

4

Análise Probabilística na Previsão da Pressão de Poros Através do Modelo de Eaton

No capítulo anterior foram observadas incertezas tanto nos parâmetros do modelo utilizado quanto nas medições in situ. Termos utilizados, como: “aproximadamente”, “talvez”, “mais ou menos”, “provavelmente”, entre outros; podem ser quantificados através de uma análise probabilística; a qual permite uma descrição quantitativa de variáveis naturais distribuídas no espaço. Neste capítulo se aplica uma análise probabilística de pressão de poros através do método de Eaton (1975) e usando a técnica de Monte Carlo para gerar resultados em forma aleatória. A base de dados empregada corresponde aos registros obtidos em 5 poços localizados na bacia sedimentar internacional X¹², infelizmente por falta de dados este estudo não pode ser aplicado numa bacia sedimentar brasileira. Para realizar os cálculos probabilísticos se utilizou o módulo de incertezas do Predict v. 11.5.0, o qual esta baseada na técnica de Monte Carlo.

4.1. Generalidades

A adoção de uma abordagem probabilística é para ver o quanto se confia nos resultados, e isso nos ajuda a tomar decisões. Incertezas existem e devem ser consideradas numa análise tipo probabilística, a qual permite apresentar os resultados dentro de faixas de segurança e atingir planos de contingência durante o processo construtivo do poço.

Falcão (2002) foi um dos primeiros pesquisadores no Brasil a utilizar uma análise estatística para estimar as incertezas na previsão da pressão de poros; mas seu trabalho só se concentrou nas aleatoriedades das medições RFT, embora sua pesquisa conseguiu uma redução do fator de segurança aplicado sobre os gradientes de pressão de poros em poços profundos.

Liang (2002) apresenta um panorama mais amplo das aleatoriedades dos parâmetros que participam no gradiente de pressão de poros, no gradiente de

¹² Nome não autorizado.

fratura (GF), e no peso de lama equivalente (EMW). Seu objetivo foi estimar ou quantificar os riscos existentes de que aconteça um *kick* ou uma perda de lama. Liang ressalta que a análise determinística não tem como quantificar estes riscos, e apresenta como solução sua metodologia QRA (*quantitative risk analysis*); o qual considera as incertezas de cada variável de entrada e utiliza propriedades estatísticas como a média, o desvio padrão e a probabilidade de ocorrência tanto do PP, do GF e do EMW. Pode-se observar que o trabalho de Liang não menciona as incertezas vinculadas aos parâmetros utilizados nos modelos de previsão tanto do PP como do GF, Liang só considera as incertezas dos registros de medição (RHOB, RES, DT, etc.). Finalmente Liang afirma que as distribuições de probabilidades do PP, do GF e do EMW podem ser representadas através de uma distribuição Gaussiana; diz ainda que é seguro assumir que a densidade, módulo de Poisson, tempo intervalar e a resistividade apresentam o mesmo tipo de distribuição Gaussiana. Numa distribuição Gaussiana, os valores de uma variável em questão vai desde $-\infty$ até $+\infty$, e na realidade isto não se cumpre. Em todo caso, poderia falar-se de uma distribuição gaussiana truncada em ambos os limites para cada parâmetro; embora o autor não fala disto, e tampouco porque usar uma distribuição gaussiana.

Depois de revisar os parâmetros dos modelos de Eaton e Bowers no capítulo 3 do presente trabalho, resulta difícil deixar de falar de uma análise probabilística do gradiente de pressão de poros. Mais à frente são revisadas as incertezas presentes nos registros de medição de RHOB, DT, RES e sua influência nos resultados da previsão da pressão de poros; com o objetivo de complementar as incertezas já revisadas e decidir quais de todos os parâmetros de um modelo, participam ou não na simulação de Monte Carlo, dependendo do grau de incerteza presente nos mesmos. Também é descrito como é que a identificação de camadas de folhelhos a partir dos registros GR pode influenciar na previsão de pressão de poros. Finalmente é descrita a bacia sedimentar X (onde serão feitas as aplicações), assim como as hipóteses assumidas e um relatório dos cálculos obtidos nos poços de correlação.

