

AVANÇOS NA PREVISÃO DE PRESSÃO DE POROS EM FOLHELHOS

Julio Laredo¹ (PUC-Rio-DEC / GTEP), Sérgio A.B. da Fontoura² (PUC-Rio-DEC / GTEP)

¹CEP 22453-900, 225 PUC-Rio- Ed. Leonel Franca 6º andar - Gávea -Rio de Janeiro, julio@gtep.civ.puc-rio.br

²Caixa Postal 38097 DEC-PUC-Rio, Rio de Janeiro – RJ, fontoura@civ.puc-rio.br

Nos últimos 45 anos foram publicados muitos artigos referentes à previsão da pressão de poros em folhelhos, como resultado da necessidade de otimizar o processo construtivo de poços de petróleo. Como resultado da revisão bibliográfica, se conseguiu fazer um histórico da previsão da pressão de poros, além de reunir os principais mecanismos de geração de pressão de poros e mecanismos de variação lateral dos mesmos. Também são descritos 12 métodos de previsão de pressão de poros, além do conceito do Centróide, 3 técnicas para detectar descarga de tensões efetivas numa formação rochosa, e uma descrição do uso da sísmica na previsão da pressão de poros. Foram aplicados os métodos de Eaton (1975) e Bowers (1995) com o objetivo de fazer uma discussão sobre as incertezas presentes nos parâmetros de cada modelo, complementado o estudo com uma análise de sensibilidade. Como resultado das incertezas existentes se aplicou uma análise probabilística baseada na simulação de Monte Carlo e usando o método de Eaton, com o objetivo de apresentar resultados dentro de intervalos de confiança e permitir planos de contingência durante o projeto de construção do poço. Finalmente são avaliados os resultados de uma análise 3D de previsão de pressão de poros utilizando o modelo de Eaton e o *Trend* de Bowers. Os cubos de dados foram obtidos por interpolação espacial ponderada partindo de registros de poços. Os resultados mostram que este tipo de análise pode ser usado com fins qualitativos, obtendo cubos de gradientes de pressão de poros aonde se observam as zonas de maior e menor risco.

Previsão, pressão, incertezas, subcompactação, expansão de fluidos, Eaton, Bowers.

1. INTRODUÇÃO

Os resultados dos prognósticos das geopressões são de muita importância na indústria do petróleo e usados frequentemente por engenheiros de perfuração, com o objetivo de planejar a construção do poço e a estabilidade do mesmo de forma segura e econômica. Inicialmente a pressão de poros era estimada através de correlações empíricas entre dados de perfuração e medições de pressão de poros. Hottman e Johnson (1965) estimaram as pressões de poros em folhelhos, relacionando os desvios do *Trend* (linha de tendência normal de compactação) com medições “in situ” de pressão de poros em arenitos adjacentes. Posteriormente a previsão de pressão de poros foi relacionada ao mecanismo de geração de pressões anormais. A subcompactação foi avaliada principalmente pelo método da Profundidade Equivalente de Foster e Whalen (1966), e Eaton (1975). Bowers (1995) desenvolve um novo método para a previsão de pressão de poros, baseado na teoria de compactação da mecânica de solos, e nos mecanismos da subcompactação e a expansão de fluidos.

Em paralelo se desenvolviam os modelos mecânico - físicos. Este grupo de metodologias se diferencia dos acima mencionados, porque suas teorias e hipóteses estão baseadas na física das rochas além do estado de equilíbrio de tensões apresentado por Terzaghi. O trabalho de Pennebaker (1968) foi o início do uso das velocidades intervalares obtidas por processamento de dados sísmicos para a previsão da pressão de poros. Daí na frente, os geofísicos relacionados ao tema, apontaram por conseguir velocidades intervalares de alta confiabilidade, através de processamentos mais rigorosos que permitam representar as velocidades de onda nas diferentes formações rochosas.

Posteriormente alguns dos modelos de previsão de pressão de poros foram aplicados junto a análises probabilísticas devido às incertezas presentes tanto nos parâmetros de medição como nas constantes de cada modelo, com o objetivo de apresentar os resultados dentro de uma faixa de segurança. Atualmente existem técnicas que permitem atualizar dados ou parâmetros, através de medições feitas durante a perfuração (MWD, LWD, SWD), com a finalidade de reduzir as incertezas em tempo real.

Existem também pesquisas interessadas em fazer a previsão de pressão de poros em rochas reservatório aonde se utilizam modelos mecânico – físicos baseados em correlações com outros parâmetros geofísicos. Finalmente, temos pesquisas que na atualidade já se aplicam ou ainda estão sendo desenvolvidas, entre elas: obtenção das velocidades intervalares na frente da broca (VSP), técnicas para obter velocidades de baixo do sal e basaltos, melhor entendimento sobre outros mecanismos de geração de sobrepressão, e melhores métodos para a modelagem de bacias para a previsão de pressão de poros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Origens das sobrepressões

A sobrepressão é um estado de desequilíbrio entre a dissipação e a retenção de fluidos, o qual depende da evolução do sistema rocha fluido. Este sistema está integrado por 4 componentes que interagem entre si em tempos geológicos: mecanismos geradores de pressão de poros, o tipo de fluido, a permeabilidade da rocha e os mecanismos de origem geotectônica. Este último componente sustenta a variação lateral da pressão de poros, e se refere aos mecanismos geológicos de origem sedimentar e estrutural; ambos vinculados à geometria das camadas, à presença de falhas e de domos salinos.

O principal mecanismo gerador de sobrepressão é a subcompactação; este fenômeno está vinculado ao tipo de sedimento, à velocidade de deposição dos mesmos, e à dissipação normal ou restringida dos fluidos presentes nos poros, obtendo-se como resultados pressão de poros normais ou anormais respectivamente. Outro mecanismo de similar importância é a expansão de fluidos, a qual basicamente agrupa outros mecanismos (como por exemplo: expansão aquathermal, transformações de minerais) que produzem liberação de fluidos por efeitos de pressão, temperatura, e composição química da matéria. Este mecanismo produz descarga de tensões efetivas e em conjunto com a subcompactação podem atingir valores muito altos da sobrepressão (maiores de 80% do gradiente de sobrecarga). Existem outros mecanismos como a fluviabilidade de fluidos, carga hidráulica, osmose, e o tectonismo; este último mecanismo é considerado em regiões com atividade sísmica, não sendo o caso do Brasil. Mecanismo como o tectonismo, contraria à subcompactação e expansão de fluidos, produzem uma redução anormal da porosidade. Yassir e Bell (1996) fazem um estudo que relacionam a porosidade de um meio sobrepressurizado com o mecanismo de geração da sobrepressão; observando que só a subcompactação mantém uma relação direta entre porosidade e a pressão de poros.

