

## 4 Análise de Pressão de Poros

Este capítulo visa apresentar a análise de pressão de poros dos poços DB-3, DB-4, DB-5 e DB-11. Os poços foram escolhidos para a determinação da tendência de compactação normal da região devido ao fato de representarem as características da região à qual pertencem, da sua localização e principalmente sua litologia, que se apresenta com as mesmas características dos poços da mesma região.

Além disso, os poços escolhidos são poços que apresentam dados de melhor qualidade para calibração das curvas e mais informações do processo de perfuração, boletins, pesos de fluidos e dados geológicos. Os dados de pressão de reservatório da região são dados originais, anteriores à início da produção do reservatório, portanto, correspondem aos dados de pressão de formação da região.

Um fato que deve ser levado em consideração é que, segundo a interpretação da geologia, não são encontradas ocorrências de reservatórios inclinados. Portanto, não foi realizado neste trabalho o estudo de transferência lateral.

Como primeira etapa, deve ser feita uma verificação do fenômeno de geração de pressão, para isso deve-se verificar a da curva de tensão vertical em função da porosidade. Através da curva de compactação é possível verificar em qual estado de tensão se encontra a rocha.

Segundo conceitos de mecânica dos solos, se houver uma relação linear entre porosidade e tensão vertical pode-se estimar que o solo encontra-se no estado normalmente adensado (não foi previamente adensado). Para isso os valores de pressão de poros serão correspondentes à curva de compactação normal, possui relação direta com a curva virgem. E os métodos de Eaton e de Bowers para estimativa de pressão de poros em folhelhos podem ser aplicados, uma vez que estes métodos são baseados em teorias de subcompactação.

Para isso foi construído um gráfico de tensão efetiva em função dos dados sônicos na profundidade. Considerando que o perfil sônico é utilizado como perfil de porosidade na indústria de petróleo.

Pode-se observar através do gráfico da Figura 4.1 uma relação linear entre os valores de tensão efetivas e sônicos. Essa relação é denominada de curva virgem e corresponde ao primeiro carregamento nos sedimentos argilosos. Quando o solo encontra-se nesse estado ele é considerado como um solo normalmente adensado.

A curva virgem apresentada na Figura 4.1 pode ser comparada aos resultados obtidos por Bowers em 1995 apresentados na Figura 2.10 (b) no Capítulo 2 deste trabalho.