4.2. Incertezas dos Registros de Medição GR, RHOB, RES, DT e seu Impacto na Previsão da Pressão de Poros.

Os requerimentos para uma análise probabilística de pressão de poros no *software* Predict foram feitos por Martin Matthews¹³. Matthews (2004) descreve as incertezas presentes em diversas medições de campo (in situ), assim como as incertezas presentes no traço do *Trend* correto, na discriminação de camadas de folhelhos através do registro de raios gama, e as incertezas nos processos de complementação dos registros de perfilagem através de modelos de correlação. A seguir se descreve pontos de interesse relacionados ao tema:

1. Existem medições de profundidade com erro, as quais ignoram intervalos de até 50 ft a mais em poços profundos (Matthews, 2004).
2. O gradiente de sobrecarga é calculado através do registro de densidades embora, este registro nem sempre esteja completo em toda a profundidade do poço dificultando a estimativa do S. Segundo Matthews (2004), as medições de densidade nas primeiras camadas do subsolo são muito variáveis, não havendo uma tendência visível com a profundidade, embora Matthews afirma que estas variações afetam pouco o resultado do gradiente de sobrecarga devido ao processo de integração das densidades sobre os intervalos respectivos. Informa-se que podem gerar-se registros sintéticos de densidade através de modelos de correlação, como por exemplo, o modelo sônico de Gardner e o método de Miller. Segundo Knowledge Systems (2006), o método de Miller é recomendável para as primeiras camadas do subsolo, aliás, recomendam fazer uma interpolação linear, para a região intermediária, entre o registro sintético já gerado e o registro obtido pelo perfilagem. O êxito de obter um gradiente de sobrecarga confiável está condicionado ao uso (abaixo do *mudline*) de um modelo confiável de densidade.
3. Os modelos de previsão da pressão de poros são construídos com base nos folhelhos, por motivos descritos no capítulo 2. O Predict permite selecionar manualmente os intervalos de folhelhos sobre registros GR para depois capturar as leituras relacionadas à porosidade (p.e. RES ou DT) só sobre folhelhos. O Predict utiliza uma segunda função complementar sobre o registro RES ou DT com os pontos de folhelhos já

¹³ Segundo Steve Hobart da Knowledge Systems (informação enviada por e-mail, 2006).

reconhecidos. Trata-se de uma operação de filtragem de dados, a qual permite suavizar o registro RES ou DT para evitar resultados de pressão de poros espalhados. Nesse assunto se fazem as seguintes críticas: (a) definição não apropriada do termo “filtragem” no Predict, a filtragem já se fez no processo de seleção de camadas só de folhelhos; (b) o termo “filtragem” usado no Predict, na realidade se refere a uma técnica de amortecimento exponencial baseado no uso de janelas móveis, onde o valor médio da sub-série¹⁴ é estimado através da média aritmética (médias móveis de tamanho N, onde N é o número de dados contidos na janela); (c) o amortecimento exponencial poderia ser feito nos resultados do gradiente de pressão de poros e não nos registros filtrados (só folhelhos) embora, segundo Matthews (2004), o amortecimento se deve aplicar antes para poder controlar as incertezas ou corrigir os erros gerados no processo de seleção de camadas de folhelhos (através do registro de raios gama). Aliás, indica que esta técnica pode reduzir os efeitos na previsão da pressão de poros dos erros presentes nos registros de porosidade (RES, Δt , ou V_i); embora não descarta um incremento da incerteza.

4. Intercalações de folhelhos e arenitos podem produzir incrementos ou decrementos do PP dependendo das condições geotectônicas que transformaram o meio. O Predict assume que a pressão de poros no folhelho representa a média destas mudanças; mas não se descarta a ocorrência de mudanças significativas. Então, essa variação representa a incerteza dos resultados do PP, e justifica a aplicação de uma função de amortecimento exponencial que estime o valor médio dos dados de RES ou DT selecionados a partir do GR. Segundo Matthews (2004), a pressão de poros não é afetada consideravelmente pela seleção de estratos de folhelhos no perfil GR. A dica é a seguinte: quando se optar por selecionar camadas de folhelhos de forma conservadora (ou seja, folhelhos bem diferenciados), os pontos filtrados no perfil respectivo serão poucos ou podem ficar consideravelmente separados; portanto a técnica de amortecimento exponencial vai precisar de uma janela o suficientemente grande para tentar obter valores médios representativos. Por outro lado, optando por uma seleção de folhelhos menos seletiva (ou seja, camadas muito parecidas entre si), o resultado será uma maior

¹⁴ Dados contidos na janela móvel

quantidade de pontos com informação de porosidade (RES, Δt ou V_i) e portanto se pode utilizar uma janela menor.

5. No presente trabalho se afirma que a técnica de amortecimento nem sempre é recomendável, sobre tudo quando se tem uma identificação geológica confiável. Schulumberger¹⁵ por exemplo, aplica primeiro uma filtragem de camadas de folhelhos (*outliers*) e depois calcula a média no gradiente de pressão de poros.

