha de parâmetros no processo de calibração dos modelos de Eaton (1975) e Bowers (1995); baseando-se na revisão bibliográfica da seção 2.4.3 do presente trabalho, onde se verifica que esses dois métodos são os mais usados na indústria do petróleo.

Como ferramenta de cálculo utiliza-se o pacote computacional Drillworks Predict da companhia Knowledge Systems. A base de dados empregada corresponde à base de dados do próprio Predict, os quais correspondem a um poço direcional denominado poço “Analogue”, localizado em águas profundas com uma lâmina de água de 4279 pés, no Golfo do México – USA.

Foi aplicada a técnica de Chopra e Huffman (2006) para verificar se existe influência do mecanismo da expansão de fluidos na geração de sobrepressões<sup>7</sup>. Depois foram aplicadas análises de sensibilidade nos métodos de Eaton (1975) e de Bowers (1995); procurando saber quão sensível é o modelo de previsão de pressão de poros às variações de seus parâmetros. Através desta análise se poderá saber qual das variáveis de entrada (*inputs*) influencia mais nos resultados do modelo (*output*). Sendo assim, se saberá qual das variáveis de entrada tem que ser conhecida com maior exatidão para reduzir seus efeitos nos resultados.

Na seção final do presente capítulo é realizada uma comparação dos resultados dos modelos de Eaton (1975), Bowers (1994) junto aos métodos de Kan e Swam (2001) e Doyen (2004) utilizando a mesma base de dados do Predict, para finalmente ressaltar a existência de incertezas associadas aos parâmetros de cada modelo e/ou da formação. As incertezas observadas representam a motivação do capítulo 4, como será descrito posteriormente.

---

<sup>7</sup> Os métodos de Bowers (MPE, 1995), e Bowers (2002) para verificar a presença do mecanismo de expansão de fluidos, não puderam ser usados nesta aplicação pela insuficiência da base de dados.

### 3.1. Descrição do poço Analogue – Bacia do Golfo de México (USA)

Os registros deste poço vêm na base de dados do Predict. A seguir é apresentada uma breve descrição do poço e os dados a serem utilizados na previsão da pressão de poros e a sua respectiva calibração.

- Poço direcional *offshore* localizado em águas profundas com uma lâmina de água de 4279 pés, no Golfo de México – USA.
- Apresenta o registro de raios gama, para fazer a discriminação de camadas de folhelhos. Esse perfil foi denominado como “GR\_wl” e é apresentado em cor azul no primeiro gráfico da figura 36. A identificação das camadas de folhelhos foi feita através de uma linha grupo (LG) denominada como “folhelhos” e identificada em cor vermelho na mesma figura.
- O registro de densidade foi denominado como “RHOB\_wl”. Esse registro apresenta dados a partir da profundidade de 11620 pés. Embora existam técnicas para estimar um perfil de densidades nas primeiras camadas abaixo do *mudline* como por exemplo o método de Gardner, e o método de Miller. Nesta aplicação utilizamos o método de Miller nos 1500 pés abaixo do fundo do mar, para depois unir ambos registros por interpolação linear. O registro estimado em toda a profundidade do poço foi denominado como “RHOB composite”, o qual é mostrado no segundo gráfico da figura 36 em cor roxa.
- O registro que infere a porosidade da formação corresponde ao registro sônico. Aqui foi aplicada uma discriminação dos dados sônicos só sobre camadas de folhelhos baseados na informação litológica existente. Com a finalidade de suavizar o perfil e evitar resultados muito espalhados, foi aplicado um filtro sobre este último registro através do método “*Shrink boxcar*” baseado na aplicação das medias quadráticas móveis. O registro final foi designado como “DT composite” e é mostrado no gráfico 3 da figura 36 em cor azul celeste. No mesmo gráfico é mostrado o *Trend* em cor vermelha. Seu traçado é descrito na sessão 3.3.
- Os dados RFT são usados para calibrar o modelo utilizado na previsão da pressão de poros. Esses dados são mostrados no gráfico 4 da figura 36 em forma de quadrados inclinados de cor vermelha.
- O gradiente de sobrecarga foi estimado a partir da equação 6, e foi guardado no registro “OBG Analogue”. Este *dataset* também é mostrado no gráfico 4 da figura 36 em cor rosa.

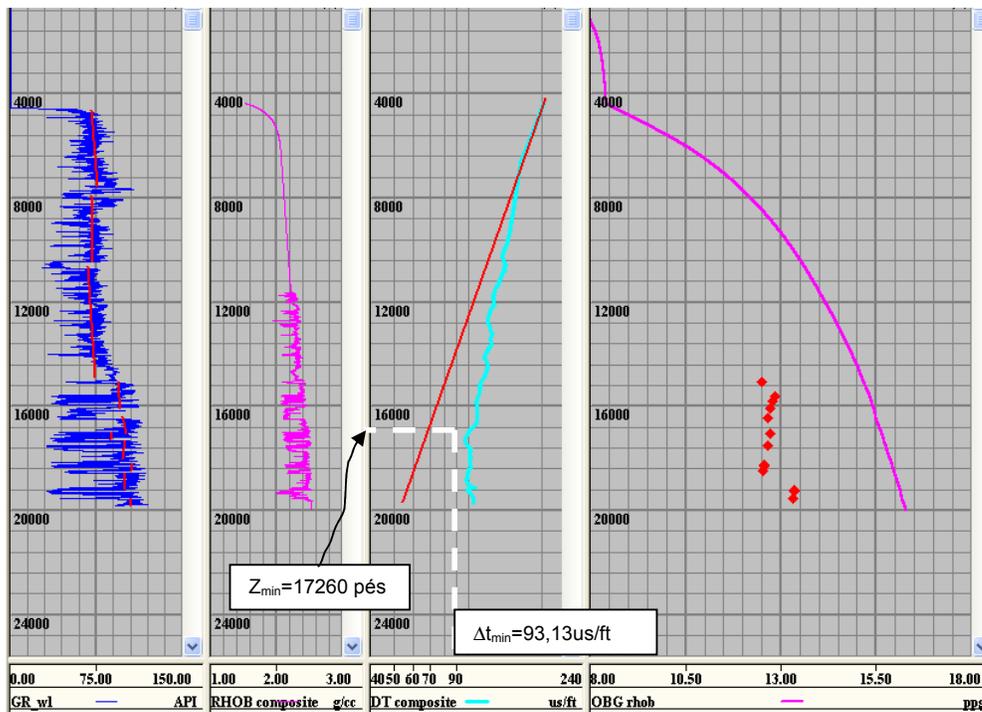


Figura 36 Base de dados do poço “Analogue”.

### 3.2. Verificação dos Mecanismos Geradores de Sobrepressão

Segundo a técnica de Chopra e Huffman (2006) deve-se plotar o registro de densidades versus o de velocidades, e observar a correlação. O registro de velocidades sônicas é obtido a partir da inversão dos valores dos tempos sônicos (não esquecendo as unidades – ft/s). Na figura 37 se observa uma tendência linear crescente da densidade com a velocidade<sup>8</sup>, embora na região assinalada pela elipse se observa um incremento da velocidade com densidade constante. Esse resultado significaria que na região do poço localizado entre a profundidade de 11275 e 12410 pés (135 pés de diferença) estaria presente a expansão de fluidos e provavelmente existam sobrepressões altas. Essa

<sup>8</sup> Os registros correspondem a toda a formação rochosa. O registro de velocidade está disponível em dois intervalos de profundidade no poço. O primeiro intervalo corresponde a um registro *Checkshot* de velocidades (tendência linear). O segundo intervalo de velocidades é onde se observa a nuvem de pontos; a qual contém os dados originais da medição (*well log*). O registro de densidade apresenta um detalhe similar, as densidades nas primeiras camadas foram estimadas através do modelo de Miller; o intervalo intermediário foi estimado por interpolação linear de ambos os registros.

camada é pequena, e comparada com a profundidade do poço, podemos generalizar que nessa região predomina o mecanismo da subcompactação, embora isso é um alerta para se ter cuidado nessa zona. Em outros projetos onde essa observação se apresente em camadas de maior espessura, poderá ajudar-nos na escolha de um modelo correto para a previsão da pressão de poros.