Métodos de previsão de pressão de poros.

Mukerji et al. (2002) fazem uma classificação dos métodos de previsão: baseados em modelagem de bacias, medições sísmicas, e registros de poço (perfilagem). É importante mencionar que um perfil petrofísico 1D, pode ser obtido por perfilagem de poços ou pode ser estimado a partir da sísmica, portanto os seguintes métodos podem ser usados com qualquer uma das fontes de dados. Laredo e Fontoura (2007) fazem uma revisão dos principais métodos de previsão de pressão de poros. A continuação se apresenta uma breve descrição.

O método da Profundidade Equivalente (MPE) foi inovado por Foster e Whalen no ano 1966 e atualizado por Mouchet e Mitchell no ano 1989. Aqui, o valor da porosidade anormal gerada pela subcompactação é refletido em condições normais de compactação, numa profundidade denominada “profundidade equivalente”. Este valor permite estimar a tensão efetiva a qual é a mesma nas duas regiões (normal e anormalmente compactada); permitindo estimar a sobrepressão através do modelo universal e Terzaghi. Desvantagem: precisa de um *Trend* bem definido. Vantagem: pode ser usado para reconhecer a participação de outros mecanismos geradores de pressão.

Hottman e Johnson geram no ano 1965 um método empírico, baseado na geração de uma gráfica aonde se correlacionam os desvios do *Trend* com medições in situ de pressões de poros. Vantagem: este método pode abranger outros mecanismos de geração de pressão de poros. Desvantagem: precisa de muitas medições in situ para construir e/ou modelar a correlação existente.

Pennebaker no ano 1968 foi o primeiro a perceber que os dados sísmicos contêm importante informação para a engenharia de perfuração. Utilizou velocidades intervalares geradas a partir do processamento de Dix para a estimativa da pressão de poros. O modelo de Pennebaker é empírico, afirmando que as velocidades das ondas sísmicas num meio estão influenciadas pela litologia, pela idade geológica e pela pressão de poros. Aplica uma técnica gráfica para as estimativas da pressão embora, precisa de uma região normalmente compactada para reduzir as incertezas da técnica.

Entre 1972 e 1995 **Eaton** apresenta um método similar ao da profundidade equivalente, com a diferença que utiliza os desvios do *Trend* (num registro que infira porosidade) para estimar as tensões efetivas. Vantagens: é prático, de fácil aplicação, pode ser utilizado para outros mecanismos de geração de sobrepressão além da subcompactação embora, o método pode perder sentido físico. Comparado com outros métodos de previsão, Eaton só precisa de 3 parâmetros para a calibração: o expoente, o gradiente de pressão normal, e o *Trend*, embora a definição do *Trend* representa o ponto fraco do método pelas incertezas associadas, e a alta sensibilidade do modelo à variação do mesmo. Desvantagens: precisa de uma região normalmente compactada, o método de Eaton não pode ser aplicado em 3D pela definição manual - gráfica do *Trend* embora, pode apoiar-se num outro modelo analítico do *Trend* para o funcionamento do método.

Holbrook e Hauck utilizam em 1987 o modelo físico de Waxman e Smit (1968) para estimar a porosidade do meio. Para estimar as tensões efetivas utilizam o modelo de Rubey e Hubbert (1959) e finalmente aplicam o modelo universal de Terzaghi para calcular a pressão de poros. Vantagens: não precisa do *Trend*. Desvantagens: a calibração é menos simples, precisa de outros parâmetros do meio os quais são obtidos por outras correlações ou modelos, podendo incrementar-se as incertezas na previsão da pressão de poros.

Holbrook, Maggiori e Hensley descrevem em 1995 como estimar pressão de poros em qualquer bacia sedimentar, independente da litologia existente. Afirmam que cada mineral tem sua própria curva de compactação (porosidade versus tensão efetiva), portanto cada rocha que apresente certa combinação de minerais possui uma única curva de compactação gravitacional. Segundo os autores, os parâmetros que definem a curva de compactação de uma rocha correspondem à média ponderada em volume, dos parâmetros das curvas de cada mineral constituinte. Desvantagem: incerteza na definição do volume de minerais que constituem as rochas.

Ward et al. apresentam em 1995 uma ampliação do método de Holbrook e Hauck (1987) para sobrepressões geradas por expansão de fluidos, afirmando que o modelo de descarga pode ser conseguido através de um incremento proporcional da porosidade na região onde atua a expansão de fluidos. Os autores não mostram estas relações ou modelos, não podendo ser avaliadas neste estudo.

Em 1995, **Bowers** gerou dois modelos para fazer a previsão considerando a ação dos mecanismos de subcompactação, e subcompactação com expansão de fluidos. Sua teoria esta baseada em fundamentos da mecânica de solos, essencialmente no comportamento tensão – deformação, conseguindo relacionar tensões efetivas com velocidades sônicas (ou intervalares). Carregamento e alívio de tensões efetivas são mostrados na análise de Bowers, e duas curvas com seus respectivos modelos. Vantagens: não precisa uma região normalmente compactada, considera dois mecanismos primários de geração de sobrepressão, permite fazer análises 3D e análises probabilísticas sem precisar de outros modelos. Desvantagens: o *Trend* é estimado analiticamente, precisando 4 parâmetros para sua definição: duas constantes (A, B), a medição sônica no *mudline* (Δt_0), e o gradiente de pressão de poros normal (PP_n). O modelo de previsão com descarga de tensões, além dos parâmetros anteriores, também precisa da definição da profundidade aonde se inicia a descarga de tensões (V_{max}), e da definição do parâmetro de descarga U; fazendo um total de 6 parâmetros. Destes 6 parâmetros dois são de fácil definição (Δt_0 , V_{max}) ficando pendentes 4 parâmetros.

