4 Análise de pressão de poros

O objetivo deste capítulo foi se efetuar a modelagem tridimensional do gradiente de pressão de poros (GPP) pelo método de Eaton e Bowers a partir dos 14 poços escolhidos previamente. A metodologia seguida foi baseada no programa Drillworks 3D 11.6.0, de Knowledge Systems.

Este capítulo está dividido em: Análise de gradiente de pressão de poros unidimensional; análise de gradiente de pressão de poros tridimensional e validação de resultados.

Na análise de gradiente de pressão de poros unidimensional foi feita primeiro a modelagem pelo método de Bowers, onde foram encontrados os parâmetros A e B e; a velocidade no fundo do mar da curva virgem de Bowers, calibrados com as medições de testes de formação a cabo (TFC). Logo, foi estimado o GPP pelo método de Eaton, usando a curva virgem como a curva de compactação normal ao invés do *trend* de compactação normal, depois o expoente X foi calibrado com as medições de TFC.

Após encontrar os parâmetros A e B médios de Bowers e o expoente médio X de Eaton para os 14 poços, o modelo 3D de GPP foi gerado. Previamente foram gerados os modelos 3D da densidade composta, usada para estimar o gradiente de sobrecarga tridimensional, e o modelo 3D do sônico de rochas argilosas foi usado como indicador de porosidade tridimensional. A curva virgem tridimensional foi gerada a partir dos parâmetros médios A e B e, a velocidade média no fundo do mar.

Após a geração do modelo tridimensional do gradiente de pressão de poros, a validação é apresentada para os poços SLM 4 e SLM 19D.

4.1. Análise de gradiente de pressão de poros unidimensional

Geralmente é feita uma retroanálise para determinar o comportamento do poço e realiza uma comparação entre as pressões estimadas e as obtidas em campo. Isto é feito com a finalidade de melhorar o modelo de estimativa de GPP para futuros poços de projeto, onde possam vir a ser usados como poços de correlação.

Para a análise de GPP 1D foi seguido o fluxo de trabalho da Figura 4.1, baseado no programa Drillworks Predict. A preparação de dados foi feita no capítulo anterior item 3.3.



Figura 4.1. Fluxo de trabalho usado na modelagem unidimensional (1D) do gradiente de pressão de poros (GPP).

Para se estimar a pressão de poros é necessário conhecer a sobrecarga e a tensão efetiva. A sobrecarga pode ser calculada conhecendo a densidade do meio. A tensão efetiva pode ser estimada de diferentes maneiras dependendo do método utilizado. Para o método de Eaton, a tensão efetiva dependerá do sônico de rochas argilosas, o sônico da curva virgem e, do expoente X. Para o método de Bowers, a tensão efetiva depende dos parâmetros, A, B e da velocidade ao longo da profundidade.

A calibração foi feita com o fim de encontrar os parâmetros A e B da curva virgem de Bowers e o expoente X no método de Eaton que melhor aproximem o modelo do GPP com as medições de pressão de poros ou peso de lama. O erro permitido será de 1ppg (Liaw, 2008).

4.1.1. Gradiente de Sobrecarga

O cálculo do gradiente de sobrecarga é feito a partir da densidade composta, isto é, o perfil densidade e em profundidades rasas pela correlação de Miller. Após o cálculo da densidade ao longo da profundidade do poço, a tensão de sobrecarga pode ser calculada com a equação 4.1, e o gradiente de sobrecarga pela equação 4.2.

$$\sigma = g \int_{0}^{z} \rho_b(z) dz$$
 4.1

$$GS = \frac{\sigma}{Z}$$
 4.2

Onde:

 σ : Tensão de sobrecarga (psi),

- ρ_{b} : Densidade total (g/cm³),
- g : Gravidade, (m/s^2)
- Z : Profundidade (m),
- GS : Gradiente de sobrecarga (ppg),

A densidade da formação ao longo de toda a trajetória do poço foi estimada acoplando a densidade sintética nos trechos superficiais estimada pela correlação de Miller, ao perfil densidade existente. Este perfil composto foi utilizado para o cálculo da sobrecarga.

A Figura 4.2 mostra uma linha rosa que representa o gradiente de sobrecarga ao longo da profundidade e, em azul estão marcados o início e fim da LDA. Nesta figura se vê claramente a influência da LDA sobre o GS, pois, no trecho de maior LDA a densidade é muito menor que a da formação.



Figura 4.2. Gradiente de Sobrecarga (GS) nos Poços SLM 1DA, SLM 5, SLM 41 e SLM 44 de esquerda à direita.

4.1.2. Curva Virgem de Bowers

Considera, além do fenômeno de subcompactação, o fenômeno de expansão de fluidos como gerador da pressão de poros anormalmente alta. Neste método é apresentada a curva virgem obtida a partir da equação 4.3.

$$V = V_{ml} + A \sigma'^B$$
 4.3

Onde:

V : velocidade (ft/s),

V_{ml} : velocidade no fundo do mar (ft/s),

 σ' : tensão efetiva (psi),

 A, B : parâmetros calibrados num gráfico tensão efetiva vs velocidade, num poço análogo.