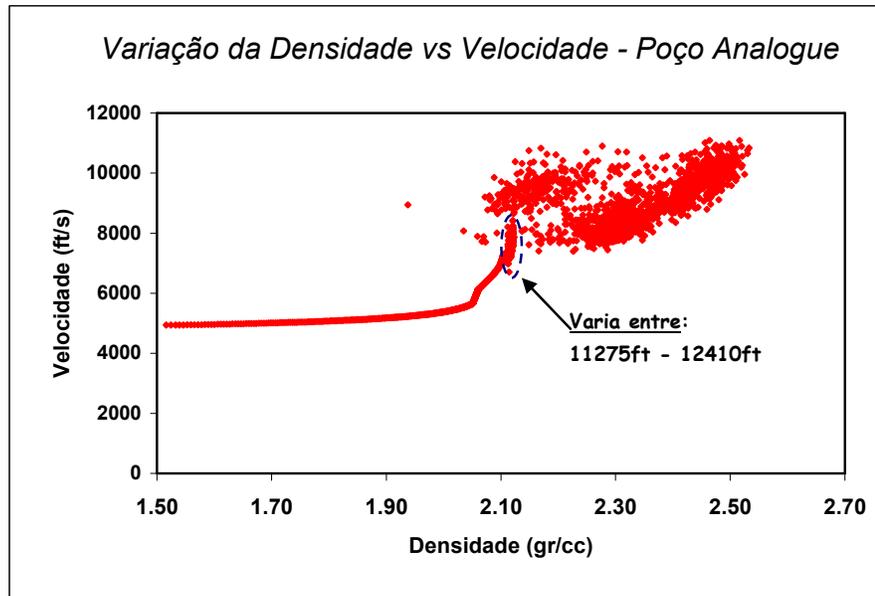


Figura 37 Aplicação da técnica de Chopra e Huffman (2006) no poço Analogue.

### 3.3. Aplicação do Método de Eaton (1975)

#### 3.3.1. Parâmetros do modelo de Eaton

Em 1975 Eaton modificou seu modelo sônico, trocando o expoente de sua equação de 5 para 3, como resultado de uma calibração com medições de pressão de poros “in situ” da bacia da Costa do Golfo (Louisiana – USA); mostrando que a calibração do expoente forma parte de seu método. A escolha dos parâmetros do modelo ou da formação está 100% relacionada às características físicas do subsolo; sendo assim, o expoente do modelo de Eaton permite acondicionar o modelo com as características físicas do meio e é por isso que quando se calibram os resultados do gradiente de pressão de poros com os valores RFT obtemos bons resultados perto da região da medição, entretanto que em profundidades afastadas as previsões podem variar do real.

Deve-se entender bem, que a variação do expoente faz variar a magnitude das tensões efetivas em relação aos desvios de uma medição de porosidade (DT, RHOB, RES.) e à redução normal da mesma com a profundidade (*Trend* – compactação normal). Por esses motivos, resulta conveniente variar o expoente conforme as propriedades físicas do meio variem tanto em profundidade quanto lateralmente. Pode-se afirmar que o expoente de Eaton não só é variável de bacia em bacia, ou de poço em poço, senão que também pode variar na profundidade do poço, dependendo da estratégia de calibração. Portanto, o valor do expoente de Eaton, e sua variação na região de estudo, representa uma primeira incerteza nos cálculos determinísticos.

Uma segunda incerteza está presente no traço do *Trend*. O *Trend* é traçado manualmente por cada analista de geopressões e segundo o registro de porosidade em análise. O *Trend* representa a variação normal da porosidade com a profundidade por efeitos do incremento da sobrecarga num processo normal de compactação. No método de Eaton, o registro que indica a variação da porosidade é plotado versus a profundidade em escala semilogarítmica. Nesta escala, Eaton (1969, 1972 e 1975) mostra na mesma escala semilogarítmica *Trends* de forma reta e curva.

Segundo Pennebaker (1968) o *Trend* deve ser traçado sobre registros (vinculados à porosidade) discriminados em camadas de folhelhos, pois duas litologias diferentes podem ter *Trends* diferentes. Assim mesmo, Pennebaker (1968) mostra na figura 38 que as idades geológicas de uma mesma formação podem resultar em *Trends* com a mesma inclinação (paralelas), afirmando ainda que um folhelho mais antigo (rocha mais compactas) apresenta menos volume de poros que um folhelho recente (rocha branda). No caso de variações geológicas graduais, os registros de porosidade não se apresentam como anormais, portanto o efeito da idade geológica na formação não é considerado de muita influência no *Trend* (Pennebaker, 1968). Resume-se o seguinte: (a) numa escala semilogarítmica o *Trend* pode ser linear ou curvo dependendo da velocidade da sedimentação, (b) pode-se traçar um ou mais *Trends* num mesmo poço, caso existam variações muito amplas de idades geológicas; embora esses *Trends* sejam paralelos, segundo Pennebaker (1968).

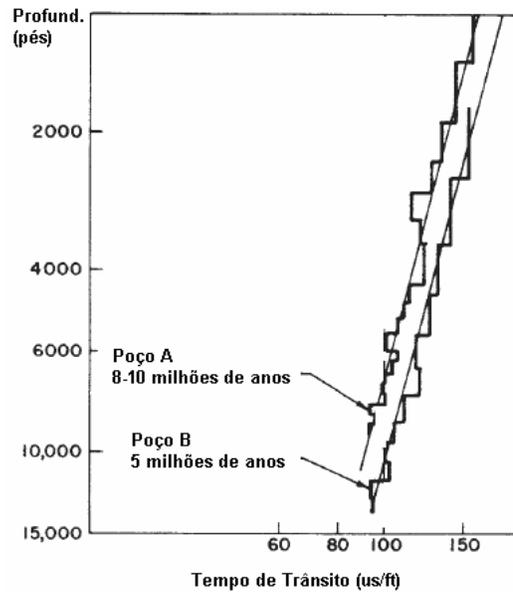


Figura 38 Efeitos da idade geológica no *Trend*. (Pennebaker, 1968)

Na definição do *Trend*, três pontos são importantes: (a) existência de uma região normalmente compactada para poder traçar o *Trend*, (b) o traço do *Trend* vai depender da confiabilidade do perfil que indique a porosidade, e (c) com um mesmo perfil pode-se traçar *Trends* diferentes dependendo do analista que revisa o registro. Dependendo da localização do *Trend*, os desvios podem incrementar ou diminuir (em relação ao registro observado indicador da porosidade) e provocar incrementos ou decrementos na pressão de poros. Portanto, existem muito fatores que incrementam a incerteza do *Trend*. Segundo Matthews (2004), as incertezas vinculadas ao traço do *trend* são: a forma do *trend*, incerteza dos dados de calibração, incerteza do analista para traçar o *trend*, variação da salinidade, efeitos da temperatura, inconformidades e falhas.