Até agora se pode concluir que o Predict, no Módulo de Incertezas, não leva em conta a seleção de camadas de folhelhos assim como os possíveis erros nas leituras de RES ou DT, como fontes de erro na previsão da pressão de poros; justificando que os processos de filtragem e amortecimento de dados corrigem ou diminuem significativamente as variações dos resultados. Na avaliação de incertezas, o Predict considera com fontes de erro: o gradiente de sobrecarga, o gradiente de pressão de poros normal, a linha de tendência normal de compactação, e de outros parâmetros segundo o modelo selecionado.

4.3. Descrição da Técnica de Monte Carlo

No presente trabalho se utilizou a técnica de Monte Carlo nos modelos de Eaton e Bowers (ambos sobre registros sônicos); não obstante que pode ser aplicado sobre outros métodos de previsão da pressão de poros.

Para entender a técnica de Monte Carlo precisa-se primeiro entender algumas propriedades da estatística descritiva como: variável discreta e variável contínua, amplitude, média (μ), desvio padrão (σ_s), variância; esses conceitos podem ser revisados no documento de Toledo (1995). Além disso, precisa-se conhecer a terminologia utilizada no campo da probabilística; basicamente definir os conceitos de variável aleatória, probabilidade e incerteza, funções de densidade de probabilidade de variável contínua (PDF) e das funções de distribuição acumulada (CDF); esses conceitos podem ser revisados no documento de Murray (1978). Finalmente devemos conhecer as principais funções de densidade (PDF): distribuição uniforme, triangular, distribuição Normal ou Gaussiana, e distribuição Log-Normal.

A técnica de simulação de Monte Carlo consiste em gerar aleatoriamente valores para os parâmetros (constantes ou não) de um modelo. Estes

¹⁵ Informado por Bruno Holzberg durante a defesa do presente trabalho (fevereiro, 2007)

parâmetros são selecionados de acordo com o grau de confiabilidade que apresente cada uma das medições, registros ou cubos de dados geofísicos; para o qual se recomenda pesquisar a origem dos dados junto à opinião de um geofísico com certa experiência na área de geopressões. Participará também da simulação, aqueles parâmetros considerados como constantes num modelo de previsão de pressão de poros, e que por diferente motivos geofísicos apresentaram aleatoriedades em seus valores. Portanto, quanto maiores forem as aplicações de um (ou mais) modelo(s) sobre uma mesma bacia sedimentar, maior será a avaliação do modelo. Desta forma cada parâmetro pode ser representado através de uma função de densidade (PDF) e de sua respectiva CDF, observando seu valor mais provável (média), sua variabilidade (desvio padrão) e sua faixa de ação (amplitude). Estes 3 itens definem a forma da PDF, a qual pode ser (entre as principais): pontual, uniforme ou constante, triangular, gaussiana e log-normal. No caso do Predict, a variável aleatória está representada pela porcentagem de probabilidade acumulada (0-100%). Esta variável aleatória será localizada sobre a CDF de cada parâmetro que participe na simulação, e identificando seu valor respectivo, tal como é mostrado na figura 52. Todos estes valores, por sua origem, são considerados como aleatórios, e junto aos parâmetros considerados como confiáveis (ou seja, aqueles que não participam da simulação), são avaliados ou aplicados deterministicamente no modelo usado na previsão. Para cada jogada (simulação), resultará um valor percentual, gerando valores para cada parâmetro na sua respectiva CDF, e conseqüentemente um valor de gradiente de pressão de poros. Portanto, quanto maior o número de simulações, maior o número de combinações entre os parâmetros, maiores resultados do PP, e melhor a definição da CDF do gradiente de pressão de poros. Nesta última CDF são identificados os limites de confiança do PP; os quais comumente são definidos através do P10, P50 e P90; os quais são representados pelos seguintes modelos:

- ✚ P10: $P(PP_i < 10\%)$. Existe 90% de probabilidade de que o gradiente de pressão de poros seja maior que PP_i .
- ✚ P50: $P(PP_i < 50\%)$. Existe 50% de probabilidade de que o gradiente de pressão de poros seja maior ou menor que PP_i . Este valor também é conhecido como a esperança dos valores (previstos).
- ✚ P90: $P(PP_i < 90\%)$. Existe 10% de probabilidade de que o gradiente de pressão de poros seja maior que PP_i .