A curva virgem representa ocorrências de pressões de poros normais ou sobrepressões originadas por compactação normal ou subcompactação, logo, outros mecanismos que gerem pressões anormais estariam fora da curva virgem. Bowers (1995) se baseia no fato de que na compactação normal a tensão efetiva se incrementa com a profundidade e então a tendência da velocidade *versus* tensão efetiva seguiria a curva virgem; na subcompactação a tensão efetiva se mantém constante com a profundidade, podendo ser também representada no gráfico velocidade *versus* tensão efetiva pela curva virgem.

Para o traçado da curva virgem é preciso a tensão efetiva e a velocidade ao longo da profundidade do poço, a velocidade pode ser obtida invertendo o tempo de trânsito (Dt) de rochas argilosas.

Para a estimativa da tensão efetiva é preciso medições diretas de pressão de poros. Muitas vezes é complicado obter estas medidas devido à existência de grandes pacotes de formações impermeáveis, onde as medições diretas de pressão de poros são inviáveis. Outro complicador é o gasto adicional para as empresas que normalmente fazem estas medidas apenas em reservatórios, onde outras finalidades justificam o custo. No entanto, o peso de lama pode ser usado assumindo que é um bom indicador da pressão da formação.

Nos poços onde não existem dados confiáveis para a calibração de A e B, Bowers (1995) recomenda calibrá-los a partir dos valores A e B de 14,2 e 0,724 (parâmetros do Golfo do México). A velocidade no fundo do mar foi de 5291ft/s (para água salgada com 100.000 ppm de NaCl, Tixier & Alger, 1970). Em seguida a tensão efetiva pode ser achada substituindo estes valores na equação 4.3 mostrada anteriormente.

Na Figura 4.3 observa-se os valores de tensão efetiva e velocidade para os 11 poços, a curva virgem (CV) foi traçada a partir dos parâmetros A de 14,2 e B de 0,724. Nota-se que os poços SLM 5, SLM 10, SLM 14D, SLM 40 e SLM 44 estão mais perto da curva virgem que os outros poços, logo, é esperado que os dados A e B após a calibração fiquem próximos destes valores iniciais.



Figura 4.3. Curva Virgem inicial com A e B de 14,2 e 0,724 respectivamente.

Segundo Reina (2007), a estimativa da tensão efetiva pelo método de Bowers (1995) é mais sensível ao parâmetro B que ao parâmetro A, logo, se fixou o parâmetro B em 0,724, e se efetuou a calibração do modelo de pressão de poros com o parâmetro A para os 14 poços. Estes parâmetros A e B são também usados posteriormente no método de Eaton sem modificá-los e a calibração se efetua com o expoente X.

4.1.3. Gradiente de Pressão de Poros (GPP)

O gradiente de pressão de poros foi estimado pelos métodos de Eaton (1972,1975) e Bowers (1995). Para o método de Bowers, usaram-se os mesmos parâmetros A e B que para a curva virgem e a velocidade se manteve em 5291,05ft/s para todos os poços. Para o método de Eaton a curva virgem foi usada como *trend* de compactação normal, pelas razões explicadas previamente., uma breve descrição do método será feita a seguir.

- Bowers (1995): A estimativa de pressão de poros foi feita com os parâmetros A e B usados para a curva virgem. Como se trabalhou com o sônico, a equação 4.3 da curva virgem foi modificada para estimar a pressão de poros, a equação resultante é mostrada na equação 4.4. A velocidade de 5291ft/s para o fundo do mar é equivalente a 189μs/ft em tempo sônico (Dt_m).

$$GPP = GS - \frac{\left[\left(\frac{10^{6}}{Dt} - \frac{10^{6}}{Dt_{ml}}\right)\left(\frac{1}{A}\right)\right]^{1/B}}{Z}$$
 4.4

Onde:

GPP : gradiente de pressão de poros (ppg),

- GS : gradiente de sobrecarga (ppg),
- Dt : tempo de trânsito (μ s/ft),
- Dt_{ml} : tempo de trânsito no fundo do mar (189µs/ft),
- A, B : parâmetros calibrados num gráfico tensão efetiva vs velocidade, num poço análogo,
- Z : Profundidade (ft).

Considerou-se que a sobrepressão é causada pelo fenômeno da subcompactação, logo a equação usada para a estimativa da pressão de poros foi a 4.4.