Outro parâmetro que entra na discussão é o gradiente de pressão de poros normal ( $PP_n$ ). Esse parâmetro foi definido no capítulo 2, e segundo Falcão (2002) a  $PP_n$  é função da salinidade da água; pode variar a partir de 8,33 ppg (0,433psi/ft) em água fresca até 8,9 ppg (0,465 psi/ft) em água saturada com 100000 ppm de NaCl. O conteúdo de sal na água varia com a profundidade, com a presença de corpos salinos, com a pressão de poros, entre outros fatores. Portanto, esse parâmetro apresenta incerteza igual aos anteriormente descritos.

Numa primeira estimativa do gradiente de pressão de poros através do método de Eaton (1975), foi assumido os valores de 8,75 e 3,0 correspondentes ao gradiente de pressão normal e ao expoente de Eaton, respectivamente. Na figura 39 pode-se observar que a previsão difere dos valores MDT, requerendo o

modelo uma calibração de seus parâmetros. Para conseguir isto, precisa-se avaliar qual destes parâmetros influenciam mais no modelo. Uma análise de sensibilidade é descrito no item seguinte com estes fins.

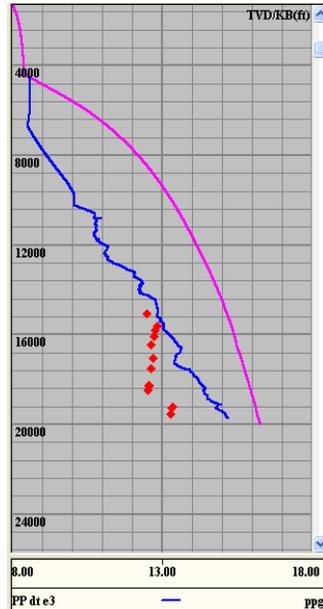


Figura 39 Primeira estimativa do gradiente da pressão de poros do poço “Analogue”, através do modelo de Eaton Sônico.

### 3.3.2. Análise de sensibilidade do modelo de Eaton – Sônico

Pode-se observar na figura 39 que as estimativas se afastam das medições MDT, além disso, esses afastamentos aumentam com a profundidade. A seguir gera-se um grupo de hipóteses que justifiquem esses erros:

1. Incerteza nos registros de medição: registro de porosidade (sônico), densidade (para fornecer o gradiente de sobrecarga), e o perfil que infere a litologia.
2. Incerteza no valor do gradiente de pressão de poros normal.
3. Variação do expoente de Eaton na profundidade do poço.
4. Que outro mecanismo de geração de sobrepessão além da subcompactação esteja presente. Portanto o modelo não seria representativo.
5. Que o *Trend* não represente a tendência normal da compactação dos sedimentos, ou que exista mais de um *Trend* para representar a compactação normal.

Na figura 40 se observa os resultados da previsão da pressão de poros mantendo constante o *trend* “NTL DT” (gráfico 1 – cor vermelho), o expoente igual a 3, e variando-se o gradiente de pressão de poros normal com os valores de 8,33 e 8,90 ppg. Os resultados são mostrados em cor azul claro e em cor azul escuro respectivamente. Os maiores efeitos da variação do  $PP_n$  (0,50ppg) são observados perto do fundo do mar onde se encontram as regiões normalmente compactadas; e como era de esperar, os gradientes oscilam perto dos valores 8,33 e 8,90 ppg, para cada caso. O efeito desse parâmetro perde importância a partir do início da região anormalmente compactada; onde outros parâmetros do modelo de Eaton têm maiores influências nos resultados, segundo a formulação de Eaton (1975).

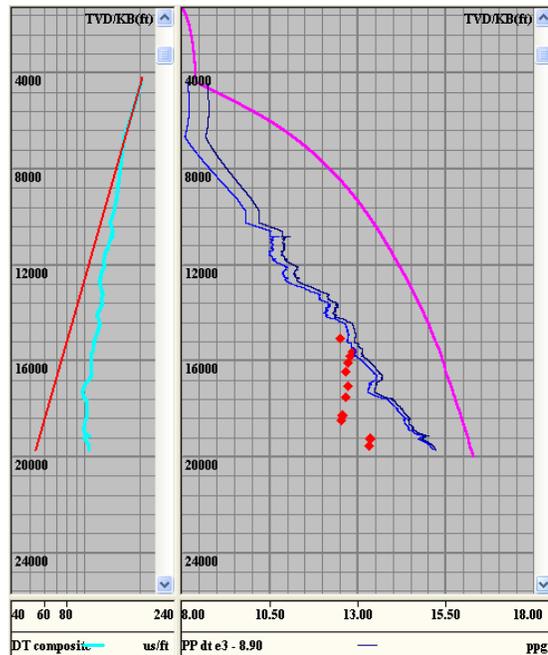


Figura 40 Efeito da variação do gradiente da pressão de poros normal na previsão da pressão de poros do poço Analogue.

Na figura 41, gráfico 2 mostra-se os resultados da variação dos valores do expoente de Eaton desde 2,5 (cor verde claro) até 3,5 (cor verde escuro). Assumiu-se um valor constante do gradiente de pressão normal de 8,75 ppg, assim como a utilização de um único *trend* “NTL DT” (mostrado em cor vermelho no gráfico 1 da figura 41).

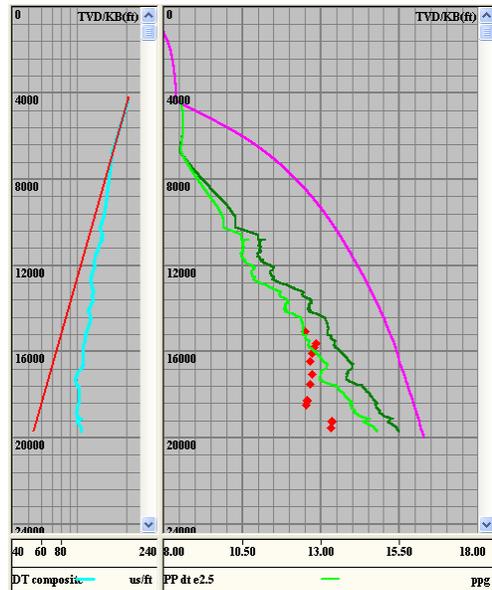


Figura 41 Efeito da variação do expoente de Eaton sônico na previsão da pressão de poros.

Observa-se que o expoente de Eaton tem um efeito maior no gradiente da pressão de poros quanto maior a profundidade. Isso se deve aos maiores desvios do *Trend* frente ao registro sônico observado (ou pelas menores razões  $\Delta t_n/\Delta t_o$ ), os quais decrescem exponencialmente, e provocam uma redução do gradiente de tensões efetivas normais ( $S-PP_n$ ) para incrementar o gradiente da pressão de poros na região anormalmente compactada. Nos resultados existem diferenças no gradiente da pressão de poros até 1 ppg aproximadamente; ainda assim as estimativas são incertas em relação às medições RFT.

Agora mantêm-se constantes o expoente de Eaton em 3, um PP normal de 8,75 ppg, e variamos a posição do *trend*. A figura 42 mostra os efeitos dos dois *trends* definidos como “NTL otimista” (cor laranja) e “NTL pessimista” (cor preto). Os resultados da PP são apresentados na mesma figura, gráfico 2, com suas respectivas cores.