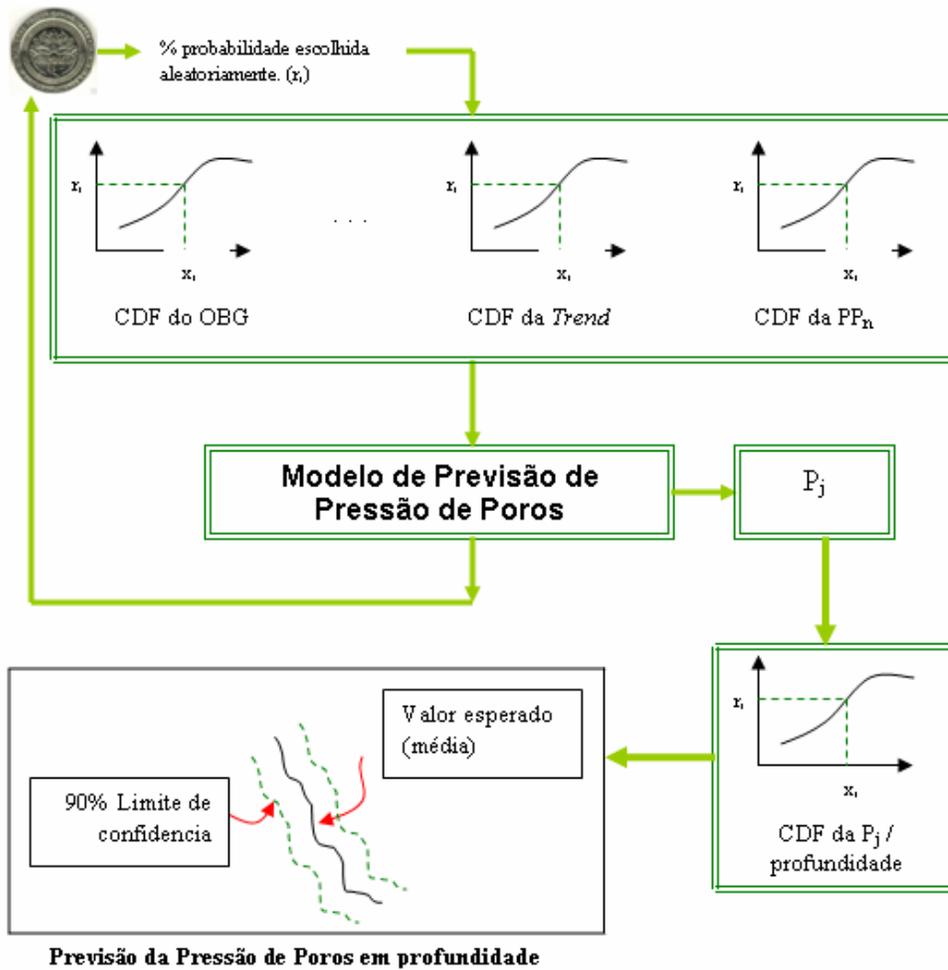


Figura 52 Aplicação da técnica de Monte Carlo no *software* Predict.

Desta forma a técnica de Monte Carlo, permite simular os possíveis comportamentos de vários sistemas físicos e matemáticos, embora sua aplicação considera que os parâmetros que participam nos diversos modelos de previsão são independentes entre si, o qual nem sempre acontece. Por exemplo, o modelo de Doyen (2004) considera a porosidade e a velocidade intervalar do meio (além de outros parâmetros) para a previsão da pressão de poros, se revisando o segundo capítulo do presente trabalho pode-se ver que existe uma relação entre ambos e, portanto Monte Carlo não poderia ser aplicado.

A seguir apresenta-se um resumo do descrito anteriormente, em relação à aplicação do Predict.

1. Primeiro constrói-se a PDF e CDF de cada variável independente, considerada com incerteza.
2. Obter um número r_i entre 0 e 1 a partir de uma geração aleatória de números em um computador.

3. Usar a CDF para determinar o valor x_i correspondente à probabilidade acumulada r_i , selecionada no item 2. Repetir os pontos (2) e (3) para cada variável independente ingressada para obter $r_1...r_n$ e $x_1...x_n$, respectivamente.
4. Calcular no modelo de previsão da pressão de poros o resultado (*output*) p_j usando $x_1... x_n$ como dados de entrada (*inputs*).
5. Repetir os pontos (2) → (4) tantas vezes que se deseje obter valores sucessivos de p_j . Quando o número de iterações se incrementa, a possibilidades de que os resultados sejam estatisticamente significativos também se incrementa.
6. Calcular μ , σ_s , P-10, P-50, P-90. Os últimos 3 valores são calculados na CDF de p_j .

4.4. Breve Descrição da Bacia Sedimentar Internacional X

Segundo a informação dos 5 poços, a bacia sedimentar X apresenta a seguinte descrição:

- Poço *offshore*.
- Apresenta lâmina de água entre 200 até 3400 ft aproximadamente.
- Observam-se intercalações de arenitos e folhelhos distribuídos turbiditicamente, correspondentes à era Terciária.
- Possibilidade da existência de intercalações de calcita, porém rochas porosas geradas por dissolução.
- As porosidades observadas nos poços pioneiros variam entre 15 – 25%.
- Seções geológicas indicam a presença de um sistema de falhas estruturais, gerando compartimentos de arenitos e possíveis variações laterais de pressão de poros; embora, no presente trabalho só se realiza a previsão nos folhelhos, pela falta de informação (localização, geologia, geotectônica, e tipos de fluidos que preenchem os vazios).