Kan e Swan no 2001 utilizam tempos intervalares derivados das variações das amplitudes de onda com *offset* (inversão AVO), e aplicam um modelo empírico baseado na hipótese de Hottman e Johnson (1965) e no método de Pennebaker (1968), aplicado para fazer a previsão de sobrepressões geradas pela subcompactação. O modelo utiliza os desvios do *Trend*, o gradiente de pressão de poros normal, e duas constantes. As duas constantes são valores decimais muito pequenos, e o modelo é muito sensível às pequenas variações deles. O modelo não usa o gradiente de sobrecarga para estimar o gradiente de pressão de poros.

Sayers et al. no 2002 utilizam velocidades intervalares estimadas a partir da inversão tomográfica, e utilizam os modelos de Bowers (1995) e Eaton (1975) para estimar a pressão de poros. No caso de Eaton, utilizam o modelo de Slotnick (1936) para definir analiticamente o *Trend*. A contribuição de Sayers et al. está baseada em apresentar os resultados da previsão de pressão de poros dentro de intervalos de confiança, devido as incertezas dos dados e parâmetros de entrada, além recomendam complementar a calibração dos modelos em tempo real através de MWD e LWD.

Dutta no 2002 mostra como são estimadas as pressões anormais através de modelos mecânico – físicos junto ao modelo universal de Terzaghi de forma clara e simples. Dutta afirma que a equação de Issler (1992) é a de maior uso para estimar a porosidade em folhelhos usando registros sônicos ou tempos intervalares. Além, mostra a equação de Rubey e Hubbert (1959) modificada e influenciada por uma função de temperatura, afirmando que a compactação além de gerar redução de vazios, também gera mudanças mineralógicas e, portanto mudanças das tensões efetivas devido ao incremento da temperatura.

Doyen et al. no 2004 apresenta um modelo mecânico - físico baseado no método de Bowers (1995), onde inclui a porosidade e conteúdo de argilas da formação para estimar a pressão de poros, resultando um total de 5 constantes para calibrar. Doyen afirma que o modelo deve ser calibrado segundo o tipo de formação e o tipo de fluido. O objetivo principal de Doyen et al. (2004) foi propagar incertezas na previsão de pressão de poros usando a sísmica, e aplicando um modelo universal probabilística 3D.

Métodos mais usados na indústria do petróleo

A revisão dos documentos Yoshida et al. (1996), Knowledge Systems (2001), Sayers et al. (2002), Bridges (2003), e diversos trabalhos e opiniões de geofísicos e analistas de geopressões, nos permitem afirmar o seguinte: no estado da arte da previsão de pressão de poros, os modelos de Eaton (1975) e Bowers (1995) são os mais utilizados na indústria do petróleo. Além, num esforço pela melhoria dos resultados, existem combinações de ambos os métodos, como o desenvolvido no projeto DEA-119, onde no método de Eaton utilizam a equação de Bowers para definição do *Trend*.

O conceito do Centróide

Matthews e Standifird (2003) comentam que o 50% do tempo não produtivo são causados pelas geopressões e a instabilidade do poço. Desta percentagem, uma boa parte é devido a uma análise incompleta de sobrepressões

realizados somente nos folhelhos. A solução é uma análise integral tanto em arenitos como em folhelhos, sendo avaliados com mapas estruturais e geológicos, identificando as litologias, as falhas presentes e o tipo de fluido presente nos compartimentos com o objetivo de corrigir os resultados de pressão nos arenitos.

O conceito do Centróide foi desenvolvido por Traugott e Heppard (1994), o qual descreve que a sobrepressão de poros presente no folhelho difere da pressão presente no reservatório adjacente; a exceção da profundidade definida como “Centróide”, onde a pressão de poros no arenito e no folhelho é igual. A diferença de pressão entre estes dois corpos se deve à impermeabilidade relativa do folhelho e à redistribuição de pressão dentro do arenito; o qual significa que pressões de poros existentes em folhelhos inferiores podem ser transmitidas para corpos de arenitos localizados acima do mesmo; podendo alcançar pressões maiores que os folhelhos ao redor. A estimativa da pressão no arenito está baseada na geometria e localização do mesmo no subsolo. Os principais problemas gerados pelo efeito Centróide são: (a) estimativas erradas na previsão quando não é considerado seu efeito, (b) os gradientes de pressão de poros podem atingir os valores do gradiente de fratura do folhelho, no topo do arenito isolado, (c) se o folhelho se fratura, acontece fluxo e migração do fluido presente no arenito. (d) se a perfuração é direcionada por este arenito isolado, e dependendo da localização de entrada da broca, e dos tipos de fluido presente no arenito, podem acontecer fluxos incontrolados de fluidos (*blowouts*) no poço; provocando problemas econômicos e atentar contra a segurança dos trabalhadores.

Técnicas para detectar descarga de tensões numa formação rochosa.

Bowers (1995) percebeu que o MPE pode ser usado para reconhecer se algum outro mecanismo acompanha à subcompactação, baseando-se em que se as medições RFT não coincidem com as estimativas feitas com o MPE, então outro mecanismo esta presente. Uma deficiência desta técnica é que precisa de uma boa definição do *Trend* para as estimativas corretas de pressão de poros.

Bowers (2002) apresentou uma técnica para o reconhecimento das formações com sobrepressões elevadas (*high overpressure*), baseando-se em que o descarregamento produz uma pequena recuperação elástica, só nos poros de interconexão, sem uma significativa mudança do tamanho dos poros de armazenamento (*storage pores*, modelo de Bowers e Katsube, 2002). Desta forma as propriedades de transporte são mais sensíveis do que as mudanças de porosidade e densidade. Em geral, baseando-se no conceito do método da Profundidade Equivalente, cada valor de reversão da velocidade sônica, resistividade (corrigido por temperatura) e densidade, corresponde pelo menos a outro valor acima, os quais acontecem à mesma profundidade, tal como se observa na figura 1a. No caso que a profundidade equivalente da densidade seja maior, seria um indicador da presença de valores altos de sobrepressões, tal como é mostrado na figura 1b.