- Eaton (1972-1975): Estima a pressão de poros considerando principalmente o mecanismo da subcompactação e considera que a pressão de poros numa dada profundidade é função da tensão de sobrecarga, da pressão de poros normal e da razão do parâmetro observado, que pode ser resistividade, sônico ou velocidade. Utiliza uma linha de tendência (*trend*) de compactação normal e um expoente (X) para a estimativa da pressão de poros, como mostrado na equação 4.5.

$$GPP = GS - (GS - GPP_N) \left(\frac{Dt_N}{Dt}\right)^X$$

$$4.5$$

Onde:

GPP	: gradiente	de pressão	de poros	(ppg),
-----	-------------	------------	----------	--------

- GS : gradiente de sobrecarga (ppg),
- GPP_N : gradiente de pressão de poros normal (ppg),
- X : expoente a ser calibrado,

Dt : tempo de transito observado (μ s/ft),

 Dt_N : tempo de transito normal (µs/ft).

O *trend* de compactação normal (TCN), não foi usado na estimativa de pressão de poros devido ao fato de que o programa Drillworks 3D não reconhece o TCN como uma função. O TCN é traçado manualmente no módulo Drillworks Predict, e o programa não permite que o TCN seja representado como uma reta, ou seja, uma equação linear. Logo, optou-se por usar a cura virgem como curva de compactação normal (num gráfico de sônico de rochas argilosas vs profundidade). Alguns testes foram feitos previamente para se ter uma idéia da variação da estimativa do GPP considerando o TCN e a curva virgem.

Para usar a curva virgem como *trend* de compactação normal, é necessário calibrar os parâmetros A e B previamente. Este ponto será discutido posteriormente. Um exemplo é mostrado na Figura 4.4 em (a) usando a curva virgem com A=16,7 e B=0,724 (esquerda) e o resultado do GPP é mostrado a direita, em (b) usando o TCN (azul) traçado manualmente acima do perfil sônico de rochas argilosas (amarelo).

Após a calibração de A e B, para o poço SLM 05, observa-se que na estimativa do gradiente de pressão de poros, o expoente X foi considerado 3 (usado por Eaton em 1975 para o sônico) em ambos os casos. O resultado é apresentado na Figura 4.4. (a) usando o a curva virgem como curva de compactação normal, o resultado é mostrado na direita e, (b) usando o *trend* de compactação normal traçado manualmente, na direita se mostra o resultado do GPP pelo método de Eaton.



Figura 4.4. Estimativa de GPP pelo método de Eaton, (a) usando a curva virgem (vermelho) como curva de compactação normal e, (b) usando o TCN (azul).

A variação do GPP usando a curva virgem foi de 8,4ppg até 10,6ppg e usando o TCN foi de 8,56ppg até 10,62ppg. Isto se repetiu em outros poços. Logo, na curva virgem calibrada com o parâmetro A apresentou-se representativa, assim decidiu-se por usar a curva virgem para ambos os métodos.

Em geral, o uso da curva virgem ao invés do *trend* no método de Eaton, diminui a incerteza na estimativa do GPP. A curva virgem depende dos parâmetros A, B Dt_{ml}, Dt e medições diretas enquanto que o TCN ao ser traçado manualmente, depende do critério de cada analista; além disso, precisa de uma zona normalmente compactada para seu tracejado.

4.1.4. Calibração

No método de Bowers (1995), buscou-se calibrar apenas o parâmetro A da curva virgem, até aproximar o gradiente de pressão de poros com as medições de testes de formação a cabo (TFC) ou peso de lama. Na Figura 4.5 é apresentado o GPP estimado por Bowers, antes da calibração considerando A=14,2 (a) e após a calibração considerando A=16,8 (b). O parâmetro B se manteve constante e igual a 0,724, sendo o tempo de trânsito no fundo do mar (Dt_m) igual a 189µs/ft.



Figura 4.5. Calibração do poço SLM 27D (a) antes da calibração (A=14,2) e (b) após a calibração (A=16,8).

Posteriormente, foi calibrado o expoente X de Eaton, mantendo fixo os parâmetros A e B da curva virgem de Bowers. Os resultados obtidos da calibração dos parâmetros de todos os poços pelos métodos de Eaton e Bowers

podem ser vistos na Tabela 3. Da esquerda à direita da LDA, Profundidade medida (MD), Profundidade vertical (TVD), o expoente X de Eaton, os parâmetros A, B e Dt_{ml} de Bowers, assim como os valores máximos e mínimos para cada método.