Na base de dados analisados, estão disponíveis os dados de perfilagem de 4 poços, e seus respectivos pesos de lama utilizados. Na figura 53 pode-se apreciar sua distribuição em planta e em perfil dos poços.

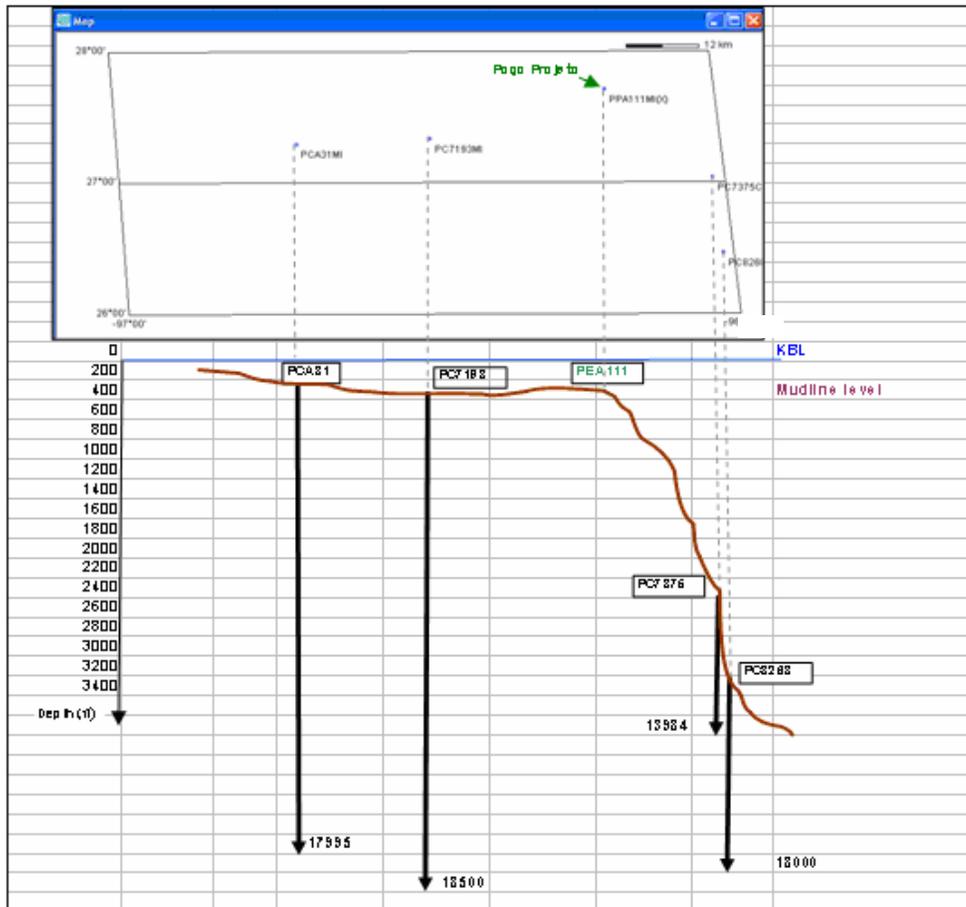


Figura 53. Localização em planta e em perfil dos poços com informação disponível da bacia sedimentar X.

O poço PPA111MI(X) foi selecionado como o poço projeto, pois nele, só está disponível o peso da lama. Devido às grandes diferenças das lâminas de água existentes entre os poços (ver tabela 4), se consideram como poços de correlação os poços: PCA31MI e PC7193MI. Os poços PC7375 e PC8268 não participam da previsão da pressão de poros do poço projeto, por ser poços de águas profundas.

Tabela 4 Resumo dos poços utilizados na bacia sedimentar X.

Nome do poço	PC7193MI	PC7375CC	PC8268IP	PCA31MI	PPA111MI(X)
Tipo de poço	vertical	vertical	vertical	vertical	direcional
Nome do arquivo	7193	7375	8268	UM A31	MU A111
Dados disponíveis	DT/GR/NPHI/RES/RHOB	CALI/CSG/RHOB/DT/GR/SP	CALI/CSG/DT/GR/NPHI/RES/RHOB/SP	CALI/RHOB/DT/MW/GR/LOT/NEUT/RES/REVE	MW
Uso do poço	poço correlação	poço correlação	poço correlação	poço correlação	poço projeto
Início da perfuração (ft)	427	2413	3424	301	398
Final da perfuração (ft)	18500	13984	18000	17995	17892
KB(ft)	105	34	86	79	124
Lâmina de água (ft)	322	2379	3338	222	274
Dados de calibração	MW(*)	MW(*)	MW(*)	MW(+)	MW(*)

(*) os dados de calibração estão na folha de Excel: "dados calibração" do arquivo: "dados poços"

(+) os dados de calibração (MW) estão como registro de perfil.