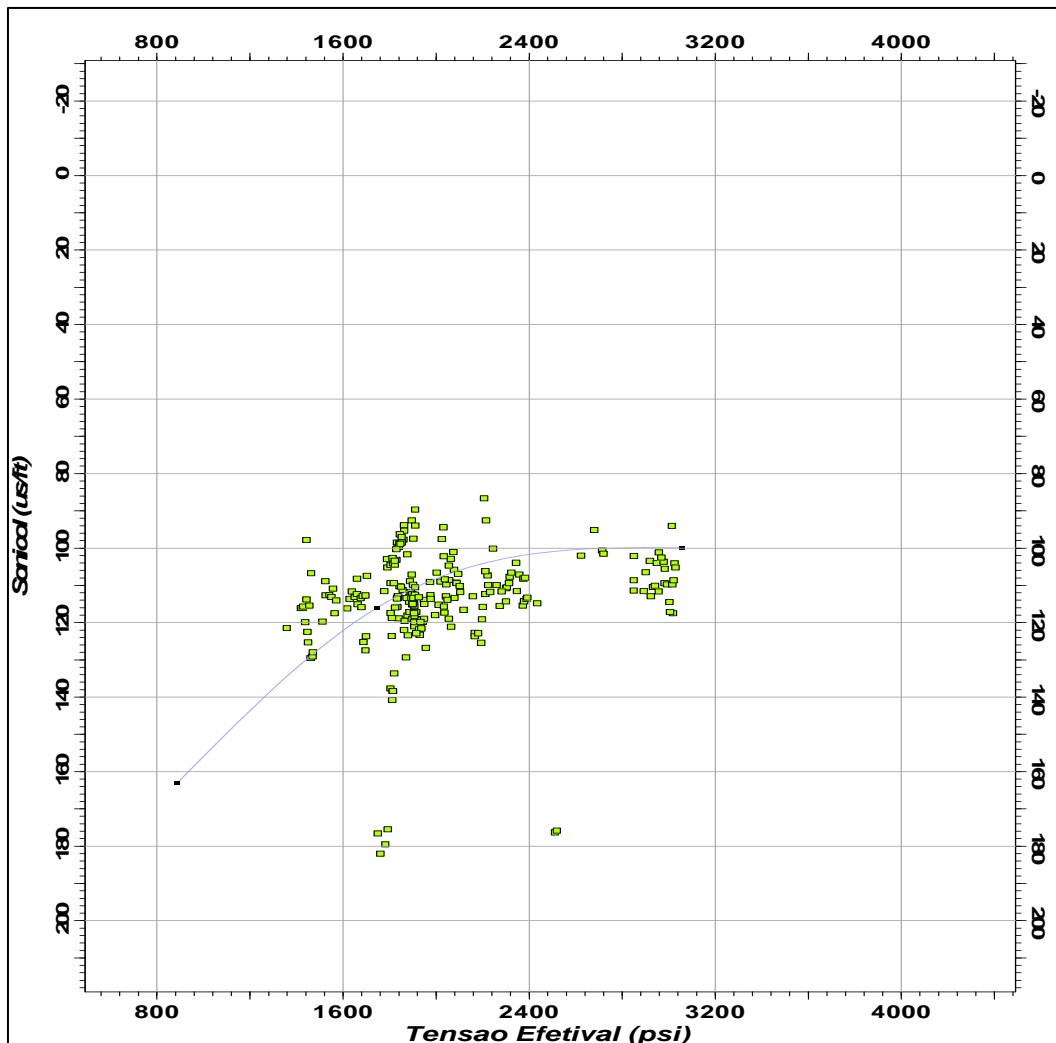


Figura 4.1 - Gráfico de tensão efetiva em função do sônico.

A técnica de obtenção da curva virgem pode ser utilizada como um método direto de estimativa de pressão de poros em uma região quando se possui muitos dados. Além disso, a curva virgem pode ser obtida através dos dados de peso de fluido de perfuração subtraído da sobrecarga em função dos dados sônicos, porém esse processo não corresponde ao comportamento real de pressão de poros em uma região uma vez que algumas vezes o peso de fluido de perfuração não corresponde efetivamente ao valor de pressão de poros.

Os modelos de Eaton e de Bowers para estimativa de pressão de poros foi utilizado após assumido que houve o fenômeno de subcompactação como gerador de pressão de poros anormais, ou a rocha encontra-se normalmente adensada. Lembrando que o fenômeno de subcompactação ocorre quando a rocha mantém a porosidade constante ao longo da profundidade, a tensão efetiva se mantém constante e como a tensão total aumenta com a sobrecarga logo a pressão de poros também aumenta.

Como análise preliminar de pressão de poros também são verificados o tipo de fluido encontrado no poço e a profundidade do contato. A Figura 4.2 é utilizada para esse tipo de verificação e observa-se através da inclinação da reta e de cálculos de densidade, a densidade do fluido de onde foi obtida a medida e se a conexão destes fluidos ou não. Através da Figura 4.2 estima-se que o reservatório está conectado, pois os dados de pressão são coerentes com uma tendência linear.

Um desvio dessa tendência poderia indicar um possível contato entre dois fluidos de densidades diferentes. Se houvesse esse desvio o efeito buyonce deveria ser considerado para as análises de pressão de poros.

#### **4.1. Gradiente de sobrecarga**

Para os poços analisados foram obtidos os gradientes de sobrecarga demonstrados na Figura 4.3. O gradiente de sobrecarga é obtido através dos dados do perfil de densidade, o perfil é composto pelo perfil obtido das ferramentas de perfilagem com a correlação de Miller para as profundidades mais rasas. Os perfis de densidade, em rosa, são apresentados no primeiro gráfico de cada poço e os gradientes de sobrecarga também são apresentados em rosa nos segundos gráficos de cada poço da Figura 4.3.

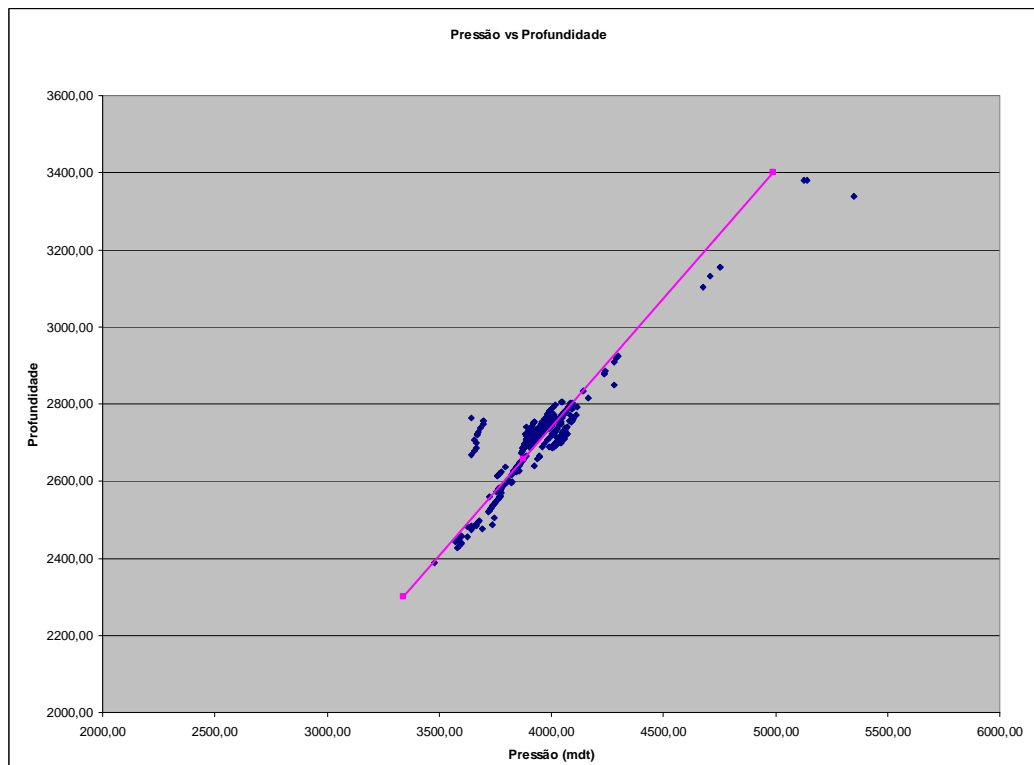


Figura 4.2 - Dados de MDT em função da profundidade.