Nome do	LDA		D(m) = T / D(m)		(m) Eaton Bowers		rs	Eaton		Bowers	
Poço	(m)	MD (M)	1 VD (m)	Х	Α	В	Dt _{ml} (us/ft)	Min	Máx	Min	Máx
SLM 01DA	1231	3450	3270,28	2	18,5	0,724	189,00	8,1	9,6	8,0	10,1
SLM 02DP	1231	3198	3005,54	2	16,8	0,724	189,00	8,2	9,1	8,1	9,5
SLM 05	1100	3017,5	3017,34	3,2	16,7	0,724	189,00	8,4	10,7	8,4	10,5
SLM 08DA	1134	2955	2805,09	2,5	13,7	0,724	189,00	8,2	9,2	8,0	9,5
SLM 10	1159	2974	2973,88	1,5	17,3	0,724	189,00	8,4	9,2	8,2	9,8
SLM 14D	1037	3096	2921,94	1,5	12,9	0,724	189,00	8,2	8,6	7,8	8,8
SLM 16D	1044	3265	3008,3	1,5	15,2	0,724	189,00	8,2	9,0	8,0	9,7
SLM 18D	1135	3448	3118,5	1,2	16,3	0,724	189,00	8,2	8,9	7,7	9,5
SLM 20D	1127	2997	2846,65	2,2	15	0,724	189,00	7,8	9,4	7,4	9,7
SLM 23	1188	2818	2812,26	1,2	16,2	0,724	189,00	8,5	9,1	7,8	9,6
SLM 27D	1320	2967	2841,82	3	16,8	0,724	189,00	8,1	9,0	8,1	9,0
SLM 40D	1251	3828	3825,9	1,5	17,5	0,724	189,00	8,2	9,5	7,9	10,1
SLM 41	1165	3250	3250	2	18,5	0,724	189,00	7,6	9,8	7,4	10,3
SLM 44	1061	3370	3369,28	2	17,5	0,724	189,00	8,5	9,5	8,5	9,9

Tabela 3. Lista do Expoente X (Eaton) e parâmetros A, B e Dt_{ml} (Bowers) dos 14 poços.

Desta forma a média do expoente X para os 14 poços analisados é 1,95 e, a média do parâmetro A é de 16,35. B e Dt_{ml} se mantiveram constantes em 0,724 e 189µs/ft respectivamente. Estes valores de A e B serão validados com os poços SLM 4 e SLM 19D para saber o grau de confiança na estimativa de pressão de poros. O resultado do GPP para os poços SLM 4 e SLM 19D para os métodos Eaton e Bowers, pode ser visto a Figura 4.6.



Figura 4.6. Gradiente de pressão de poros pelos métodos de Eaton e Bowers para os poços (a) SLM 4 e (b) SLM 19D.

Logo, determinou-se o erro do modelo de GPP em relação às medidas diretas. Os resultados são mostrados na Tabela 4, onde para o poço SLM 4 o erro absoluto é a diferença do Teste de Formação a Cabo (TFC) e o modelo de GPP (Bowers ou Eaton), enquanto que para o poço SLM 19D, o erro absoluto é a diferença do valor de Peso de Lama (PL) subtraído de 0,5ppg e o modelo de GPP. Tal redução foi adotada para melhor aproximar o dado de peso de lama da pressão de poros da formação, uma vez que o fluido de perfuração é calculado com uma margem de segurança de 0,5 a 1ppg em relação ao GPP.

SLM 4					
TFC-Bowers	TFC-Eaton				
(ppg)	(ppg)				
0,02	0,02				
0,44	0,05				
0,42	0,04				
0,45	0,05				
0,50	0,05				
0,51	0,05				
0,51	0,05				
0,52	0,05				
0,53	0,05				
0,53	0,05				
0,54	0,05				
0,55	0,05				
0,56	0,06				
0,59	0,06				
	SLM 4 TFC-Bowers (ppg) 0,02 0,44 0,42 0,45 0,50 0,51 0,51 0,51 0,52 0,53 0,53 0,53 0,54 0,55 0,56 0,59				

Tabela 4. Erros pelos métodos de Eaton e Bowers para os poços SLM 4 e SLM 19D.

SLM 19D						
Profundidade	PL-0,5-Bowers	PL-0,5-Eaton				
(m)	(ppg)	(ppg)				
1926	0,16	0,05				
2099	0,09	0,03				
2217	0,24	0,05				
2300	0,38	0,05				
2450	0,37	0,01				
2502	0,44	0,01				
2588	0,91	0,02				
2690	0,52	0,00				
2728	0,67	0,01				
2771	0,83	0,02				
2804	0,95	0,02				
2840	1,09	0,03				

O erro médio para o poço SLM 4 pelo método de Bowers é de 0,48ppg e pelo método de Eaton é de 0,05ppg. Para o poço SLM 19D o erro médio pelo método de Bowers é de 0,55ppg e pelo método de Eaton de 0,03ppg. Pode-se observar que os erros médios pelo método de Eaton são inferiores aos erros de Bowers, logo pode-se dizer que o método de Eaton é mais representativo que o método de Bowers para os poços analisados.

Como o erro aceitável é de 1ppg no trecho analisado (de 1850m até 2850m), conclui-se que os modelos de GPP gerados com os parâmetros médios A e B da curva virgem de Bowers e o expoente médio X de Eaton, são confiáveis para a estimativa de pressão de poros.

Na Figura 4.7 observa-se a curva virgem com os parâmetros médios após a calibração (linha contínua rosa) que é mais representativa da população amostrada em relação à curva virgem com os parâmetros iniciais (linha tracejada azul).



