

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. Dentro das estimativas do gradiente de pressão de poros estão envolvidas: (a) a pressão de poros em folhelhos relacionados à estabilidade do poço, (b) estimativas em arenitos relacionadas a influxos (*kicks* e *blowouts*), (c) estimativas do estado de tensões “in situ”, relacionado às perdas de fluido de perfuração. O presente trabalho está concentrado no primeiro ponto.

Segundo Matthews e Standifird (2003), existem três limitações básicas que afetam a habilidade para estimar sobrepressões em folhelhos: (a) a permeabilidade do folhelho é muito baixa para fazer medições diretas, por isso as medições são feitas em arenitos adjacentes, (b) a alta taxa de compactação de um folhelho e sua baixa permeabilidade, são condições favoráveis à formação de pressões de poros elevadas; sendo transmitidas para arenitos de alta permeabilidade, e (c) as estimativas físicas da pressão de poros são só apropriadas em unidades de baixa permeabilidade. O ponto (a) é o mais importante, devido que os métodos estão baseados na previsão de pressão em folhelhos através de modelos calibrados com medições feitas em arenitos; as quais dependendo das condições geotectônicas do meio podem divergir dos folhelhos. Em relação ao ponto (b), não se encontra maior dificuldade, devido que o assunto pode ser abrangido por algum método baseado no fenômeno da subcompactação.

As sobrepressões podem gerar problemas no processo construtivo de um poço. Esse fenômeno pode provocar influxos de fluidos (*kicks*) ou no pior dos casos influxos incontrolados de gases (*blowouts*) que podem resultar em atrasos na perfuração, além de sérios acidentes na superfície, sobretudo perdas humanas e econômicas. Ao mesmo tempo, as sobrepressões estão ligadas à

existência de hidrocarbonetos. Law e Spencer (1998) afirmam que o estudo de pressão anormal é um importante componente para a exploração de hidrocarbonetos.

Yassir e Bell (1996) asseguram que as geopressões exercem uma influência significativa na integridade selante do reservatório. Kan e Swan (2001), afirmam que a distribuição das geopressões (2D ou 3D) pode ser usada para que o analista possa obter informação sobre a litologia, a hidrogeologia dos sedimentos e as trajetórias de fluxo. Estas informações junto à identificação das falhas estruturais são de grande ajuda para os engenheiros de exploração de hidrocarbonetos no entendimento da migração dos mesmos.

No caso de um poço projeto, a previsão de pressão de poros pode ser feita através dos dados de perfilagem de poços de correlação próximos (no caso de existirem, claro). Esses dados, junto a uma imagem sísmica 2D ou 3D, permite reconhecer as litologias presentes no subsolo, além das possíveis falhas estruturais, compartimentos, entre outros detalhes de grande utilidade na previsão de pressão de poros. No caso de poços pioneiros, onde a informação disponível é só de origem sísmica, o trabalho da previsão é ainda mais interessante devido que se precisam de aplicações geofísicas para obter informação da porosidade do meio aonde se precise fazer a perfuração. Comumente são usados perfis de velocidades intervalares (V_i) obtidos por sísmica, para depois aplicar um método de previsão de pressão e poros. Na atualidade, existem uma ampla variedade de métodos ou modelos empíricos e mecânico – físicos, que relacionam parâmetros físicos (um deles a V_i) com as tensões efetivas, para logo utilizar o modelo de Terzaghi para estimar as pressões de poros. Na bibliografia referente à sísmica e à geopressão, aqui revisada, pode-se observar que existe uma ampla preocupação das companhias e dos pesquisadores para obter velocidades intervalares de maior confiabilidade; prestando maior atenção à sensibilidade dos modelos de previsão frente às variações do parâmetro velocidade, que ao modelo de previsão em si. Embora, fazer uma previsão de pressão de poros a partir de um cubo de velocidades intervalares perfeito, não garanta uma previsão de pressão de poros perfeita. O estado da arte de uma ótima previsão de pressão de poros está ligado à disponibilidade das propriedades físicas do meio e à criatividade para correlacionar-los com a pressão de poros; sem esquecer claro, da experiência do analista de geopressões.

Um problema local é a falta de uma referência atualizada que possa reunir o relacionado ao estado de arte na previsão das sobrepressões. Na atualidade,

existem alguns países que ainda usam só uma metodologia de previsão, ainda existindo modelos que podem ter melhores resultados. A idéia aqui é apresentar um panorama dos modelos existentes com suas vantagens e desvantagens, com seus pontos fortes e suas críticas, com seus acertos e não acertos; procurando explicar os motivos das diferenças entre o previsto e o real.