Observa-se que o gradiente de sobrecarga apresentado possui um comportamento constante de crescimento de aproximadamente 1 psi/ft.

Através da equação 2.1 apresentada no capítulo 2 foi criado um cubo de sobrecarga através da propriedade de densidade modelada no capítulo 3. O programa Petrel® não possui recursos de análises de pressão de poros. Portanto, foi programado em sua calculadora com a equação 2.1 para que o cubo de pressão de sobrecarga fosse gerado. O cubo de gradiente de sobrecarga é apresentado na Figura 4.4.

Pode ser observado na figura o comportamento de crescimento constante do cubo de sobrecarga com a profundidade, o que é coerente com as expectativas. Na bacia estudada este gradiente varia de 8,0 ppg que é o gradiente no *mudline* até 13,5 ppg horizonte onde representa a base dos poços escolhidos para a análise.

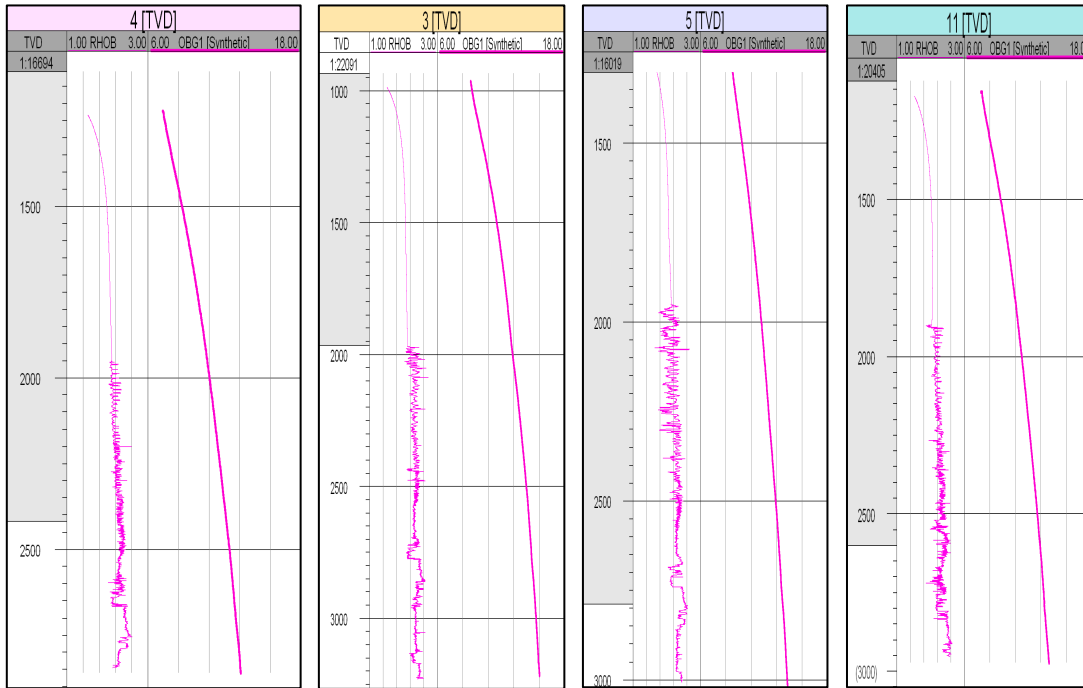


Figura 4.3 - Perfil Densidade e gradiente de sobrecarga.