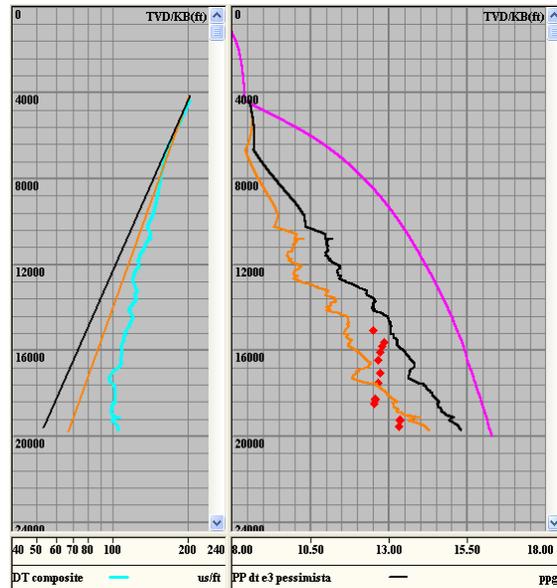


Figura 42 Efeito da variação do *Trend* na previsão da pressão de poros.

Existem técnicas complementares no processo de calibração do modelo em questão. Trata-se de usar mais de uma linha reta de tendência, baseados na variação das idades geológicas da formação. A figura 43 mostra o resultado final desta técnica, onde se utilizam 3 *trends*, um expoente igual a 3, e um gradiente de pressão de poros normal de 8,75ppg.

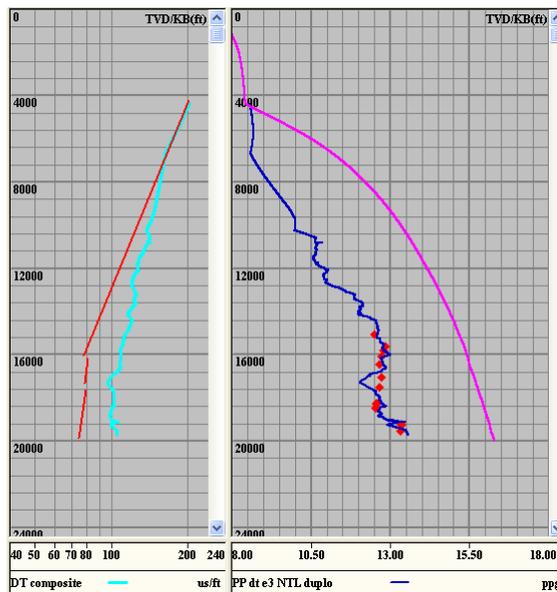


Figura 43 Calibração do modelo de Eaton através de um *Trend* quebrado em três partes.

Pode se concluir que as variações do *trend* e do expoente de Eaton são os que maior influenciam na previsão da pressão de poros.

### 3.4. Aplicação do Modelo de Bowers (1995)

#### 3.4.1. Parâmetros do modelo de Bowers

O método de Bowers (1995) é amplamente descrito na seção 2.4.2.8 e emprega as equações 22, 23 e 24 para seu desenvolvimento. Precisa-se agora definir as fórmulas de aplicação para a previsão da pressão de poros para tempos intervalares (método de Bowers Sônico); apresentando as equações tanto para a curva virgem quanto para a curva de descarga. É importante reconhecer que os tempos intervalares são medidos em milionésimos de segundo ( $\mu\text{s}$ ) por unidade de comprimento, portanto na formulação de Bowers bastará substituir a velocidade intervalar pelo termo  $(10^6/\Delta t)$ . Na figura 44 mostra-se à influência do mecanismo da subcompactação (caso a) e subcompactação mais expansão de fluidos (caso b). Depois são apresentados os mesmos casos utilizando velocidades intervalares, mostrados na figura 45.

#### 1. Aplicação de Bowers - Sônico

Para o caso (a) se utiliza a equação 43. No caso (b) se utilizam as equações 44 e 45.

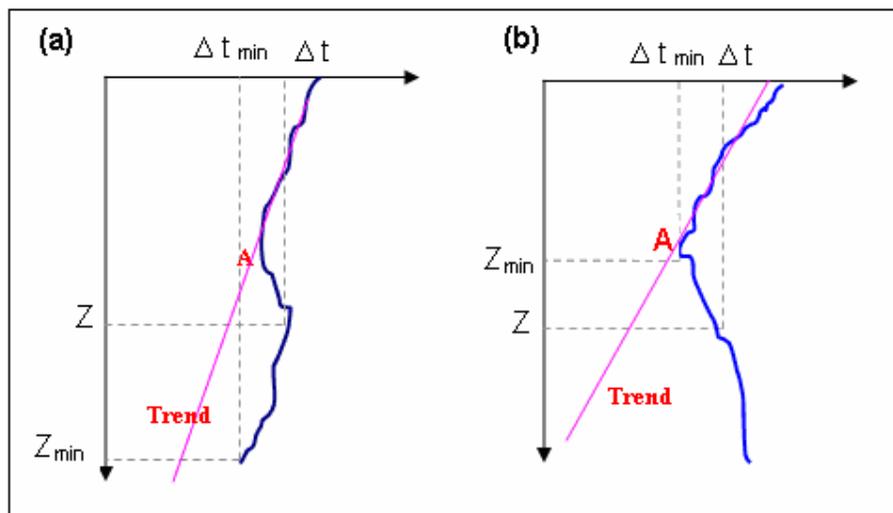


Figura 44. Aplicação do Modelo de Bowers Sônico para registros de tempos intervalares: (a) sem alívio de tensões efetivas, e (b) com alívio de tensões efetivas.

Se  $Z < Z_{\min}$ , então:

$$\frac{p}{Z} = \frac{\sigma_v}{Z} - \frac{\left[ \frac{10^6}{\Delta t} - \frac{10^6}{\Delta t_o} \right]^{\frac{1}{B}}}{Z} \quad (43)$$

Se  $Z > Z_{\min}$ , então:

$$\frac{p}{Z} = \frac{\sigma_v}{Z} - \frac{\left( \frac{10^6}{\Delta t} - \frac{10^6}{\Delta t_o} \right)^{\frac{U}{B}} \cdot (\sigma_{\max})^{1-U}}{Z} \quad (44)$$

$$\sigma_{\max} = \left[ \frac{10^6}{\Delta t_{\min}} - \frac{10^6}{\Delta t_o} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (45)$$

Onde:

$\Delta t$  : tempo intervalar (us/ft),

$\Delta t_o$  : tempo intervalar medido no *mudline* (fundo do mar) (us/ft),

$Z$  : profundidade de leitura do registro sônico (ft),

$Z_{\min}$  : profund. correspondente à leitura de tempo intervalar mínimo (ft),

$p$  : pressão de poros (psi),

$\sigma_v$  : pressão de sobrecarga (psi),

$A, B, U$  : parâmetros do modelo de Bowers.