Resulta pouco confiável apresentar um resultado determinístico da pressão de poros devido à incerteza das constantes de um modelo de previsão e às incertezas existentes dos parâmetros físicos medidos no meio. Atualmente, existem pacotes computacionais que permitem apresentar os resultados da previsão da pressão de poros dentro de uma faixa de segurança, com o objetivo de melhorar os planos de contingência antes da perfuração; podendo-se reduzir as incertezas durante a perfuração através de técnicas de medição de parâmetros físicos em tempo real, como por exemplo: MWD (*measurements while drilling*) e LWD (*logging while drilling*). As análises probabilísticas com atualização de dados durante a perfuração, assim como as análises de parâmetros dependentes, ficam fora do escopo do presente trabalho; existindo algumas pesquisas que desenvolvem o assunto como, por exemplo: Malinverno et al. (2004), e Doyen et al. (2004). O problema que se resolve neste trabalho é esclarecer as incógnitas de como fazer uma análise probabilística com o objetivo de trabalhar com faixas de segurança, através do *software Predict*.

Existe uma total dispersão da informação relacionada à previsão de pressão de poros. Muitas das companhias operadoras ou de serviços trabalham com suas próprias metodologias e/ou fluxos de trabalho para a previsão de pressão de poros, o lado negativo disto é que muitas delas não são de conhecimento público. Está-se apresentando um grupo de fluxos de trabalho aplicados por um grupo de companhias de petróleo, entre elas a Petrobras, com o objetivo de mostrar alguns dos critérios seguidos na previsão da pressão de poros a nível internacional. É importante mencionar, que isto é só uma ferramenta a mais de trabalho, e que é o analista de geopressões quem deve pensar na melhor seqüência dos processos dependendo do caso em estudo; além de consultar as opiniões dos especialistas de maior experiência. Uma otimização dos resultados é manter uma comunicação técnica fluida entre geólogos, geofísicos, geomecânicos, engenheiros de perfuração, e claro com os analistas de geopressão.

1.1. Breve histórico sobre a previsão de pressões de poros

No princípio a pressão de poros era feita através de correlações empíricas entre dados de perfilagem e medições de pressão de poros. No ano 1965, Hottman e Johnson estimaram as pressões de poros em folhelhos a partir de interpretações dos registros de perfilagem acústica e de resistividade, em relação aos desvios da linha de tendência normal (*NTL, normal trend line*) de compactação. Variações a favor (em registros acústicos) e contra (resistividade) são associadas às pressões de poros anormais medidas em arenitos adjacentes, conhecidas também como sobrepressões ou pressão de poros anormais positivas. Com o tempo se geraram métodos de previsão baseados em que as sobrepressões foram geradas pelo fenômeno da subcompactação; como por exemplo: o método da Profundidade Equivalente de Foster e Whalen (1966), e Eaton (1972, 1975). No ano 1995, Bowers apresenta um novo método para a previsão de pressão de poros, baseado na teoria de compactação de mecânica de solos, e nos mecanismos da subcompactação e expansão de fluidos.

Paralelo aos modelos empíricos, se geravam os modelos mecânico - físicos. Esse 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 no ano 1948. Basicamente se utilizam três grupos de possíveis modelos: o primeiro grupo relaciona porosidade com tensões efetivas, o segundo grupo relaciona a propriedade petrofísica (resistividade, velocidade intervalar, etc.) com a porosidade, logo no terceiro se relaciona o primeiro com o segundo grupo, para finalmente aplicar o modelo de Terzaghi. Como resultado se obtém um amplo grupo de modelos para a previsão de pressão de poros (como o apresentado por Dutta, 2002); podendo-se escolher um modelo segundo as condições de contorno de cada modelo original.

O trabalho de Pennebaker (1968) foi o início do uso das velocidades intervalares obtidas da sísmica através do processamento proposto por Dix (1955), para a previsão da pressão de poros. Daí para frente, os pesquisadores apontaram por conseguir velocidades processadas de alta confiabilidade, que representem as velocidades da onda segundo a litologia do meio. Foi necessário o emprego de métodos mais rigorosos para o processamento dos sismogramas para obter as velocidades intervalares, como por exemplo: a inversão da amplitude de onda (AVO), e a inversão tomográfica. O importante é conhecer qual destes modelos e/ou métodos é o mais confiável, e quão sensível é a

pressão de poros às pequenas variações de velocidade intervalar. Alguns dos pesquisadores que desenvolveram seus modelos de previsão de pressão de poros com base nessas velocidades são: Kan e Herbert (2001, apud Kan et al. (2002)), Dutta (2002), Sayers et al. (2002a), Doyen et al. (2004), entre outros.