4.5. Cálculos Prévios

Depois de realizar uma análise determinística com cada um dos poços de correlação, e de obter os parâmetros finais como resultados da calibração; apresenta-se a tabela 5 onde se mostra um resumo dos parâmetros calibrados com o modelo de Eaton (1975).

Tabela 5 Resumo dos parâmetros calibrados nos poços de correlação usando o modelo de Eaton (1975).

Nome do Poço	Modelo	Registro	Expon.	NPPG(ppg)	Air gap (ft)	WD (ft)
PC7193	Eaton	sônico	3.00	8.75	105.00	322.00
PC 7375	Eaton	sônico	3.20	8.75	34.00	2379.00
PC 8268	Eaton	sônico	3.30	8.75	86.00	3338.00
PC A31	Eaton	sônico	3.00	8.75	79.00	222.00
PE A111	Eaton Probab.	sônico			124	274

Na figura 54 se observam nos 4 gráficos os resultados da previsão da pressão de poros gerados por uma análise determinística dos 4 poços de correlação, todos devidamente calibrados com os registros de peso de lama. Os registros em cor azul representam os gradientes de pressão de poros estimados deterministicamente. Os registros de peso de lama, utilizados para controlar a estabilidade de cada poço, são observados em cor verde, finalmente os registros de gradiente de sobrecarga são assinalados em cor roxa.

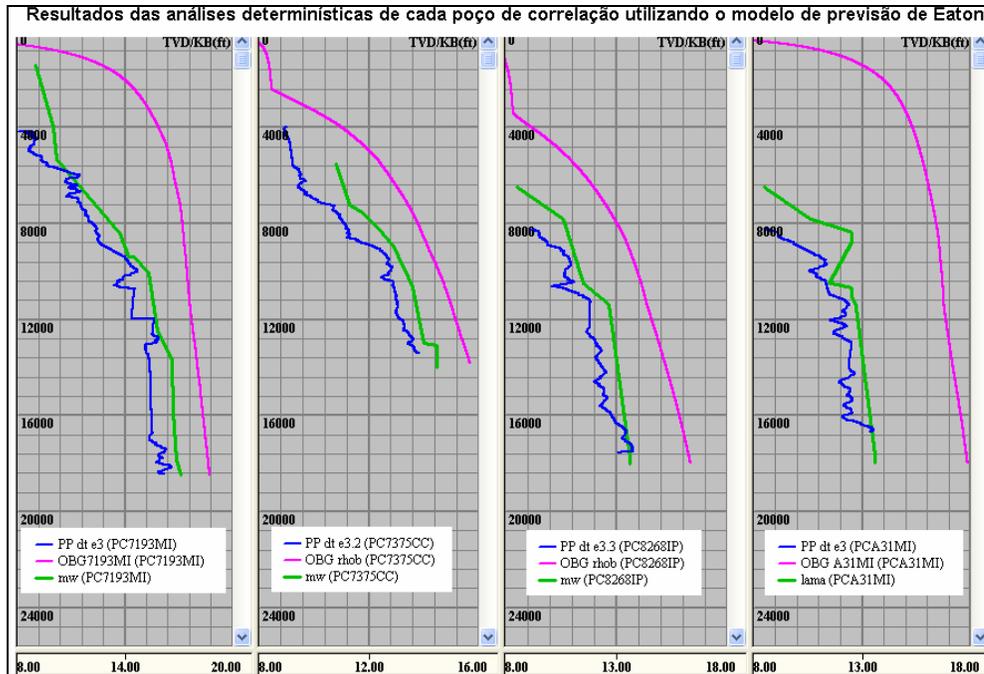


Figura 54 Resultados da análise determinística de pressão de poros dos 4 poços de correlação.

4.6. Hipóteses Assumidas

Na figura 53 se observa o seguinte: (a) o poço PC7193MI está ao lado do poço projeto PPA111MI(X), e (b) a lâmina de água entre os poços de correlação e o poço projeto apresentam magnitudes similares. Com isto, pode-se assumir que existe uma alta probabilidade de que o poço PC7193MI seja o de maior correlação com o poço projeto e, portanto se assume que o perfil sônico do poço PC7193 é o mesmo para o poço projeto.