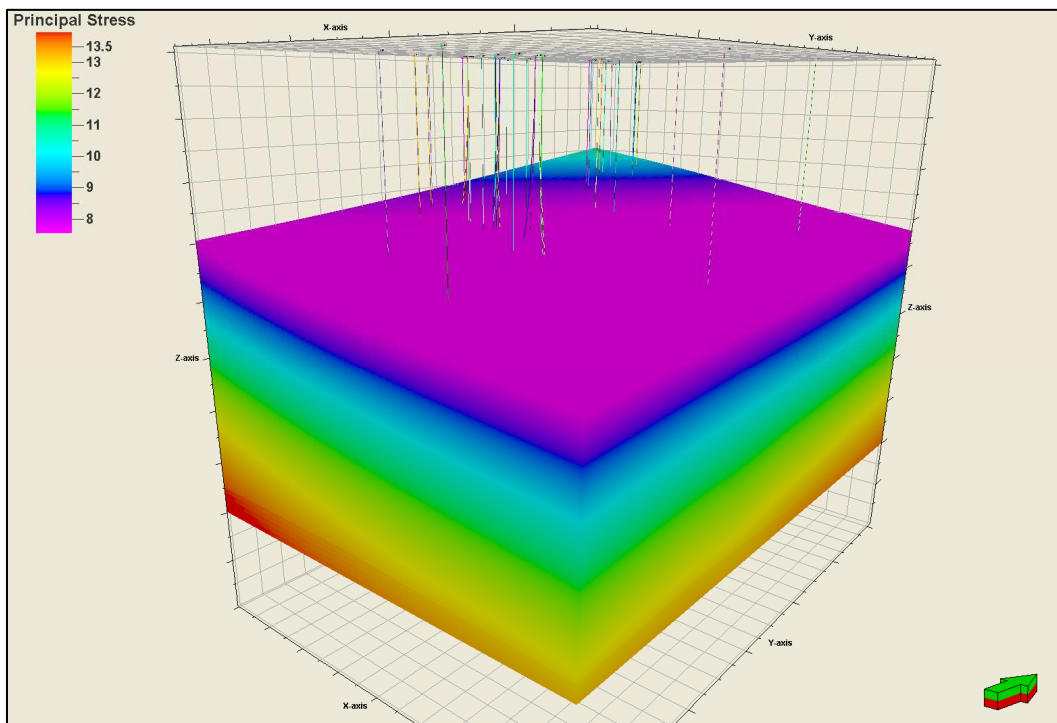


Figura 4.4 – Cubo de gradiente de sobrecarga.

## 4.2. Estimativa de pressão de poros utilizando o modelo de Eaton

A primeira etapa de estimativas de pressão de poros utilizando os métodos de Eaton é traçar a tendência de compactação normal. A tendência de compactação normal é obtida através da observação de uma tendência dos dados sônicos unidimensional na direção vertical.

Para isso foram filtrados os dados somente de folhelhos. Nesta fase de trabalho os dados de folhelhos utilizados foram os dados interpretados pela geologia. Porém, quando não houve um perfil de interpretação de fácies foi utilizado um filtro dos dados de Raios Gamma, para se obter os pontos de folhelhos. Em geral, os folhelhos apresentam altos valores de Raios Gamma devido à alta presença de material orgânico.

No trabalho presente, a escolha do filtro utilizando Raios Gamma, foi baseado na litologia interpretada dos poços. Para isso foram utilizados os dados sônicos referentes ao valores de Raios Gamma, maiores que a linha base que os divide.

Após concluído esse filtro, obtidos os dados de folhelho, finalmente foi traçada a tendência de compactação normal. Esta tendência foi traçada em um gráfico semi-logarítmico e se comporta como uma reta com a equação 4.1:

$$m = \frac{\log(\Delta t) - \log(\Delta t_1)}{D - D_1} \quad (\text{equação 4.1})$$

Onde  $m$  é o coeficiente angular da reta em um gráfico semi-logarítmico,  $\Delta t$  são os valores observados no parâmetro indicador de sônico em que a compactação ocorrida foi normal e  $D$  são os valores de profundidade nos pontos onde foram obtidos os parâmetros indicadores de sônico.

A Figura 4.5 apresenta o processo de obtenção da tendência de compactação normal dos poços utilizados para calibração do modelo. A tendência foi obtida iterativamente, após longo processo de tentativas, utilizando a estimativa de pressão de poros de Eaton os dados de pressão (MDT) obtidos em ensaios no reservatório.