Dependendo da existência da descarga de tensões efetivas, o valor de  $Z_{\min}$  varia consideravelmente. Embora, notar que na região de sobrepressões existe uma tendência típica do registro indicador da porosidade (neste caso: tempo sônico) para cada caso: no primeiro existe uma diminuição dos tempos ainda estando numa região sobrepressurizada; observando diminuição dos valores de  $\Delta t$  porque ainda numa subcompactação o número de contatos entre as partículas aumenta com a profundidade pelos efeitos da sobrecarga, no entanto, no caso (b) os efeitos de descarga produzidos pela expansão de fluidos

acrescentam os poros de interconexão (modelo de Bowers e Katsube, 2002), diminuindo os contatos entre partículas e, portanto os tempos sônicos seguem incrementando-se. Neste segundo caso  $Z_{\min}$  corresponde ao início do descarregamento, e no caso (a) corresponde ao ponto com menor  $\Delta t$  de todo o registro. Este parâmetro serve como um condicional para selecionar a formulação respectiva (usado no pacote computacional Predict). O comportamento é similar no caso seguinte, onde se utilizam velocidades no lugar de tempos sônicos.

## 2. Aplicação de Bowers – Velocidade Intervalar

Para o caso (a) se utiliza a equação 46. No caso (b) se utilizam as equações 47 e 48.

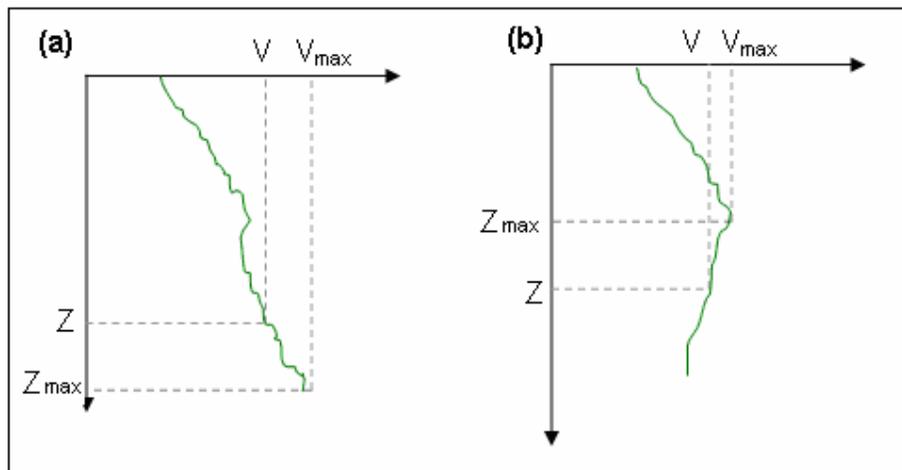


Figura 45. Aplicação do Modelo de Bowers utilizando registros de velocidades intervalares: (a) sem alívio de tensões efetivas, e (b) com descarregamento de tensões efetivas.

$$\frac{p}{Z} = \frac{\sigma_v}{Z} - \frac{\left[ \frac{V - V_o}{A} \right]^{\frac{1}{B}}}{Z} \quad (46)$$

$$\frac{p}{Z} = \frac{\sigma_v}{Z} - \frac{\left(\frac{V - V_o}{A}\right)^{\frac{U}{B}} (\sigma_{\max})^{1-U}}{Z} \quad (47)$$

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{V_{\max} - V_o}{A}\right)^{\frac{1}{B}} \quad (48)$$

Agora será aplicado o método de Bowers Sônico para o poço “Analogue”, descrito na aplicação do método de Eaton Sônico. Observa-se que o modelo de Bowers Sônico depende em geral de 6 parâmetros: A, B, U,  $\Delta t_o$ ,  $PP_n$  e  $\Delta t_{\min}$  (ou  $Z_{\min}$ ). É importante ressaltar que os parâmetros A, B,  $\Delta t_o$  e  $PP_n$  são refletidos tanto no gradiente de pressão quanto no *trend* de Bowers. O *Trend* de Bowers é obtido pela equação 49 no caso de usar registros sônicos (ou tempos intervalares obtidos através da sísmica).

$$Z = \frac{\left(\frac{10^6 - 10^6}{\Delta t - \Delta t_o} \cdot \frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{B}}}{S - PP_n} \quad (49)$$

Onde:

- V : velocidade intervalar (ft/s),
- $V_o$  : velocidade intervalar medido no *mudline* (fundo do mar) (ft/s),
- Z : profundidade de leitura do registro de velocidade intervalar (ft),
- $Z_{\max}$  : profundidade da leitura de velocidade intervalar máxima (ft),
- S : gradiente de sobrecarga,
- $PP_n$  : gradiente normal de pressão de poros.

O parâmetro  $PP_n$  apresenta a mesma incerteza mostrada no caso da aplicação de Eaton.

$\Delta t_{\min}$  (ou  $Z_{\min}$ ) pode ser observado na figura 36, gráfico 3. Nesta aplicação (com o poço Analogue) apresentam-se os dois casos de Bowers - sônico (1a e 1b) em diferentes intervalos, na profundidade do registro sônico; como o mostrado no intervalo de 11275 – 12410 pés, investigado pela técnica de Chopra

e Huffman (2006). Embora, pelos pequenos incrementos de tempo sônico, poderia considerar-se que o fator de descarga  $U$  está perto de 1 ou poderia considerar-se como **primeira hipótese  $U=1$**  em toda a profundidade do poço. O intervalo onde se aprecia o maior efeito de alívio de tensões, se inicia em  $\Delta t_{\min}$  de 93,13 us/ft ( $Z_{\min}$  de 17260 pés); e como **segunda hipótese** poderia assumir-se que até esta profundidade atua só a subcompactação (caso 1a), e que depois dos 17260 pés está presente a expansão de fluidos (caso 1b). Pode-se apreciar que existe a incerteza de usar ou não usar o modelo de descarga de Bowers quando as variações são pequenas ou quando existem ciclos repetitivos na profundidade do poço. Neste trabalho se considerou a primeira hipótese para estimar o gradiente de pressão de poros; embora, se considera a segunda hipótese para desenvolver a análise de sensibilidade do parâmetro  $U$  no modelo de Bowers (item 3.4.2).

Em resumo, não existe maior incerteza na escolha do parâmetro  $\Delta t_{\min}$ ; já que ele pode ser visualizado no mesmo registro. Em relação ao parâmetro de descarga  $U$  existe incerteza em quanto sua escolha, pois não se sabe quanto representa aquela queda de tempo sônico, em outras palavras que tanto se afasta a curva de descarga da curva virgem.

O tempo sônico  $\Delta t_0$  (ou velocidade no fundo do mar  $V_0$ ) corresponde ao intervalo de tempo da onda sônica que percorre os sedimentos saturados localizados no fundo de mar, e que na prática é considerado como o tempo de trânsito da onda sônica na água salgada; sendo o modelo de Wilson (1963) uns dos mais usados para sua previsão. Esse parâmetro varia segundo a densidade e a elasticidade do meio, portanto estão em função da temperatura, das partículas presentes ou dissolvidas (por exemplo, a salinidade), e da pressão hidrostática. Segundo Alkan et al. (2006), segundo Ingham (1992), o valor médio dessa velocidade em água salgada é 1500 m/s (4921,26 ft/s) a 0°C, 35000 ppm, e 1 atmosfera de pressão; embora, este valor pode variar entre 1387 m/s (4550,525 ft/s) e 1529 m/s (5016,404 ft/s), dependendo das características do meio (Nakiboglu 1993). Os efeitos deste parâmetro no modelo de Bowers, marcam o ponto de início de onde será traçado o *trend* de Bowers; portanto apresenta uma maior influência nas pressões de poros iniciais. É importante indicar que este parâmetro também pode ser obtido através da sísmica ou através do perfilagem do poço, portanto sua incerteza estaria vinculada a possíveis erros de medição e/ou incerteza no modelo sísmico usado, embora neste trabalho se assume que este valor é verdadeiro. No caso do poço *Analogue*, o tempo sônico registrado no *mudline* foi de 200 us/ft.