No caso do *Trend*, se usa o *Trend* (já calibrado) do poço PC7193 como o mais provável (*Trend Médio*). Segundo Dutta (2002), cada poço apresenta seu próprio *Trend*, e portanto está-se assumindo variações até de $\pm 5\%$ em relação ao *Trend Médio*. A distribuição utilizada para este caso foi uma PDF triangular.

Em relação ao expoente de Eaton, pode-se apreciar que nos dois poços de correlação se usou o mesmo valor de 3, portanto pode-se assumir de que existe certa confiabilidade de usar este valor na previsão do poço projeto e fixar seu valor na simulação de Monte Carlo. O mesmo acontece com o valor do gradiente de pressão normal, ele tampouco participa na simulação e seu valor é fixado em 8,75 ppg.

No caso do gradiente de sobrecarga, este pode ser estimado a partir do registro de densidades dos poços PC7193MI e PCA31MI devido à semelhança

geométrica dos poços e a geologia do subsolo. Poderia se afirmar que existe uma maior confiança em usar o poço OBG do PC7193MI (mostrado em cor amarelo na figura 55, segundo gráfico) por estar mais perto do poço projeto; sendo ideal assinalá-lo com um maior peso, embora o Predict não permita esta opção. Para solucionar isto gerou-se um terceiro OBG, o qual representa 101% do OBG do poço PC7193MI (mostrado em cor azul celeste na figura 55); aplicando depois uma distribuição triangular indicando os limites e o OBG mais provável.

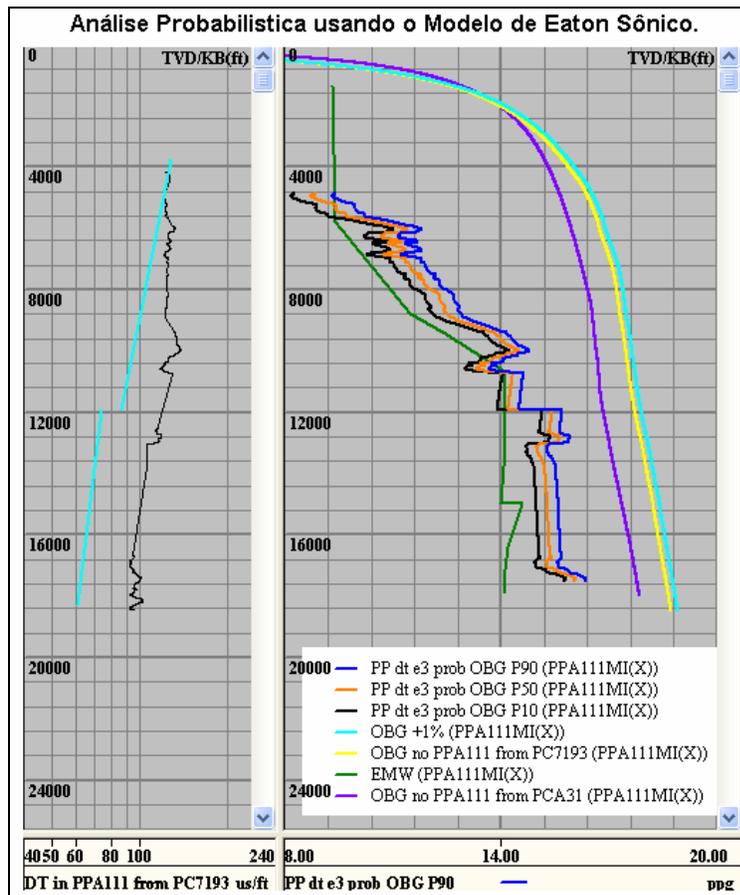


Figura 55 Resultados de uma análise probabilística de pressão de poros para um poço projeto, usando o registro sônico do poço de correlação mais próximo.

4.7. Aplicação Probabilística no Modelo de Eaton

A figura 55 mostra os resultados da análise probabilística feito no Predict para estimar o gradiente de pressão de poros num poço projeto, a partir das hipóteses assinaladas no item anterior. Observam-se os resultados dentro de uma faixa de segurança com 80% de probabilidade de ocorrência, sendo o