Figura 4.7. Curva Virgem após a calibração para o campo SLM (A=16,35; B=0,724 e Dt_{ml} =189µs/ft).

A Figura 4.8 apresenta uma análise de dispersão da velocidade e tensão efetiva dos 14 poços analisados em relação à curva virgem. A linha contínua representa a curva virgem, enquanto a linha tracejada representa o ajuste da curva virgem para a análise de dispersão. A Figura 4.8 (a) destaca a baixa correlação entre os pontos analisados, logo, decidiu-se retirar os poços mais afastados (SLM 8DA e SLM 18) da curva virgem e estimar novamente o coeficiente de correlação apresentada na Figura 4.8 (b).





Figura 4.8. Curva virgem: análise de dispersão de dados da curva virgem (a) considerando todos os poços, coeficiente de correlação de 0,15 e, (b) coeficiente de correlação 0,65 sem os poços SLM 8DA e SLM 18.

Conclui-se que os poços retirados influenciam significativamente na dispersão da população e apresentaram um erro maior na estimativa de pressão de poros.

4.2. Análise de gradiente de pressão de poros 3D

A modelagem tridimensional de GPP, como definido anteriormente, será feita considerando somente 14 poços, pois dois deles foram retirados da análise para fins de validação do modelo 3D.

Esta modelagem foi feita apenas com dados de poços, que são os dados recebidos. Deria interessante realizar uma análise com os dados sísmicos do Campo *Señor de los Milagros* (SLM), de forma a abranger um maior volume que os dados de poços. Com os dados sísmicos seria possível fazer uma melhor caracterização geológica do campo, considerando falhas existentes, localização do reservatório em 3D, análise de migração de fluidos entre outros.

Para o desenvolvimento da modelagem 3D foi seguido o fluxo de trabalho da Figura 4.9. A análise se inicia com a entrada dos dados de localização em coordenadas UTM de todos os poços. Em seguida são gerados os cubos de dados de densidade composta e sônico de rochas argilosas. A partir do cubo de densidade composta calcula-se o gradiente de sobrecarga 3D.

Posteriormente é gerada a curva virgem 3D com os parâmetros médios A e B iguais a 16,35 e 0,724 respectivamente, a velocidade no fundo do mar se manteve constante em 5291,005ft/s (ou 189µs/ft em tempo de trânsito). Finalmente o gradiente de pressão de poros é estimado: para Bowers com os mesmos parâmetros médios A e B usados na curva virgem e para Eaton com o expoente médio X igual a 1,95.



Figura 4.9. Fluxo de trabalho para a modelagem 3D de GPP para os métodos Eaton e Bowers.

A planta de localização dos poços foi mostrada na Figura 3.12 do Capítulo 3, apresentando os 14 poços analisados e incluindo os poços SLM 19D e SLM 4 escolhidos para validação.

4.2.1. Geração do Cubo de Dados

Todos os modelos tridimensionais foram gerados no Drillowrks 3D, com o método do inverso das distâncias. Foram considerados para a interpolação os três dados mais próximos ao ponto analisado; peso dois para a distância entre o dado e o ponto analisado e densidade da malha de 100 células nas três direções (x,y,z). Estes valores foram usados para todos os modelos tridimensionais nas profundidades de 1850m a 2850m pelas razões descritas no Capítulo 3.

O cubo de densidade foi gerado a partir dos perfis densidade suavizados e acoplados com a densidade sintética (correlação de Miller) para trechos superficiais. Para o cubo de sônico de rochas argilosas foram usados os perfis suavizados após a discriminação da litologia. Desta forma, foram utilizados somente os pontos de sônico em que se teve litologia de rochas argilosas (marga, folhelho e argilito).

Os cubos de densidade e sônico de rochas argilosas são mostrados na Figura 4.10: (a) cubo de densidade variando de 1,98 g/cc a 2,55g/cc na escala de cores; (b) cubo de sônico de rochas argilosas variando de $88,7\mu$ s/ft a 137μ s/ft na escala de cores.



Figura 4.10. Cubos de dados gerados a partir de 14 poços (a) Densidade e, (b) Sônico de rochas argilosas.

4.2.2. Cálculo do Gradiente de Sobrecarga 3D

O cálculo do cubo de gradiente de sobrecarga (GS) foi realizado por meior da equação 4.2 vista anteriormente aplicada ao cubo de densidade gerado previamente, considerando a densidade da água 1,03 g/cc e a densidade no fundo do mar 1,95 g/cc.

O resultado do GS pode ser visto na Figura 4.11 que varia de 10,5ppg a 14,3ppg na escala de cores.



Figura 4.11. Cubo de Gradiente de Sobrecarga 3D.

4.2.3. Geração da Curva Virgem 3D

A curva virgem foi gerada a partir dos parâmetros médios A e B calibrados na modelagem 1D, com valores A, B e Dt_{ml} de 16,35, 0,724 e 189µs/ft respectivamente.