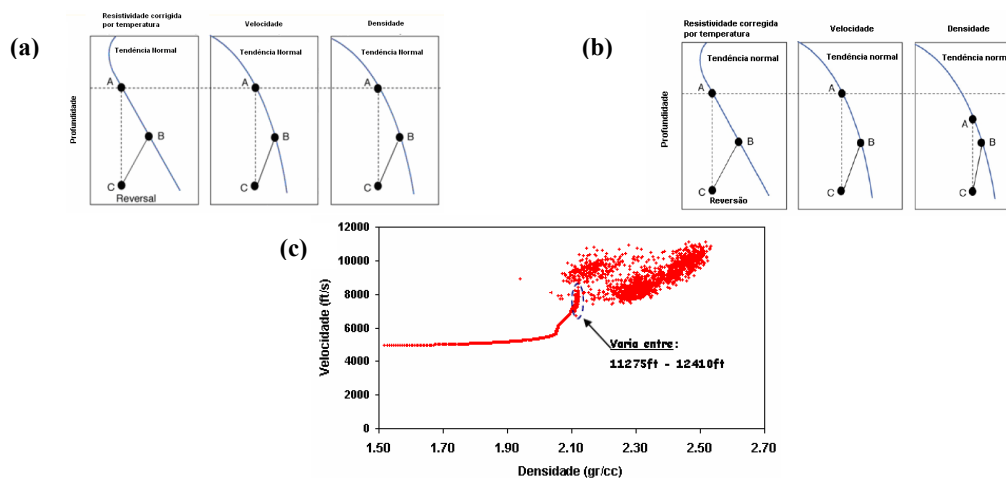


Figura 1. (a) presença só da subcompactação. (b) presença da expansão de fluidos. (Bowers, 2002). (c) identificação de zonas com alívio de tensões (Laredo e Fontoura, 2007).

Chopra e Huffman (2006) reconhecem zonas com presença de alívio de tensões efetivas através do ploteio do registro da densidade versus registro de velocidades de um mesmo poço. Zonas de descarga serão reconhecidas aonde se produzam quedas das velocidades sob densidades constantes, tal como é mostrado na figura 1c. A técnica anterior se explica porque quando acontece uma descarga ou queda de tensões efetivas, o incremento da pressão do fluido produz uma interrupção no processo de redução da porosidade pela sobrecarga. Considerando que a compactação é um processo irreversível, considera-se também que cessam as mudanças na porosidade e/ou densidade.

Uso da sismica na previsão da pressão de poros.

A previsão da pressão de poros através da sismica, esta baseada em fundamentos da fisica de rochas e na análise de atributos sísmicos. Comumente, para fazer a previsão de pressão de poros se empregam as velocidades intervalares das ondas compressoriais P embora em alguns casos utilizam as ondas cisalhantes S, ou a média geométrica de ambas (ondas PS). Dutta (2002) afirma que as velocidades intervalares estão em função dos seguintes parâmetros do meio: porosidade, fluido de saturação, estado de tensões “in situ”, tensões confinantes, estrutura dos poros, temperatura, tipo de fluido dos poros e seu estado termodinâmico, litologia, conteúdo de argilas, cimentação, e frequência da propagação das ondas.

Kan e Swan (2001) utilizaram a inversão AVO (*Amplitude Variation Offset*) para obter velocidades intervalares de maior confiança. Bob Bruce³ comenta que esta técnica é conhecida no mercado com vários nomes, informando que se o processo é muito cuidadoso podem-se obter melhoras na resolução vertical da função velocidade embora, na pratica se observam mais erros óbvios que sucessos claros.

Sayers et al. (2002a), afirmam que o modelo de Dix tem problemas de resolução lateral e vertical, e portanto não são apropriadas para fazer a previsão de pressão de poros; recomendando utilizar as velocidades obtidas pela inversão tomográfica devido que apresentam maior resolução espacial. Bruce⁴ comenta que a inversão tomográfica depende muito da qualidade dos dados e da geologia do meio, além afirma que a técnica *prestack depth migration* é o processo mais importante para gerar velocidades sísmicas aonde existe uma forte variação lateral da velocidade (efeitos de anisotropia).

Dutta (2002) comenta que o uso das velocidades intervalares derivadas da sismica, nos diversos modelos de previsão de pressão de poros, sem um entendimento de como os dados sísmicos foram adquiridos, processados, interpretados, e das limitações dos mesmos, podem resultar em consequências desastrosas nas análises de pressão de poros. Só para ter uma referência da seriedade do assunto, se apresenta as figuras 2a e 2b, onde se salientam as diferenças existentes entre diferentes métodos de processamento.

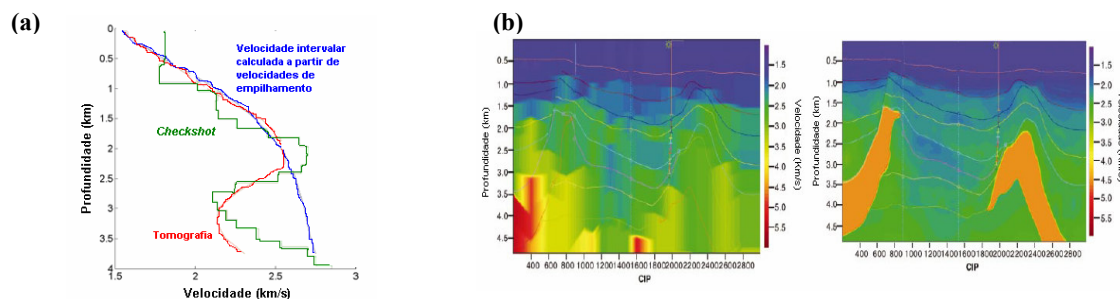


Figura 2. (a) Comparação de velocidades intervalares obtidas através três diferentes metodologias de processamento (Sayers 2002b). (b) Comparação de uma seção 2D de velocidades intervalares obtidas por o modelo e Dix na esquerda, e por inversão tomográfica na direita. (Sayers 2002a)

Chopra e Huffman (2006) reconhecem a importância da exatidão das velocidades geradas por diversos modelos para ser aplicadas na previsão de pressão de poros; por isso fazem uma revisão dos métodos disponíveis para estimar velocidade intervalar, mencionando suas deficiências e vantagens. Também afirmam que a escolha de uma metodologia apropriada para a estimação de velocidades para uma determinada área, vai depender das respostas que sejam dadas às seguintes perguntas: (a) estamos tratando com áreas estruturalmente complexas? é possível modelar velocidades só com funções verticais ou precisam incluir variações laterais?; (b) é válida a hipóteses da trajetória reta do raio (relacionada à reflexão tomográfica)? Pode a velocidade ser modelada no tempo ou espaço?; (c) é competente o modelo para meios anisotrópicos? Que tipo de anisotropia existe no meio?; (d) estamos analisando anomalias de pressão de poros para efeitos locais ou regionais?