Os parâmetros A, B representam as características físicas do meio, portanto eles podem variar de bacia em bacia ou de poço em poço. Sendo assim, existe incerteza na sua utilização, dependendo da informação existente da bacia em estudo. No presente trabalho, em relação aos parâmetros A e B, inicialmente se pensou que podiam ser estimados a partir de uma regressão da curva virgem, embora para conseguir isto, se precisa dispor das tensões efetivas em pontos suficientes como para plotar a curva virgem. Na maioria dos casos esta informação não está disponível. Para este problema, a Knowledge Systems utiliza uma técnica que permite estimar e/ou calibrar “A” e “B” sem usar as tensões efetivas; e para isto só se precisa dos registros: OBG, DT (ou qualquer outro registro que relacione porosidade), e qualquer informação relacionada à PP (medições RFT, *kicks*, peso de lama, etc.). Uma recomendação de Bowers<sup>9</sup> é trabalhar com os valores iniciais (*default*) do Predict, os quais correspondem a  $A=14,2$ ,  $B=0,724$ ,  $\Delta t_0=200\text{us/ft}$ ,  $PP_n=8,75\text{ppg}$ , e daí proceder a calibração. O processo iterativo que propõe o Predict é menos direto que o inicialmente pensado neste trabalho, embora representa uma grande vantagem nos casos onde não existem suficientes dados de tensões efetivas.

Antes de iniciar a análise de sensibilidade, se informa que o *software* Predict, em relação à escolha de parâmetros (como em outros módulos do mesmo), se permite usar valores muito afastados das recomendações de Bowers, e que em alguns casos permite usar valores fora de lógica. Portanto, deve-se ter em mente uma faixa real de cada um dos parâmetros a utilizar para evitar resultados absurdos.

### 3.4.2. Análise de sensibilidade do modelo de Bowers

Segundo Bowers<sup>10</sup> (2006) a estimativa do gradiente da pressão de poros é muito sensível ao parâmetro “B”. Além disso, ele informa que usa o parâmetro A para melhorar as calibrações dos resultados nas maiores profundidades. Isto será revisado no presente item.

Os efeitos da variação do parâmetro A podem ser observados na figura 46 (ambos os gráficos), onde “A” varia  $\pm 6\%$  a partir do valor referencial de 14,2. Para este caso se consideram fixos os valores de  $PP_n=8,75\text{ ppg}$ ,  $\Delta t_0=200\text{ us/ft}$ ,

---

<sup>9</sup> Comunicação pessoal 2006.

<sup>10</sup> Idem

$B=0,724$ , e  $Z_{\min}=19750$  ft (ou seja  $U=1$  em todo o poço, sem alívio de tensões efetivas).

Similarmente, os efeitos do parâmetro “B” foram variados em  $\pm 6\%$  a partir do valor de referência  $0,724$ , e da fixação de:  $PP_n=8,75$  ppg,  $\Delta t_0=200$  us/ft,  $A=14,2$ , e  $Z_{\min}=19750$  ft ( $U=1$ ). Os resultados são mostrados na figura 47.

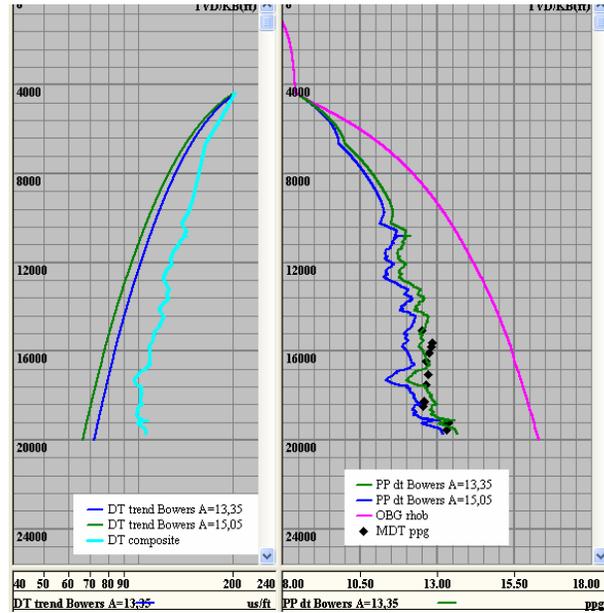


Figura 46 Efeitos da variação do parâmetro “A” de Bowers ( $\pm 6\%$ ) no gradiente de pressão de poros.

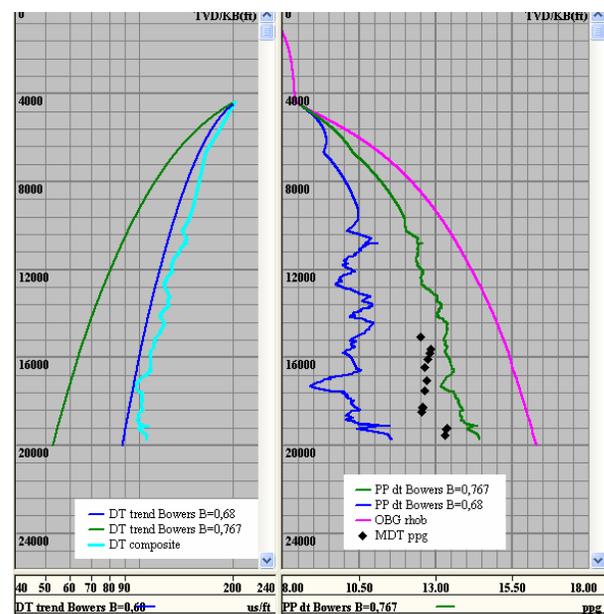


Figura 47 Efeitos da variação do parâmetro “B” de Bowers ( $\pm 6\%$ ) no gradiente de pressão de poros.

Em ambos os gráficos (figuras 46 e 47) as mudanças são diretamente proporcionais entre si, embora o parâmetro “B” é muito mais sensível que “A” para uma mesma variação ( $\pm 6\%$ ); isto se deve pela formulação de Bowers, onde o expoente “B” reduz as tensões efetivas. No caso do parâmetro “A”, o gradiente de pressão de poros é mais sensível na profundidade do poço que na superfície; o qual se deve às diferenças de leituras entre o registro de tempo sônico e o  $\Delta t_0$ .