dataset central o valor mais provável. A linha em cor verde (gráfico 2, mesma figura) representa o peso da lama utilizada no processo construtivo do poço, e foi utilizado para observar a efetividade da análise probabilística. Apesar de que as hipóteses assumidas tentam reduzir ao mínimo as incertezas, a faixa de PP estimada fica praticamente fora do peso da lama empregada. A maior suspeita está no *Trend* de Eaton, o qual é considerado como ponto fraco do Método, tal como foi mostrado no capítulo 3 do presente trabalho. Poderia se pensar que no poço de correlação PC7193 existem outros mecanismos que geram sobrepressão, e que ao parece não estão presentes no poço projeto, lamentavelmente as profundidades onde foram medidos os tempos intervalares e as densidades variam consideravelmente para aplicar a técnica de Chopra e Huffman (2006) e identificar alguma descarga de tensões efetivas. Definitivamente, a informação da porosidade, neste caso, o registro sônico, também é de vital importância. Pode-se concluir, que para conseguir efetividade numa análise probabilística deste tipo, precisa-se de registros de porosidade obtidos através de cubos de informação sísmica, devido que eles abrangem maior informação da região, assim mesmo, o emprego de registros de porosidade de poços de correlação, podem ser úteis quando a geologia o permita.

A figura 56 mostra os resultados de uma análise probabilística usando as mesmas hipóteses do item anterior, com a diferença de que o registro de porosidade (sônico) foi obtido através de uma interpolação espacial ponderada¹⁶ das medições feitas nos 4 poços de correlação. No primeiro gráfico da figura 56 se observa o registro sônico descrito anteriormente (cor preta, com o nome “DT interpolado básico”) e o *Trend* respectivo (cor azul celeste); o qual foi traçado numa primeira estimativa (sem calibrar). Os resultados são mais consistentes com o registro de peso de lama usado no poço projeto, isto se deve porque a interpolação espacial de dados sônicos dos 4 poços de correlação descreve melhor a variação da porosidade no poço projeto, que uma cópia simples do poço de maior correlação (observada em cor roxa no gráfico 1, figura 56, com o nome “DT in PPA111 from PC7193”).

Apesar da melhora nos resultados, não se pode generalizar esta técnica, pois ela depende muito da geologia da zona e da experiência do analista de geopressões para traçar o *Trend*.

¹⁶ O modelo de interpolação, ponderação de dados, e métodos de escolha de dados são revisados no item 4.2 do presente trabalho.

Malinverno et al. (2004) geram uma metodologia para reduzir as incertezas através de medições feitas em tempo real, utilizando a inversão Bayesiana. O Predict resolve isto através de seu Módulo em Tempo Real, porém como foi descrito no primeiro capítulo, este tipo de aproximação fica fora do escopo deste trabalho, além de não se dispor do Módulo.

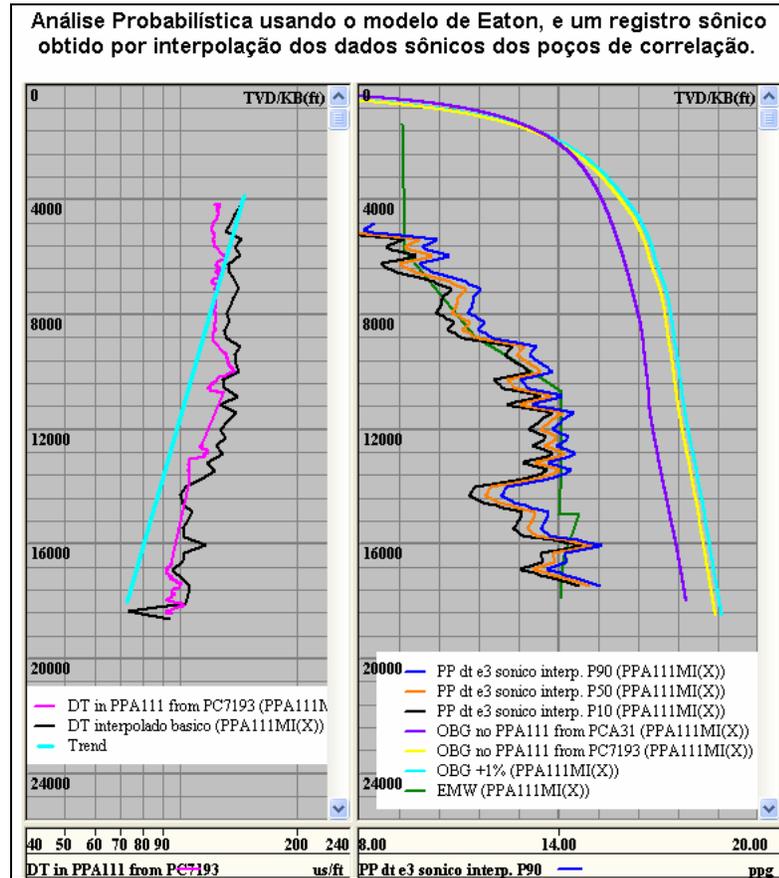


Figura 56 Resultados de uma análise probabilística de pressão de poros para um poço projeto, usando um registro sônico obtido por interpolação espacial.