Na realidade as respostas destas perguntas são próprias dos geofísicos especializados, embora todo analista de geopressões deve ter noções técnicas de geofísica para melhorar a comunicação intradisciplinar, com o objetivo básico de obter a melhor previsão de pressão de poros.

3. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE EATON E BOWERS

Verificação da expansão de fluidos

³ Comentário enviado por e-mail, (2006).

⁴ Idem.

Antes de iniciar os cálculos, se aplicou a técnica de Chopra e Huffman (2006) para verificar a presença ou não do mecanismo de expansão de fluidos num poço de água profundas localizado na bacia do Golfo de México. Na figura 1c se observa que existem pequenos intervalos com descarga como, por exemplo, entre 11275 e 12410 pés. Neste trabalho se considerou só o fenômeno da subcompactação para a previsão de pressão de poros embora, se utilizou um intervalo de descarregamento de tensões efetivas para avaliar a sensibilidade do modelo de Bowers frente à variação do parâmetro de descarga de U , tal como se observará na frente.

Análise de sensibilidade do modelo de Eaton

Pelo geral, os resultados de uma primeira estimativa de pressão de poros não sempre batem com as medições in situ; o qual pode acontecer pela incerteza nos registros de medição, pela incerteza no valor do gradiente de pressão de poros normal (PP_n), a variação do expoente de Eaton, a possível influência de outro mecanismo de geração de sobrepressão além da subcompactação, a localização do *Trend* ou pela necessidade de mais de um *Trend* para representar a compactação normal.

As figuras 3a, 3b e 3c mostram os efeitos de pequenas variações dos parâmetros PP_n , o expoente de Eaton, o *Trend* de Eaton respectivamente; mantendo constantes os outros parâmetros. Assim mesmo a figura 3d representa a calibração dos resultados através de um *Trend* quebrado em três partes, simulando uma forma curva na escala semilogarítmica. Pode-se concluir que o modelo de Eaton apresenta uma maior sensibilidade às variações do expoente e principalmente à localização e forma do *Trend*.

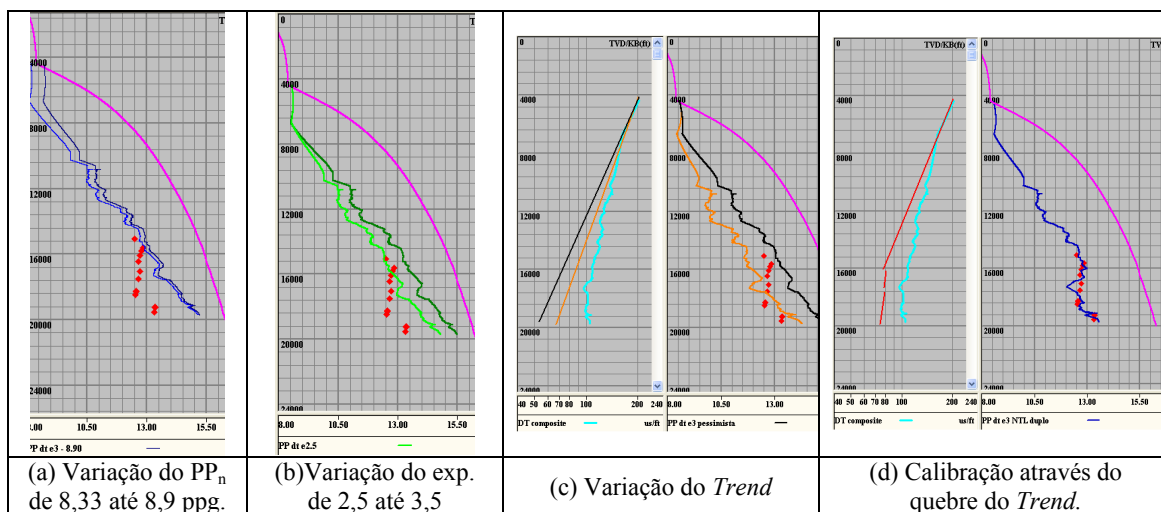


Figura 3. Efeitos da variação dos parâmetros usados na previsão da pressão de poros (ppg) usando o modelo de Eaton. Os pontos em cor vermelha representam as medições MDT de pressão de poros in situ.

Análise de sensibilidade do modelo de Bowers

Analogamente se trabalhou com o modelo de Bowers, especificando variações de $\pm 6\%$ nos parâmetros A , B , e PP_n mostrando-se os resultados nas figuras 4a, 4b e 4c respectivamente. Para analisar a sensibilidade do modelo ao parâmetro U , se assumiu que existe descarga de tensões a partir da profundidade de 17260 pés, variando o valor de U desde 1 até 8; mostrando-se os resultados na figura 4d, onde se observa que para $U=1$ (sem descarga de tensões) batem 4 medições MDT, e para $U=3$ (com descarga) batem outras 3 medições MDT. Conclui-se que o parâmetro A tem maior influência na parte mais profunda do poço, enquanto que o modelo é altamente sensível ao parâmetro B em toda a profundidade do poço. O parâmetro U faz incrementar os resultados do gradiente de pressão de poros nos intervalos indicados.

Análise probabilística usando a técnica de Monte Carlo no modelo de Eaton

Resultado da incerteza dos parâmetros e da sensibilidade de seus respectivo modelos, se aplica um exemplo de análise probabilística 1D com o objetivo de apresentar os resultados dentro de intervalos de confiança. Utilizou-se o modelo de Eaton e os registros (incluindo-se os respectivos pesos da lama) de 5 poços localizados numa mesma bacia sedimentar internacional; selecionando um deles como o poço projeto, o qual permitirá avaliar os resultados tanto da análise probabilística, como da análise 3D com o modelo de Eaton (descrito na frente). Para definir os intervalos de confiança se utilizam os seguintes modelos:

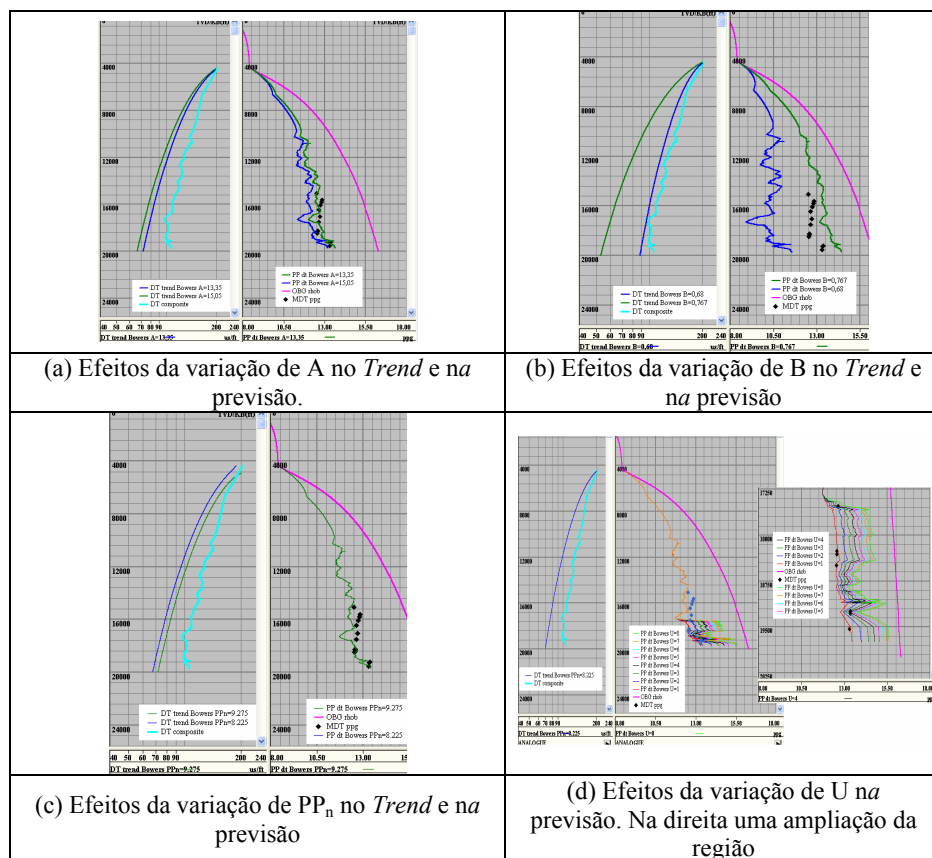


Figura 4. Efeitos da variação dos parâmetros usados na previsão da pressão de poros (ppg) usando o modelo de Bowers. Os pontos em cor preto representam as medições MDT de pressão de poros in situ

- P10: $P(PP_i < 10\%)$. Existe um 90% de probabilidade que o gradiente de pressão de poros seja maior que PP_i .
- P50: $P(PP_i < 50\%)$. Existe um 50% de probabilidade 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 um 10% de probabilidade que o gradiente de pressão de poros seja maior que PP_i .

Para avaliar as faixas de incerteza de cada parâmetro nos resultados, se aplicou a técnica de Monte Carlo como simulador. Depois das análises determinísticas feitos em cada poço de correlação, se consideram as seguintes hipóteses: (a) registro sônico do poço projeto, é obtido a partir da interpolação espacial ponderada dos registros sônicos dos poços de correlação; (b) sob o registro sônico obtido anteriormente, se traçou o *Trend* mais provável com variações de $\pm 5\%$, recomendando-se uma função de densidade (PDF) Triangular; (c) no caso do gradiente de sobrecarga se utilizaram os respectivos de dois poços de correlação que ficam mais próximos do poço projeto, dando um maior peso ao poço mais perto, a distribuição adotada também foi Triangular; (d) segundo os parâmetros usados na calibração do modelo em cada poço de correlação se considerou fixar os valores do expoente de Eaton e do gradiente de pressão de poros normal, por não apresentar maior variabilidade. Os resultados destas hipóteses e da simulação são mostrados na figura 5, concluindo que uma correta seleção dos parâmetros com incerteza e da seleção de uma distribuição PDF apropriada, podem gerar resultados satisfatórios; além que isto vai depender da geologia da região, dos dados disponíveis, e da experiência do analista de geopressões. É importante mencionar que no ano 2004, Malinverno e outros autores geram uma metodologia para reduzir incertezas através de medições feitas em tempo real e utilizando a inversão Bayesiana para a atualização de parâmetros.

Aplicação do Método de Eaton 3D

O procedimento mostrado aqui é realizado com fins qualitativos, tendo como resultado final um cubo de gradientes de pressão de poros obtido através do modelo de Eaton e utilizando o *Trend* de Bowers; onde se podem observar zonas de maior e menor risco de encontrar sobrepressão. Estes cubos são importantes porque podem interagir com resultados de outras especialidades relacionadas à exploração de petróleo; permitindo em conjunto definir a localização e/ou direcionamento dos poços de perfuração com a menor probabilidade de

ocorrência de incidentes que retracem a construção do poço; como por exemplo: *kicks*, *blowouts*, aprisionamentos da coluna, perdas de fluido, entre outros fenômenos.

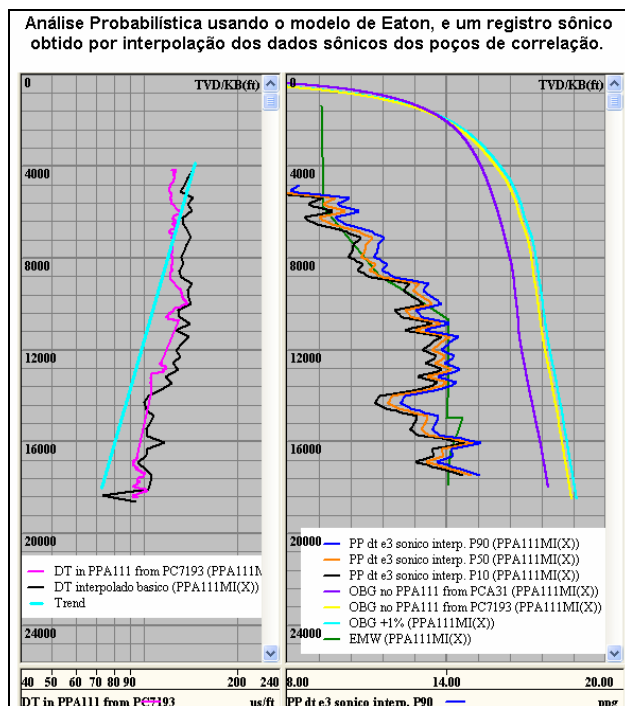


Figura 5. Resultados de uma análise probabilística de pressão de poros para um poço projeto, usando um registro sônico obtido por interpolação espacial.