Na figura 48 é observado o efeito da variação do gradiente de pressão de poros normal ( $PP_n$ ). Para ser consistente, se utilizou a mesma variação no parâmetro (6% a partir do valor de 8,75ppg), e se manteve constante os demais parâmetros:  $\Delta t_0=200$  us/ft,  $A=14,2$ ,  $B=0,724$ , e  $Z_{min}=19750$  ft ( $U=1$ ). Observa-se na figura 48, que não existem variações nos resultados, ambas estimativas se superpõem (ver gráfico 2). Isto se deve simplesmente porque Bowers só utiliza este parâmetro para a definição analítica do *Trend*, junto aos parâmetros A, B,  $\Delta t_0$  e o gradiente de sobrecarga (S). A variação do  $PP_n$  provoca um deslocamento no ponto de início do *Trend* tal como é mostrado no gráfico 1 da figura 48, onde o ponto de início apresenta um  $\Delta t < \Delta t_0$ . Neste sentido, seria fácil a calibração do parâmetro  $PP_n$ , pois o primeiro valor de  $\Delta t$  deve ser no *mudline*, portanto para um valor de  $PP_n$  selecionado, o *Trend* deve coincidir com o  $\Delta t_0$  por

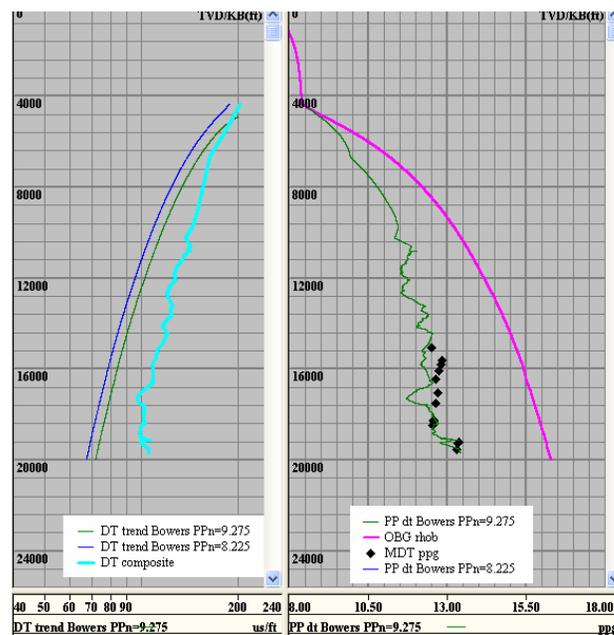


Figura 48 Efeitos da variação do parâmetro “ $PP_n$ ” de Bowers ( $\pm 6\%$ ) no gradiente de pressão de poros.

estar ao lado da água salgada. No caso do método de Eaton, o *Trend* é feito manualmente iniciando seu traço no *mudline*; indiferente ao valor do  $PP_n$ . Em todo caso, em ambos os métodos, esse parâmetro não representa maior problema nas estimativas do gradiente da pressão de poros.

Em relação ao *Trend*, uma observação final: no caso de Bowers, o *Trend* não bate com a região considerada normalmente pressurizada, assim considerada no caso da análise de Eaton. Essa divergência traz diferenças nas estimativas, especialmente nas regiões superiores do poço em análise. Esses efeitos são revisados no item 3.4, onde são comparados ambos os modelos, junto a outros dois modelos de previsão relativamente recentes.

Para a análise do parâmetro de descarga  $U$ , e com o objetivo de visualizar os efeitos de sua variação nos resultados de gradiente de pressão de poros, se considerou a hipótese 2 descrita na seção 3.4.1, onde se considera  $Z_{\min}=17260$  pés, portanto existe um intervalo de formação onde se considera uma descarga por efeitos da expansão de fluidos; portanto  $U>1$ . Foram testados os valores de  $U=1, 2, \dots, 8$ ; mantendo constantes os valores de  $\Delta t_0=200$  us/ft,  $PP_n=8.75$  ppg,  $A=14,2$ ,  $B=0,724$ , e  $Z_{\min}=17260$  ft. Os resultados são mostrados na figura 49.

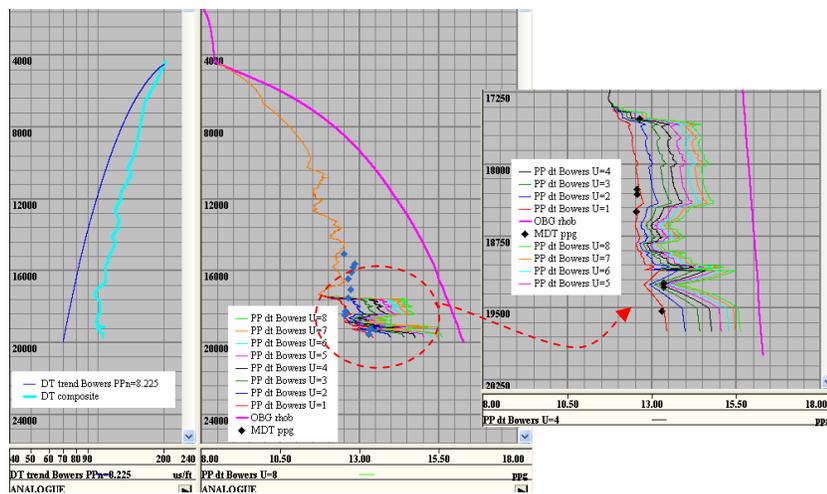


Figura 49 Efeitos da variação do parâmetro “U” de Bowers desde 1 até 8, no gradiente de pressão de poros.

Na figura 49, à direita, se observa que para  $U=1$  batem 4 medições MDT com a previsão, e para  $U=3$  batem outras 3 medições MDT. Esta variação de  $U$  e seus resultados, poderia ser interpretada como uma seqüência de camadas com e sem descarga de tensões efetivas. O método de Bowers, através de seus dois modelos, permite estimar os gradientes de pressão de poros gerados tanto

por subcompactação quanto por expansão de fluidos, embora pode-se atingir os resultados de expansão de fluidos com os parâmetros A, B (numa curva virgem,  $U=1$ ), quando as sobrepressões geradas não são muito elevadas (<80% *overburden gradient*). Quando as sobrepressões são altas, a utilização de A e B não será suficiente para a calibração do modelo e, portanto terá que se recorrer ao modelo de descarga utilizando o parâmetro U; que para esse exemplo seria 3.

É importante ressaltar que o método de Bowers permite interpretar e modelar fisicamente o excesso de pressão; no entanto o método de Eaton pode precisar de *Trends* fora da realidade com objetivo de calibrar os resultados do modelo. A técnica de calibrar o modelo de Eaton através do *Trend* ou através do expoente, poderia gerar os mesmos resultados no processo de calibração do modelo, embora construir *Trends* sem um sentido físico, poderia gerar previsões pouco certas num poço projeto. No presente trabalho, no modelo de Eaton, considera-se apropriado optar pela calibração através do expoente de Eaton, pois ele controla diretamente os desvios do *Trend* e as sobrepressões presentes mantendo o sentido físico da compactação.

### **3.5. Comparação de Resultados de Pressão de Poros a partir de 4 Modelos Baseados em Perfilagem**

Um trabalho interessante seria poder calibrar os parâmetros que participam num grupo de modelos de previsão de pressão de poros, para depois observar a efetividade de cada modelo sobre um poço, cuja lama é conhecida, e observar qual deles apresenta uma melhor aproximação. Embora, devido às incertezas (revisadas na seção 3.3) associadas, tanto dos parâmetros de cada modelo como às medições tipo *well logs* ou os obtidos através da sísmica e suas prováveis variações laterais e em profundidade, resultaria ilógico preocupar-se pela exatidão de cada modelo, se seus componentes apresentam tal grau de incerteza.

Nesta seção se pretende observar o comportamento dos modelos, já calibrados, no mesmo poço, mas em outras profundidades onde não se dispõe de informação de pressão de poros. Se os modelos divergem se confirmará que a calibração de parâmetros deve ser feita ao longo do poço de perfuração, portanto a técnica MWD (Measurement While Drilling) representaria uma solução independente do modelo de previsão de pressão de poros usado.