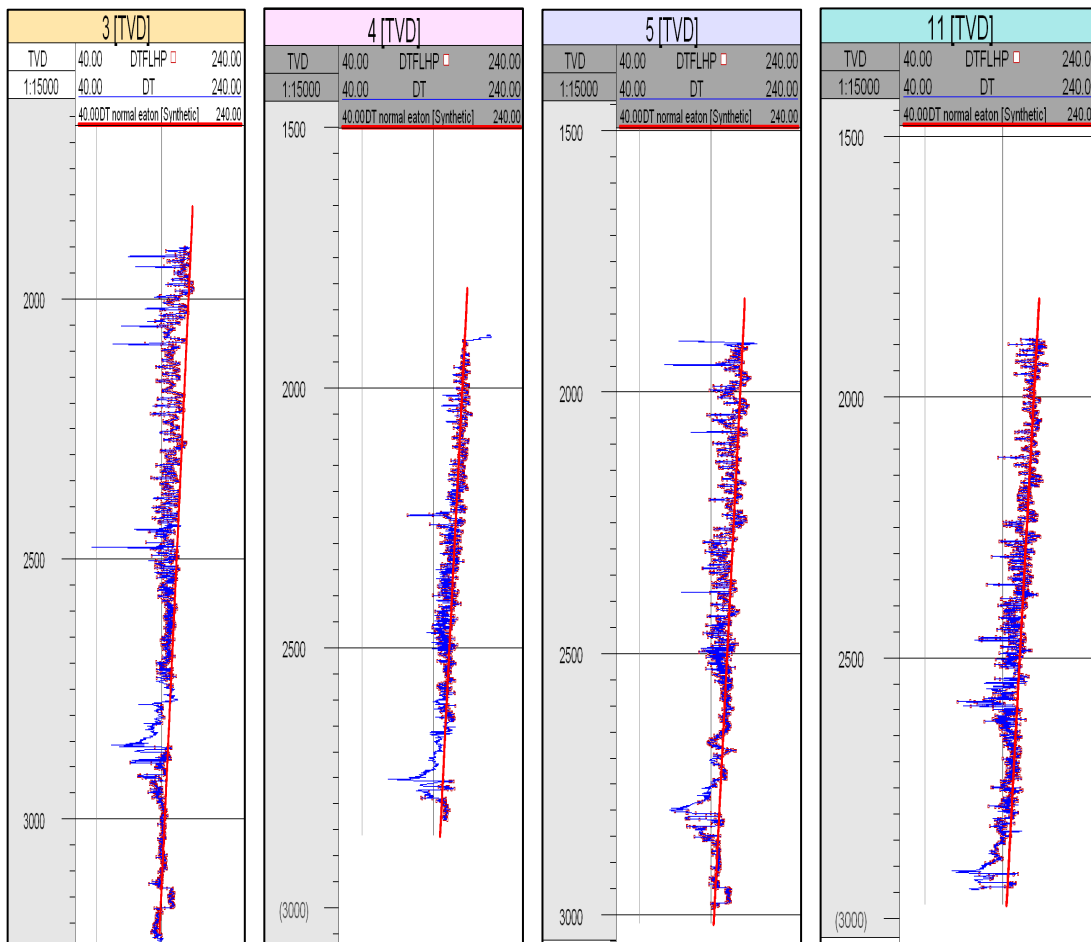


Figura 4.5 - Perfil sônico de folhelhos e tendência de compactação normal.

Logo a tendência de compactação normal assumirá a forma da equação 4.2.

$$\Delta t_n = \Delta t \cdot 10^{m(D-D_1)} \quad (\text{equação 4.2})$$

Através dos dados dos poços da Figura 4.5, foi obtido o valor de  $m$  que será posteriormente utilizado para a modelagem tridimensional do modelo de Eaton.

Na figura 4.6 são apresentados o gradiente de sobrecarga obtido através dos dados de densidade em rosa, o gradiente de pressão de poros obtido pelo método de Eaton em vermelho e os dados de pressão em pontos verdes.

As curvas apresentadas foram obtidas do modelo tridimensional de pressão de poros e comparadas com os dados de pressão (MDT). Nota-se que, nos 4 poços, foi possível gerar resultados do cubo de pressão de poros iguais aos valores de pressão medidos e usados para a calibração do modelo. O mesmo foi realizado

para todos os poços com dados de pressão da bacia escolhida para criação do cubo e observou-se que as curvas de pressão obtidas apresentavam valores esperados de acordo com a aplicação da metodologia de Eaton e os dados de pressão dos respectivos poços.