Os cubos de dados foram obtidos por interpolação espacial ponderada dos registros dos poços de correlação. No *software* Drillworks 3D da Knowledge Systems, esta técnica é controlada por 3 parâmetros: o valor dos pesos (de ponderação, w_i), o método de seleção dos dados, e o tamanho da célula que resulta da definição da malha. As formulações e a descrição desta técnica podem ser revisadas em Laredo e Fontoura (2007) ou na maioria de livros relacionados à geoestatística. Para a aplicação 3D com o modelo de Eaton, se utilizaram os mesmos dados da bacia sedimentar usada na análise probabilística anterior. Além, se usou o pacote computacional Drillworks 3D considerando: uma densidade de malha de 50, o método do Quadrante para selecionar dados, o “inverso da distancia” como técnica de ponderação com um expoente de 2. Os resultados da interpolação para dados sônicos e de densidade são mostrados nas figuras 6a e 6b respectivamente. Com o cubo de densidades e a integração por camadas se obtém o cubo do gradiente de sobrecarga, mostrado na figura 6c. Para a estimação do *Trend* se precisou dos valores médios dos parâmetros A, B e Δt_0 (tempo intervalar no *mudline*) utilizados nas análises determinísticos de cada poço de correlação, obtendo os valores médios de 11,95; 0,746; e 215 us/ft respectivamente. O cubo gerado de tempos sônicos em condições normalmente compactadas se mostra na figura 6d. Os valores médios do expoente de Eaton e do PP_n na bacia foram 3,125 e 8,75 ppg respectivamente. Os resultados da aplicação de Eaton 3D são mostrados na figura 6e. Para avaliar os resultados, se geraram registros 1D a partir do cubo de gradientes de pressão de poros estimado, nas localizações respectivas de cada um dos poços analisados. Estes registros foram comparados com os pesos de lama utilizados em cada poço, incluindo o poço projeto. Os resultado desta avaliação são mostrados na figura 7.

4. CONCLUSÕES

A técnica de Chopra e Huffman (2006) é a mais eficiente para identificar zonas com descarga de tensões, devido que não precisa de uma região normalmente compactada para sua aplicação.

A definição do *Trend* de Eaton é o ponto fraco do método embora, sua aplicação e calibração são rápidas e efetivas dependendo da disponibilidade de uma região normalmente compactada; não entanto que para calibrar o modelo pode perder-se o sentido físico da compactação dos sedimentos.

O método de Bowers utiliza mais um parâmetro que Eaton embora, Bowers permite definir o *Trend* analiticamente tanto em aplicações 1D e 3D. Além, na análise de sensibilidade se observou que o parâmetro A de Bowers pode ser usado para calibrar o gradiente de pressão de poros na parte inferior do poço, entanto que o modelo é altamente sensível à variabilidade de B em toda a profundidade do poço.

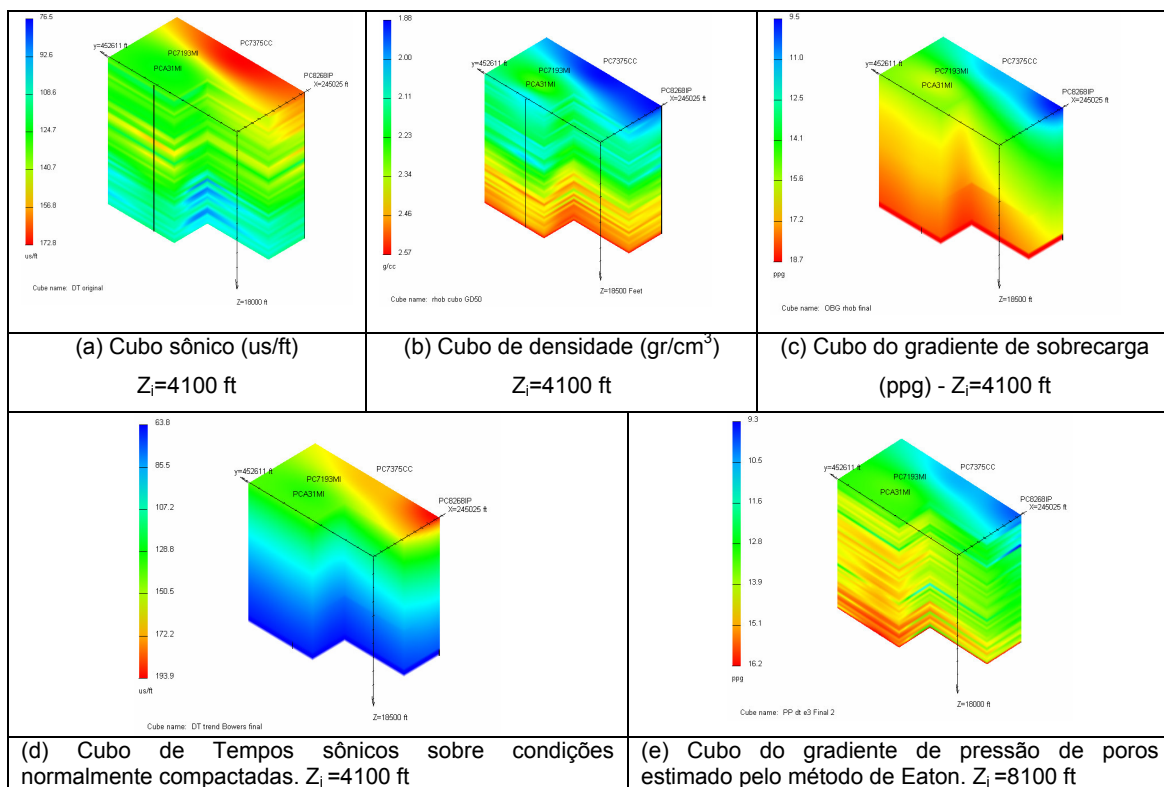


Figura 6. Aplicações 3D de interpolação espacial (casos a, b, e c), e previsão de pressão de poros 3D usando o *Trend* de Bowers e o modelo de Eaton.