Como dito anteriormente, a curva virgem foi usada na estimativa do GPP pelo método de Bowers e, também para o método de Eaton, representando a curva de compactação normal. Tal procedimento foi adotado porque o programa Drillworks 3D não reconhece o *trend* de compactação normal de Eaton, que é traçado manualmente no módulo Drillworks Predict unidimensional. Todavia, comprovou-se, que após a calibração dos parâmetros A e B com as medições de TFC e peso de lama, o uso da curva virgem na estimativa do GPP pelo método de Eaton se aproxima bastante do obtido com o *trend* traçado manualmente.



Figura 4.12. Curva virgem 3D usando A=16,35, B=0,724 e Dt_{ml} =189 μ s/ft.

4.2.4. Gradiente de Pressão de Poros 3D

Para a geração do cubo de gradiente de pressão de poros (GPP), precisase do cubo de gradiente de sobrecarga (GS), do cubo indicador de porosidade (sônico de rochas argilosas) e do cubo da curva virgem. Com estes dados, o GPP pode ser estimado pelos métodos de Eaton (1972-1975) e Bowers (1995). Cabe ressaltar que foram consideradas pressões anormalmente altas as pressões maiores que 9ppg e pressões baixas as inferiores a 8,5ppg range definido em Rocha e Azevedo (2007).

A seguir serão mostrados os resultados da estimativa do GPP pelos métodos de Eaton e Bowers. Uma análise da existência de pressões anormais será realizada a partir dos resultados obtidos pelos métodos mencionados.

- **Eaton (1972-1975):** Como dito anteriormente, o GPP pelo método de Eaton foi estimado usando o GS, o indicador de porosidade (sônico de rochas argilosas) e a curva virgem (indicador da compactação normal). Desta forma o GPP foi estimado usando a 4.5 apresentada anteriormente com expoente X equivalente a 1,95.

O cubo de GPP pelo método de Eaton apresentou predominantemente pressões no range de 8,5ppg a 9ppg, consideradas pressões normais (Figura 4.13), pressões anormais ocorreram localmente em algumas zonas.



Figura 4.13. Cubo de GPP pelo método de Eaton

Para melhor visualizar a ocorrência de pressões anormais foram feitos cortes no cubo de GPP em os poços onde foram encontradas estas pressões anormais. Na Figura 4.14, (a) observam-se pressões baixas (subpressões), consideradas inferiores á 8,5ppg, encontradas predominantemente ao redor dos poços SLM 2DP, SLM 10, SLM 40 e SLM 41; em (b) pressões altas (sobrepressões), maiores a 9ppg predominantemente ao redor dos poços SLM 14D e SLM 16D.



Figura 4.14. Cubo de GPP pelo método de Eaton. (a) subpressões e (b) sobrepressões.

Sobrepressões ocorreram nas profundidades onde o registro sônico de rochas argilosas foi maior ao registro sônico normal, da mesma forma, as subpressões ocorreram onde o registro sônico foi inferior ao sônico normal. Uma análise mais profunda da existência destas pressões será feita mais adiante.

Como visto anteriormente, pressões anormais ocorreram em zonas pontuais. As sobrepressões maiores que 9,5ppg foram encontradas em profundidades maiores de 2800m e concentradas ao redor dos poços SLM 14D e SLM 16D. As subpressões mais distintas foram encontradas nas profundidades de 2720m a 2800m, onde o caso de pressão de 6,9ppg foi encontrado no poço SLM 41 em litologias de arenito da profundidade de 2720m até 2740m e intercalações de marga e folhelho nas profundidades de 2740m até 2800m.

Em geral os resultados do GPP pelo método de Eaton, mostrou pressões normais, logo, pode-se dizer que o campo SLM apresenta predominantemente pressões normais.

- Bowers (1995): A estimativa do GPP pelo método de Bowers foi feita usando o GS, indicador de porosidade (sônico de rochas argilosas) e a curva virgem como indicador de compactação normal e/ou subcompactação, para estimar o GPP estes dados foram substituídos na equação 4.4, vista anteriormente. O resultado do GPP pelo método de Bowers apresentou predominância de pressões normais (8,5ppg a 9ppg) como pode ser visto na Figura 4.15.



Figura 4.15. GPP pelo método de Bowers

Para melhor visualizar as pressões anormais o cubo de GPP foi filtrado obtendo-se a Figura 4.16 (a) apresenta as subpressões, de até 6ppg ao redor do poço SLM 41, logo ao redor dos poços SLM 2DP, SLM 8DA, SLM 10, SLM 18D e SLM 40 com picos de GPP mínimos de 7ppg. Em (b) são destacadas as sobrepressões com GPP máximo de 10,4ppg que se concentraram ao redor do poço SLM 08DA. Pressões maiores que 9,2ppg foram encontradas ao redor dos poços SLM 14D, SLM 16D, SLM 23 e SLM 44.