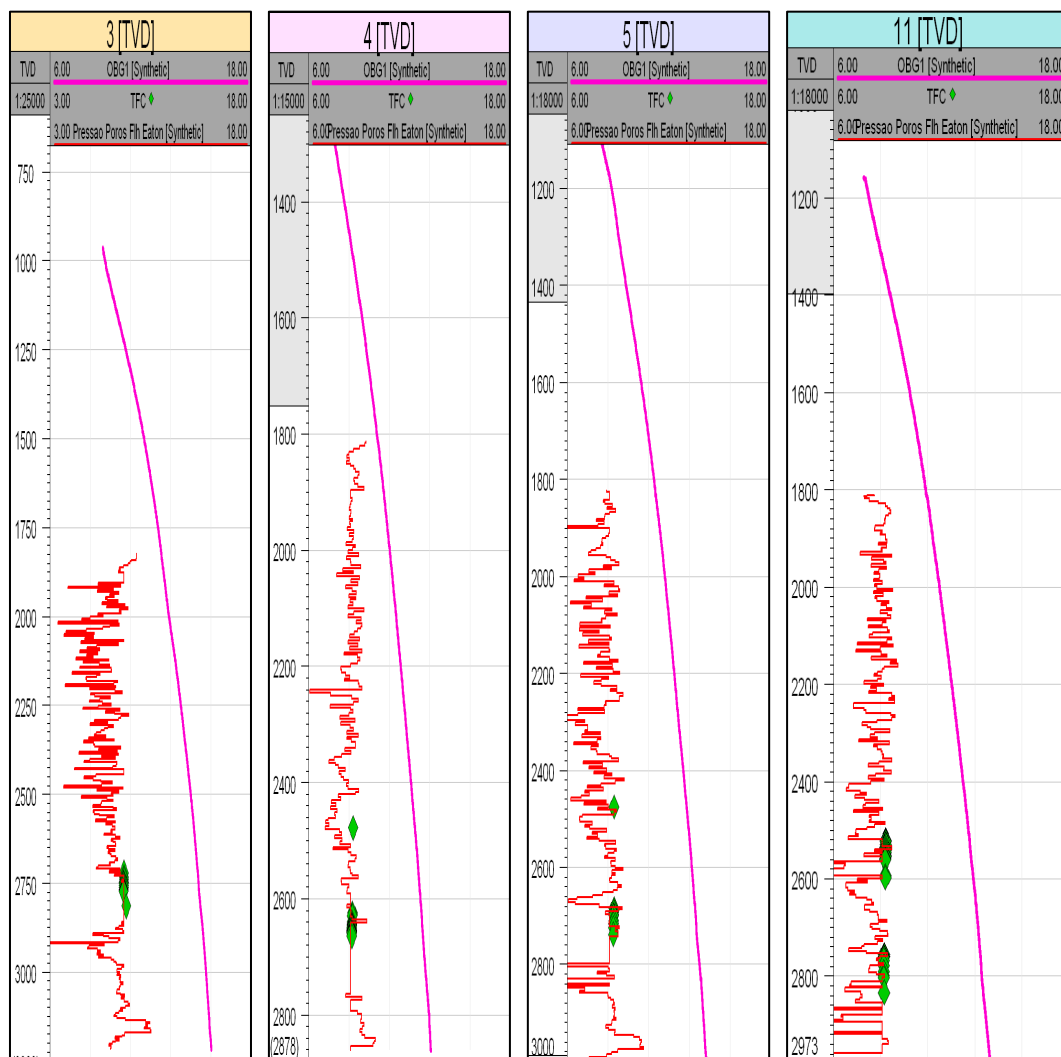


Figura 4.6 - Gradientes de pressão de poros e sobrecarga.

Na figura 4.7 é apresentado o cubo tridimensional de pressão de poros obtido através da metodologia de Eaton.

Observa-se que os gradientes variam de 8 ppg a 10 ppg. As regiões onde não há valores de pressão de poros, são as regiões de formações arenosas e permeáveis e não podem ser representadas pela metodologia de Eaton aplicada em folhelhos. Porém estes dados podem ser obtidos através de medições diretas.



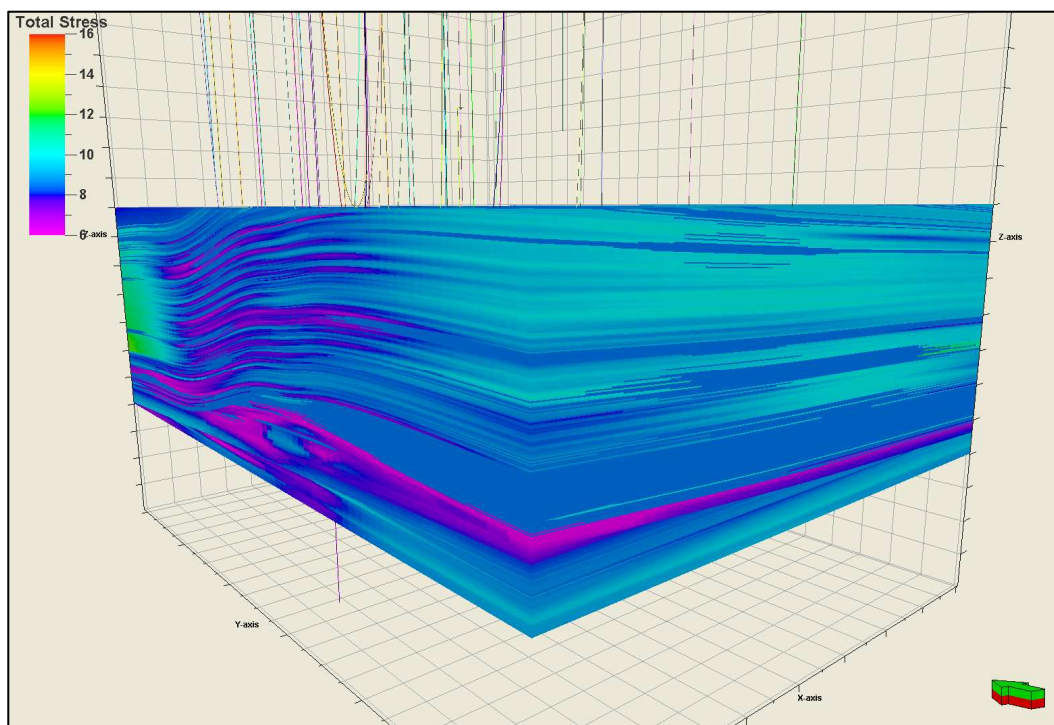


Figura 4.7 - Gradiente de pressão de poros Eaton.

### 4.3. Estimativa de pressão de poros utilizando o método de Bowers

A estimativa de pressão de poros através da metodologia de Bowers foi proposta em 1995 e ainda não é muito difundida na indústria de petróleo. Porém, esta estimativa representa muito bem o fenômeno de subcompactação e adiciona também o fenômeno de descarregamento.

Estudos de Yassir e Bell (1996) demonstram que estimativas que somente consideram o efeito de subcompactação subestimam valores de pressão de poros quando há ocorrência de fenômenos de expansão de fluidos e casos de cisalhamento tectônico, para fluidos gerados no local a partir de fase sólida esses métodos estão superestimando pressão de poros. A Figura 4.8 ilustra esta situação.