Uma correta seleção dos parâmetros que apresentam incerteza, e a seleção de uma distribuição de probabilidade apropriada, podem gerar resultados satisfatórios numa análise probabilística de previsão da pressão de poros, não entanto isto vai depender da geologia da região, dados disponíveis, e da experiência do analista de geopressão.

Uma análise 3D de previsão de pressão de poros, usando cubos de dados gerados por interpolação espacial a partir de registros de poços, pode ser usada com fins qualitativos embora, ressalta-se a importância dos cubos de dados de origem sísmica, devido que eles abrangem maior informação e melhoram a resolução dos resultados.

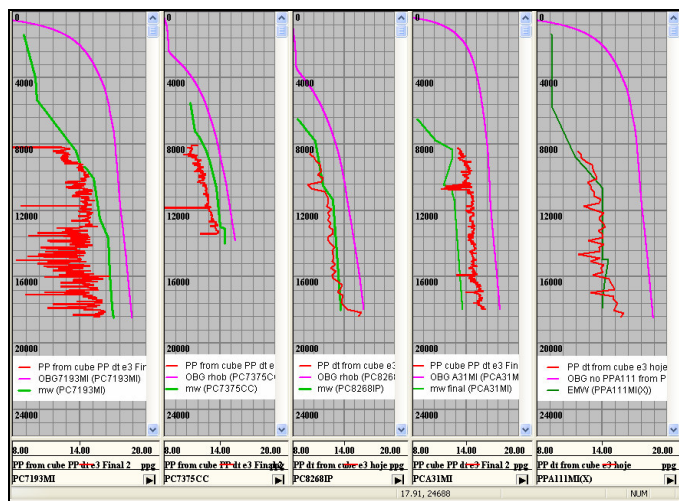


Figura 7. Comparação entre o peso da lama utilizado em cada poço (cor verde) e os gradientes de pressão de poros obtidos a partir de uma análise 3D de pressão de poros usando o modelo de Eaton o *Trend* de Bowers (cor vermelho).

5. AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo apoio econômico. Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio e ao Grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleo (GTEP) pela infra-estrutura, material e equipe acadêmica.

6. REFERÊNCIAS

- BOWERS G. Pore Pressure Estimation From Velocity Data: Accounting for Overpressure Mechanisms Besides Undercompaction. SPE Paper 27488. 1995.
- BOWERS G. Detecting high overpressure. The Leading Edge. February 2002, p.174-177. 2002.
- BRIDGES J. Summary of Results from a Joint Industry Study to Develop an Improved Methodology for Prediction of Geopressure for Drilling in Deep Water. SPE/IADC Paper 79845. 2003.
- CHOPRA S.; HUFFMAN A. Velocity determination for pore pressure prediction. CSEG Recorder April 2006.
- DUTTA N.C. Geopressure prediction using seismic data: Current status and the road ahead. Geophysics. Vol. 67. No 6. P 2012-2041. 2002
- EATON B. The Equation for Geopressure Prediction from Well Logs. SPE Journal 5544. 1975.
- KNOWLEDGE SYSTEMS. Best Practice Procedures for Predicting Pre-Drill Geopressures for Wells in the Deep Water Gulf of Mexico. DEA Project 119. © Knowledge Systems. 2001
- LAREDO J.; FONTOURA A. B. Investigação sobre os Métodos de Previsão de Pressão de Poros em Folhelhos e uma Aplicação de uma Abordagem Probabilística. Tese de Mestrado. PUC-Rio. Fevereiro 2007.
- MATTHEWS M.; STANDIFIRD W. Sand Effects Correction Provides Better Geopressure Prediction. Drilling. September 2003.
- MATTHEWS M. Uncertainty – Shale Pore Pressure from Borehole Resistivity. ARMA/NARMS 04-551. 2004.
- MUKERJI T.; DUTTA N.; PRASAD M.; DVORKIN J. Seismic Detection and Estimation of Overpressures. Part I: the Rock Physics Basis. CSEG Recorder September, 2002.
- SAYERS C.; JOHNSON G.; DENYER G. Predrill pore-pressure prediction using seismic data. Geophysics, Vol. 67, No. 4, P. 1286-1292. 2002a.
- SAYERS C.; WOODWARD M.; BARTMAN R. Seismic pore-pressure prediction using reflection tomography and 4-C seismic data. The Leading Edge, February 2002b.
- TRAUGOTT M.; Heppard P. Prediction of Pore Pressure Before and After Drilling Taking the Risk out of Drilling Overpressured Prospects. AAPG Hedberg Research Conference. Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments, Golden Colorado, June 8-10, 1994.
- YASSIR N.; Bell J. Abnormally High Fluid Pressures and Associated Porosities and Stress Regimes in Sedimentary Basins. SPE Formation Evaluation, March 1996.
- YOSHIDA C.; IKEDA S.; EATON B. Na Investigate Study of Recent Technologies Used for Prediction, Detection, and Evaluation of Abnormal Formation Pressure and Fracture Pressure in North and South America. IADC/SPE. Paper 36381. 1996.

ADVANCES IN SHALE PORE PRESSURE PEDICTION

In the last 45 years were published many articles referring to shale pore pressure prediction, due to the necessity of optimizing the constructive process of petroleum wells. As result of the bibliographical revision, we obtained a historical of the pore pressure prediction, furthermore gathering the principal mechanisms of generation of pore pressures and mechanisms of lateral variation of the same. Also, were described 12 methods of pore pressure prediction, the Centroid concept, 3 techniques to detect unloading of effective tensions in a rock formation, and a description of the use of the seismic in the pore pressure prediction. The Eaton (1975) and the Bowers (1995) methods were applied with the objective to discuss the uncertainties in the parameters of each model, this was complemented with sensibility analysis. As result of the existent uncertainties, we applied a probabilistic analyze, based on the Monte Carlo simulation and using the Eaton's method, with the aim to present results within confidence intervals and to allow contingency plans during the well construction project. Finally, the results of a 3D pore pressure prediction using the Eaton model and the Bowers Trend, were assessed. The data cubes were obtained by weighted space interpolation using well logs at the same basin. We concluded that the results from this type of analysis can be used such as qualitative purposes, obtaining pore pressure gradients cubes, where can be observed bigger and lesser risk zones.

Prediction, pressure, uncertainty, undercompaction, fluids expansion, Eaton, Bowers.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.