Figura 4.16. Cubo de GPP pelo método de Bowers. (a) subpressões e, (b) sobrepressões.

Como visto nos resultados, a estimativa do GPP pelo método de Eaton e Bowers apresentou diferenças de grandeza. Os métodos usaram o sônico lido (sônico de rochas argilosas) e o sônico da curva virgem para estimar o GPP, além do gradiente de sobrecarga.

A diferença básica entre as metodologias se encontra na estimativa da tensão efetiva. No método de Bowers, a tensão efetiva depende da diferença entre o sônico rochas argilosas, sônico do fundo do mar e os parâmetros A e B. No método de Eaton, a grandeza da tensão efetiva depende do expoente X, do sônico normal e do sônico de rochas argilosas. Apesar disto, neste trabalho usou-se a curva virgem em ambos os métodos. Pode-se assim dizer que o método de Bowers é mais sensível à curva virgem que o método de Eaton.

Na Figura 4.17 podem ser vistas estas diferenças. Na profundidade de 2740m o poço SLM 41 apresentou um GPP pelo método de Bowers de 6,29ppg enquanto que pelo método de Eaton foi 7,09ppg. No poço SLM 16D o GPP pelo método de Eaton foi de 9,39ppg e pelo método de Bowers foi de 9,85ppg.



Figura 4.17. GPP na profundidade de 2740m (a) Eaton e, (b) Bowers.

Tanto o método de Eaton quanto o de Bowers, apresentaram pressões anormais baixas (menores que 8,5ppg) e altas (maiores que 9ppg), no modelo de GPP. Estas pressões ocorreram em diferentes profundidades, embora em regiões pontuais.

Normalmente, subpressões acontecem em campos depletados, em reservatórios, onde a litologia é permeável e, quando se tem poços produtores próximos aos poços perfurados, isto é, subpressões acontecem quando não é feita a compensação de perda de pressão da formação durante a produção de hidrocarbonetos. O campo SLM não registrou leituras TFC inferiores á 8,5ppg, logo, a possibilidade da existência de subpressões no campo SLM por ser um campo depletado foi descartada.

As subpressões encontradas em litologia impermeável (marga, folhelho) ocorreram em zonas onde, numa mesma profundidade, o sônico rochas argilosas é inferior ao sônico normal (curva virgem). Logo, na estimativa do GPP pelos métodos de Eaton e Bowers se observa que a tensão efetiva aumentará, fazendo com que o GPP diminua. Ou seja, o registro sônico de rochas argilosas, ao ficar menor que o registro sônico da curva virgem, fará com que em ambos os métodos o GPP diminua. O contrario ocorrerá se o sônico de rochas argilosas fosse maior ao sônico normal, o que proporcionará GPP mais elevados.

A Figura 4.18 mostra os resultados de registros sônicos de rochas argilosas (esquerda) e da curva virgem (direita). Nota-se que no poço SLM 41 o registro sônico de rochas argilosas chega a 90,6µs/ft enquanto o sônico normal no mesmo local é 102,97µs/ft. Logo o GPP mais baixo foi encontrado nesta profundidade, como apresentado na Figura 4.17.



Figura 4.18. Corte na profundidade de 2740m dos modelos de sônico de rochas argilosas (esquerda) e do registro sônico normal (curva vigem, direita).

Fisicamente é difícil encontrar pressões baixas em litologias impermeáveis, devido ao processo de soterramento. Quando este processo é normal, mantémse o equilíbrio entre o escape de fluidos e a redução do volume poroso, esperase que ocorram desta forma, pressões normais.

Em litologias com baixa permeabilidade, quando não há equilibro entre o escape de fluidos e a redução do volume poroso, o fluido seria aprisionado. Neste caso, a pressão deste estaria sujeita à pressão exercida pelas camadas sobrepostas, logo se esperaria pressões maiores que a pressão normal.

Contudo, a ocorrência de pressões anormais foi descartada no campo SLM, devido a não se conhecer a existência de depleção no mesmo e em campos por perto. Além disto, estas pressões ocorreram em camadas impermeáveis e as leituras de TFC não indicaram pressões baixas.

A ocorrência de sobrepressões em litologias impermeáveis é conhecida, comumente em seqüências de arenito e folhelho (Fertl e Chilingarian, 1977). No campo SLM as sobrepressões encontradas nos modelos de GPP variaram para o método de Eaton e Bowers.

A Figura 4.19 mostra os resultados das sobrepressões para ambos os métodos, variando de 9ppg a 10,4ppg na escala de cores. Nota-se que, pelo método de Eaton, pressões maiores que 9ppg ocorreram entre as profundidades de 2530m a 2850m. Pelo método de Bowers, as sobrepressões ocorreram em todo o trecho analisado (1850m até 2850m), porém pressões superiores a 9,5ppg só ocorreram abaixo de 2500m de profundidade.



Figura 4.19. Sobrepressões no campo SLM pelos métodos de Eaton (esquerda) e Bowers (direita).