Na utilização da metodologia de Bowers também pode ser gerado uma tendência de compactação normal. A tendência é uma tendência curva representada pela equação 4.3.

$$\Delta t_{Bowers} = \frac{10^6}{\frac{10^6}{200} + 14,22 \cdot (A \cdot Z (G_{OV} - 8,7)^B)} \quad (\text{equação 4.3})$$

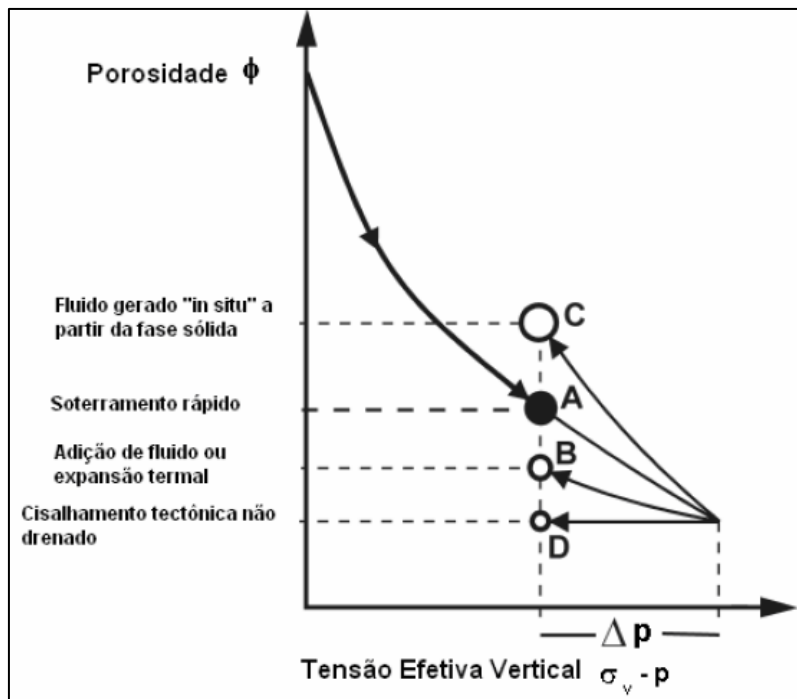


Figura 4.8 – Variação de tensão efetiva versus porosidade de acordo com o fenômeno de geração de pressão anormais (Yassir e Bell, 1996).

Onde A e B são parâmetros de calibração, Z é a profundidade vertical em metros e  $G_{ov}$  é o gradiente de sobregarça em ppg.

Esta tendência pode ser usada tanto no método de estimativas de pressão de poros de Eaton quanto no de Bowers.

No presente trabalho, a estimativa de pressão de poros de Bowers foi modelada no software Petrel® inserindo todos os parâmetros utilizados para tal estimativa. Os parâmetros foram calibrados utilizando o software da Drillworks, Predict® e os dados de pressão medidos na região. O resultado de tal modelagem para os poços utilizados na calibração são apresentados na figura 4.9, a seguinte equação 4.4:

$$\frac{P_p}{Z} = \frac{\sigma_v}{Z} - \left[ \frac{\frac{10^6}{\Delta t} - \frac{10^6}{\Delta t_o}}{A} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (\text{equação 4.4})$$

Onde  $P_p$  é o valor de pressão de poros em psi,  $Z$  profundidade em metros,  $\sigma_v$  é o valor da pressão de sobrecarga em psi,  $A$  e  $B$  parâmetros da metodologia de Bowers e  $\Delta t_0$  o valor sônico no *mudline* e  $\Delta t$  o valor sônico de perfilagem.

Na figura 4.7 estão apresentadas os resultados do modelo de Bowers para os poços utilizados na calibração do modelo. Os dados de gradientes de pressão de poros em laranja no gráfico estão calibrados com os dados de pressão medidos (MDT) apresentados em pontos verde no gráfico. A curva de sobrecarga também é apresentada em rosa na figura.