Utilizam-se os modelos de Eaton (1975), Bowers (1995), Kan e Swan (2001) e o modelo de Doyen (2004) para comparar e observar seus resultados na previsão da pressão de poros do poço Analogue (base de dados do Predict)<sup>11</sup>. Para ser complacente com os modelos, se considerou que o poço a ser analisado apresenta sobrepressões geradas só pelo fenômeno da subcompactação; não obstante que nas seções 3.2 e 3.4.2 se observou regiões com pequenas descargas de tensões.

A seguir serão informados os parâmetros utilizados na previsão segundo os modelos empregados. A figura 50 revela os resultados da calibração de cada um dos modelos.

### **Modelo de Eaton – Velocidade (1975)**

O *Trend* utilizado está constituído por duas linhas retas em cor verde, segundo o gráfico 1 da figura 50. O resultado da previsão é observado em cor verde no gráfico 2 da mesma figura. O expoente utilizado foi 3,3 e o gradiente de pressão normal 8,75 ppg.

### **Modelo de Bowers - Velocidade (1995)**

Procurarou-se valores de A e B para serem coerentes com a região normalmente compactada assumida na aplicação de Eaton. Durante a calibração do modelo, neste caso, se observou que existe mais de uma combinação de A e B que permita a calibração do modelo; o qual acrescenta mais a incerteza de escolher a combinação certa. Sayers (2002b) faz uma maior descrição desse assunto.

No gráfico 3 da figura 50 se observa o registro de velocidade (cor azul escuro), junto ao *Trend* de Bowers (cor azul claro), e no gráfico 4 se observa o gradiente de pressão de poros estimado (cor azul) junto ao gradiente de sobrecarga (cor roxa). Os parâmetros calibrados foram:

$V_0$  : 5000 ft/s,  
 A : 2,3,  
 B : 0,967.

---

<sup>11</sup> Não se dispõe do registro do peso da lama utilizado no poço Analogue. Isto dificulta apreciar a efetividade de cada método aplicado.

### Modelo de Kan e Swan (2001)

Este modelo não emprega um *Trend* e tampouco uma gradiente de sobrecarga. Os cálculos foram feitos em Excel e os resultados foram exportados para o Predict com fins comparativos; observando-se os resultados no gráfico 5 da figura 50 em cor laranja. Os parâmetros empregados foram:

K	:	3256,
$\Delta t_0$	:	665.90 us/m,
$R_w$	:	10 KPa/m,
$C_1$	:	0,050 KPa/us,
$C_2$	:	-0,00009 KPa/us <sup>2</sup> .

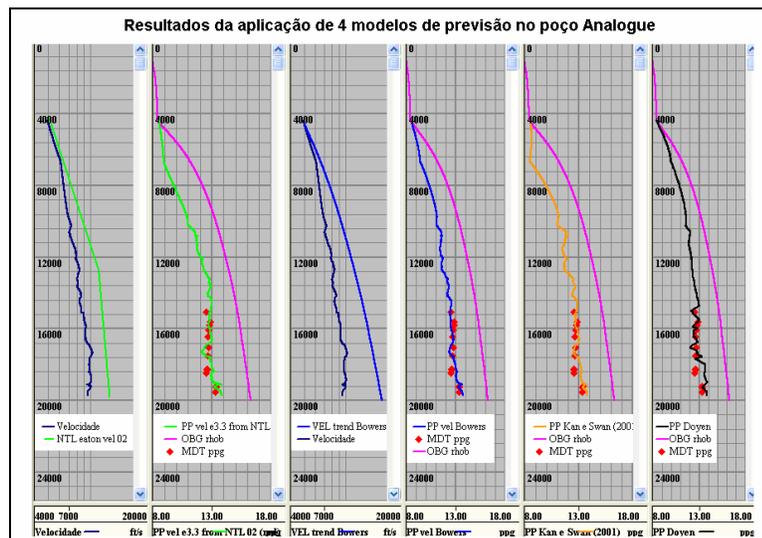


Figura 50 Resultado da previsão de pressão de poros no poço Analogue a partir de diferentes modelos baseados na sísmica. Quadrados em cor vermelha representam as medições MDT.

### Modelo de Doyen (2004)

A porosidade e o conteúdo de argilas foram obtidos por correlação de outras propriedades físicas das rochas; utilizando-se os registros de densidade e raios gama, respectivamente. Maiores detalhes do cálculo podem ser revisados em Hearst et al. (2000).

Este modelo tampouco utiliza *Trend*, portanto sua previsão é independente da região normalmente compactada. Os resultados podem ser observados no gráfico 6 da figura 50 em cor negra. Os parâmetros estimados foram:

$a_1$	:	4950 ft/s,
$a_2$	:	50,
$a_3$	:	50,
$a_4$	:	14,5,
$a_5$	:	8,73.

A figura 51 resulta de sobrepor os resultados da previsão e calibração respectiva dos 4 modelos numa mesma área gráfica. Pode-se concluir que (tentativamente) os 4 modelos conseguiram a calibração onde existiam dados de medições de pressão de poros; embora exista uma maior incerteza da pressão de poros no intervalo de 4500 a 14600 ft. Os 4 modelos variam nos resultados, observando-se faixas até de 1,5 ppg. O modelo de Kan e Swan (2001, em cor laranja) além de conservar os registros MDT, é o modelo que representa melhor os resultados na região normalmente compactada. Os modelos de Eaton (1975) e Bowers (1995) são mostrados em cor verde e azul, respectivamente. O modelo de Doyen (2004) apresenta os maiores resultados até a profundidade de 12540 pés aproximadamente. Em termos gerais, os 4 modelos apresentam a mesma tendência.

Qual deles está certo? Uma pergunta que não se pode responder pela falta de dados (peso da lama utilizado), mas pelo menos pode-se assinalar o seguinte:

- a. Os modelos podem ser calibrados.
- b. Existem incertezas nas respostas dos modelos ainda calibrados.
- c. Para o presente exemplo, foi mais fácil calibrar o *Trend* de Eaton que o *Trend* de Bowers.
- d. A melhor maneira de reduzir as incertezas é através das medições LWD, caliper, kicks, *seismic while drilling*; para poder atualizar os parâmetros e reduzir as incertezas.

Medições em tempo real, junto à análise probabilística em tempo real permitiriam conhecer com maior exatidão os valores da pressão de poros e portanto controlar a estabilidade do poço. No capítulo seguinte será revisada uma análise probabilística ao longo de um poço projeto, usando o modelo de Eaton e a técnica de simulação de Monte Carlo; partindo de dados e análises de pressão de poros de 4 poços de correlação.

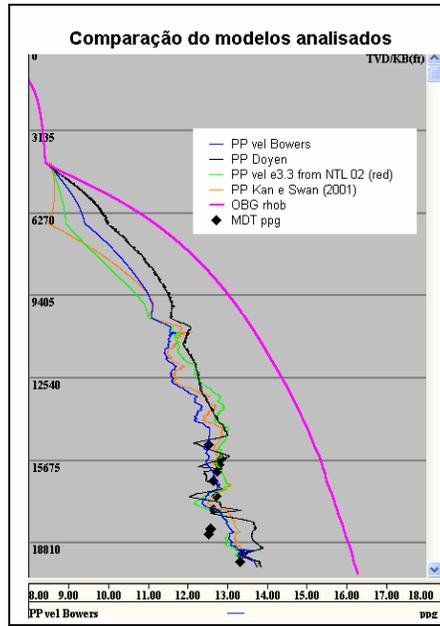


Figura 51 Comparação dos resultados dos modelos de Eaton, Bowers, Kan e Swan, e Doyen no poço Analogue.