Como dito anteriormente o método de Bowers apresentou as pressões máximas e mínimas no campo SLM, no entanto o método de Eaton foi o mais representativo do gradiente de pressão de poros para o campo SLM, isto será conferido com a validação dos resultados.

A modelagem de GPP 3D foi utilizada para analisar a área de influência das pressões altas ou baixas ao longo da profundidade. Pode-se observar a variação do GPP ao longo do campo SLM, facilitando o trabalho da análise de pressão de poros em outras áreas onde ainda não se tem poços.

Nota-se que, ao gerar um cubo de gradiente de pressão de poros, os resultados obtidos são bem mais abrangentes que análises de poços de correlação. Os poços de correlação são feitos localmente em 1D, portanto a

modelagem 3D permite reconhecer as zonas de maiores riscos de pressões anormais e não só uma locação. A visualização da variação espacial do GPP é um fator de grande vantagem para futuros projetos de poços, tornando mais abrangente o conhecimento do campo e facilitando o estudo de novas locações de poços.

Para validar os resultados encontrados e confirmar o potencial da modelagem 3D são apresentadas algumas análises.

4.3. Validação dos resultados

A validação dos resultados é um passo muito importante na modelagem, já que a confiabilidade do modelo está diretamente vinculada à aproximação ou não dos resultados aos valores reais. Embora existam incertezas associadas na metodologia do programa usado para a modelagem de GPP (Reina, 2007) e nos próprios métodos de estimativa, estas incertezas podem ser diminuídas com uma análise mais aprofundada dos dados, o que se pretendeu fazer neste trabalho com o Capítulo 3.

Para a validação dos resultados, foram escolhidos os poços SLM 4 e SLM 19D. Foram comparados os resultados de GPP modelados com as leituras de testes de formação a cabo e/ou peso de lama. O peso de lama foi diminuído em 0,5ppg para fins de calibração, em seguida os erros foram estimados como a diferença entre o GPP modelado e as medidas diretas. O resultado é mostrado na Tabela 5.

SLM4				
Profundidade	TFC-Bowers	TFC-Eaton		
(m)	(ppg)	(ppg)		
2478	0,01	0,09		
2624	0,19	0,10		
2627	0,22	0,11		
2630	0,30	0,17		
2640	0,44	0,26		
2643	0,46	0,28		
2645	0,49	0,30		
2647	0,51	0,31		
2650	0,53	0,33		
2653	0,56	0,34		
2655	0,57	0,35		
2657	0,59	0,37		
2659	0,60	0,38		
2665	0,64	0,40		

SLM 19D					
Profundidade	PL-0,5-Bowers	PL-0,5-Eaton			
(m)	(ppg)	(ppg)			
1926	0,35	0,43			
2099	0,36	0,43			
2217	0,23	0,36			
2300	0,35	0,42			
2450	0,32	0,4			
2502	0,23	0,38			
2588	0,23	0,09			
2690	0,24	0,38			
2728	0,54	0,55			
2771	0,7	0,66			
2804	0,47	0,52			
2840	0,07	0,14			

Tabela 5. Erros pelos métodos de Eaton e Bowers 3D para os poços SLM 4 e SLM 19D

Os erros médios para o poços SLM 4 foram: pelo método de Bowers 0,44ppg e pelo método de Eaton 0,27ppg. Para o poço SLM 19D foram: pelo método de Bowers 0,34ppg e pelo método de Eaton 0,4ppg. Estes erros mostram que para o poço SLM 4 o modelo estimado pelo método de Eaton é mais representativo que o modelo estimado pelo método de Bowers, enquanto para o poço SLM 19D os métodos de Bowers e Eaton apresentam erros muito próximos.

Uma análise dos modelos de GPP dos poços SLM 4 e SLM 19D (Figura 4.20), permitiu reconhecer que pressões anormais menores a 8,5ppg ocorreram no poço SLM 19D nas profundidades de 2740 até 2790m. Entretanto, sobrepressões maiores de 9ppg ocorreram no poços SLM 19D nas profundidades de 2570m até 2600m e em ambos os poços a partir de 2680m até 2850m. Em geral, ambos os poços analisados apresentaram pressões normais.



Figura 4.20. GPP dos poços de validação SLM 4 e SLM 19D pelo método de: (a) Eaton e, (b) Bowers.

O modelo tridimensional de GPP estimados pelos métodos de Eaton e Bowers, com o programa Drillworks 3D cumpriram com o erro aceitável, assim, o modelo 3D de GPP pode ser dito confiável para futuros projetos de poços com um erro de até 1ppg.

Em geral para o estudo de caso pode-se dizer que o método de Eaton é mais representativo que o método de Bowers na estimativa do GPP devido a que o campo não apresentou pressões significativamente altas nem significativamente baixas, como mostrou o método de Bowers. Em geral o campo SLM apresentou pressões normais.