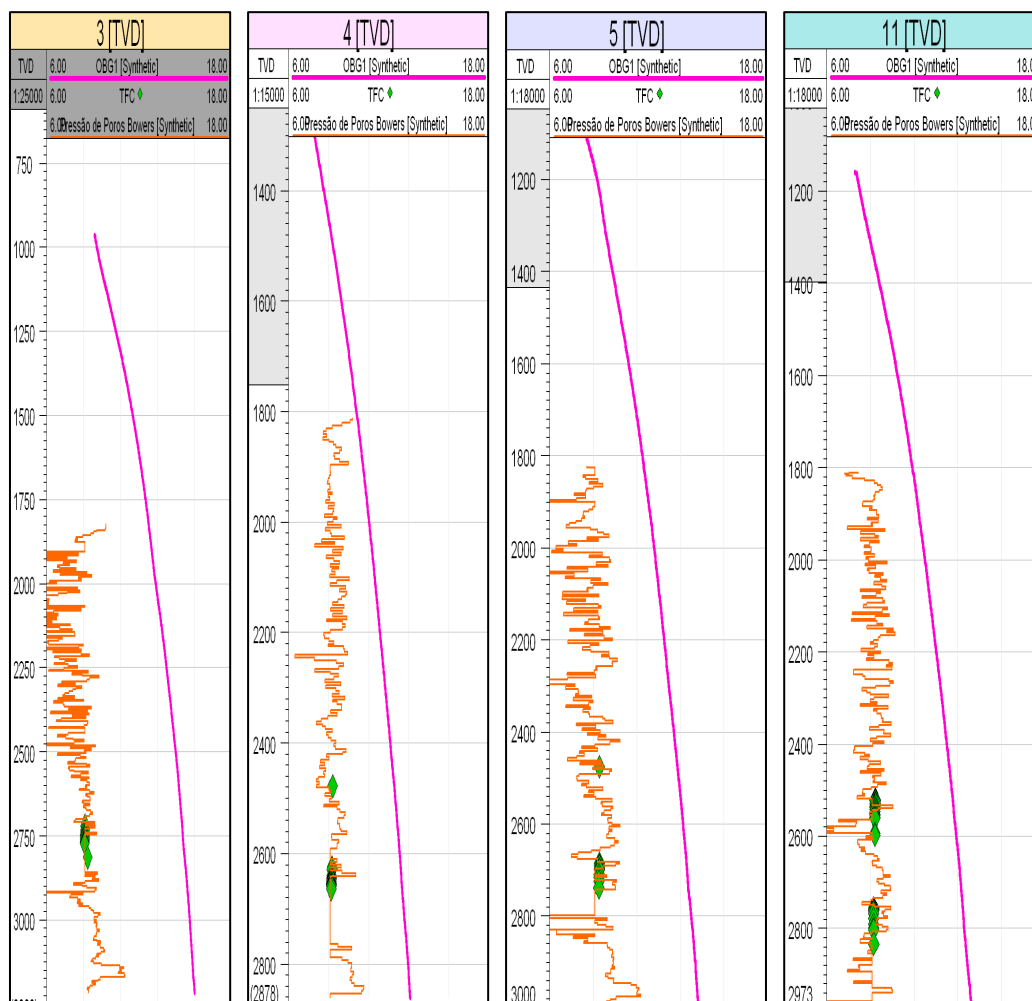


Figura 4.7- Estimativa de pressão de poros método de Bowers.

Na figura 4.8 é apresentado o cubo tridimensional de pressão de poros para a região obtido através da metodologia de Bowers. Mais uma vez o software Petrel® não possui recursos para a estimativa de pressão de poros. E o modelo de estimativa foi inserido através da ferramenta calculadora de propriedades do software.

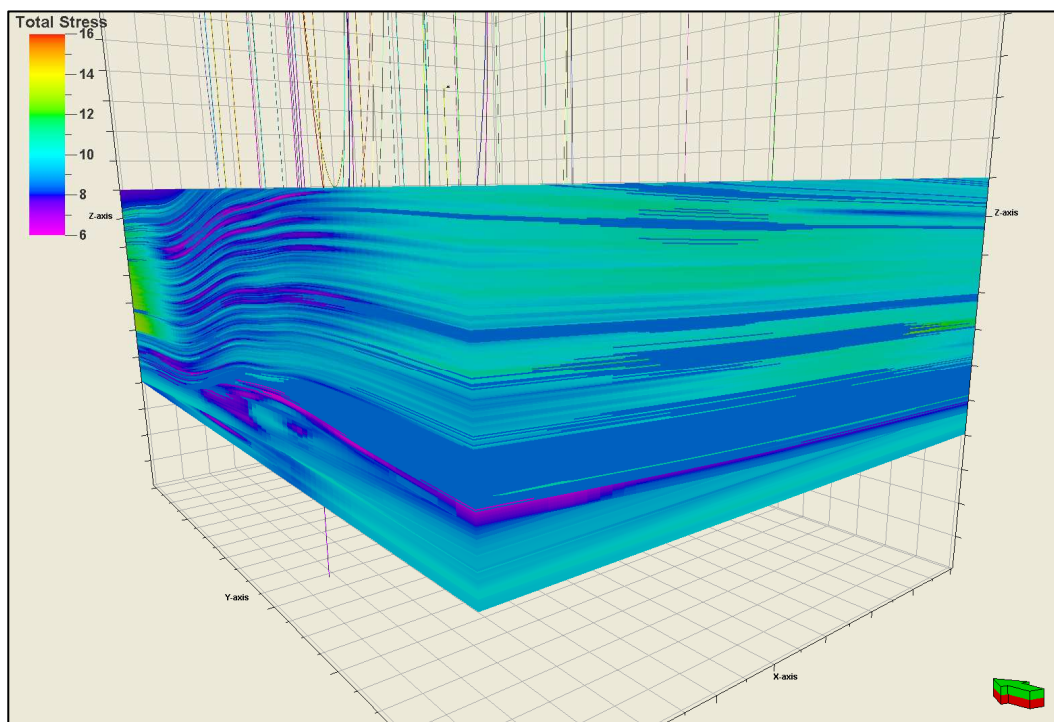


Figura 4.8 - Gradiente de pressão de poros Bowers.

Na figura 4.8 pode-se observar que este gradiente varia de 8 a 10 ppg em algumas profundidades. O resultado se comparado com os dados de pressão e com o cubo de pressão de poros através de metodologia de Eaton está de acordo com o esperado.

A região não apresenta outro mecanismo de geração de pressão anormal, como por exemplo a transferência lateral de pressão em um arenito. As formações permeáveis nessa região encontram-se acamadas. Portanto, a hipótese de que os arenitos possuem as mesmas pressões que os folhelhos e logo os dados de pressão medidos nestes arenitos são usados para calibrar as pressões nos folhelhos é válida. A região também não apresenta fluidos gasosos que poderiam alterar o gradiente de pressão de poros bruscamente através do efeito *buoyance*. Além disso a região também não apresenta altas temperaturas que poderiam estar relacionadas a pressões altas por expansão de fluidos. No comportamento dos perfis elétricos não foi observado nenhuma reversão de tendência, podendo indicar um fenômeno de descarregamento.