Posteriormente alguns destes modelos foram aplicados junto a análises probabilísticas baseadas nas incertezas dos parâmetros de medição e nas constantes de cada modelo. Nos últimos cinco anos, têm sido desenvolvidas pesquisas que relacionam a previsão de pressão de poros com análises probabilísticas, com o objetivo de apresentar os resultados dentro de uma faixa de segurança. Atualmente algumas técnicas permitem atualizar dados ou parâmetros, através de medições feitas durante a perfuração MWD, LWD, SWD (*Seismic While Drilling*), com a finalidade de reduzir as incertezas. Até hoje os pesquisadores continuam num esforço por melhorar os modelos de previsão de pressão de poros, modelos probabilísticos, e sobretudo a luta constante dos geofísicos por conseguir as velocidades intervalares mais próximas às velocidades das rochas ou das formações.

Existem também pesquisas interessadas em fazer a previsão de pressão de poros em rochas reservatório, como Carcione et al. (2002), Carcione et al. (2003), aonde se utilizam modelos mecânico – físicos utilizando correlações com outros parâmetros geofísicos.

Finalmente, tem-se pesquisas que na atualidade já se aplicam ou ainda estão sendo desenvolvidas, entre elas: obtenção das velocidades intervalares na frente da broca (*Vertical Seismic Profile – VSP*), técnicas para obter velocidades abaixo de sal e basaltos, melhor entendimentos sobre outros mecanismos de geração de sobrepressão, e melhores métodos para a modelagem de bacias para a previsão de pressão de poros.

1.2. Objetivos

Este trabalho possui os seguintes objetivos:

- Reunir os principais métodos de previsão de pressão de poros em folhelhos, apresentando suas vantagens e desvantagens. Assim mesmo, reunir os principais mecanismos de geração de sobrepressão, reunir técnicas para detectar pressões anormais, e mostrar os fluxos de trabalho utilizados para a previsão de pressão de poros desenvolvidos por companhias internacionais de petróleo.

- Fazer uma discussão sobre os parâmetros usados nos modelos Eaton (1975) e de Bowers (1995), em relação às incertezas existentes.
- Avaliar os resultados da comparação de 4 modelos de previsão de pressão de poros feitos num mesmo poço, localizado na bacia do Golfo de México (base de dados do pacote computacional Predict), e utilizando medições MDT para a calibração de cada modelo.
- Avaliar os resultados de uma análise probabilística utilizando a simulação de Monte Carlo e o modelo de Eaton (1975). Aplicação feita sobre uma bacia sedimentar internacional e usando o pacote computacional Predict.
- Avaliar os resultados da aplicação de modelo de Eaton em 3D; usando o *Trend* de Bowers e cubos de dados físicos obtidos por interpolação espacial ponderada a partir de registros de poços. Os resultados serão avaliados usando os registros de peso da lama utilizada no processo construtivo de 5 poços localizados numa mesma bacia sedimentar.
- Um objetivo complementar é mostrar o uso e a importância da sísmica na previsão da pressão de poros.

1.3. Importância

O conhecimento quantitativo das pressões de poros antes e depois da perfuração apresenta benefícios em duas etapas:

Perfuração

- Segurança do pessoal que trabalha em plataforma.
- Economia, redução dos gastos.
- Permite utilizar o peso ideal da lama ou fluido de perfuração, com dois objetivos: (a) evitar desmoronamentos, aprisionamento da coluna de perfuração; (b) evitar que o peso da lama fracture a formação rochosa, manifestando-se em perdas de circulação da lama.
- O conhecimento das pressões de poros junto às pressões de fraturamento permite otimizar o programa de revestimento do poço, incluído a profundidade das sapatas.
- Otimização das operações de construção do poço, baseadas nas estimativas de geopressões.

Exploração

- Permite avaliar a efetividade das formações selantes.
- Mapeamento das trajetórias de migração dos hidrocarbonetos.
- Identificação de compartimentos.

1.4. Contribuição

Uma das contribuições do presente trabalho é apresentar uma bibliografia cronológica dos avanços na previsão de pressão de poros em folhelhos, através de dados de perfilação ou de perfis obtidos por inversão sísmica. Algo importante para o entendimento das sobrepressões é conseguir entender os diferentes mecanismos de geração de pressão de poros, portanto se apresenta um esquema atualizado dos diversos mecanismos de geração, incluindo os mecanismos de variação lateral de pressão de poros. Desta forma é possível avaliar a importância do lugar onde são feitas as medições RFT, (*Repeat Formation Test*) entre outras, que mesmo sendo feitas sobre arenitos, podem ser correlacionados sobre formações de folhelhos. Este assunto está amplamente vinculado aos processos de calibração dos diferentes modelos de previsão, e ao efeito Centróide.

A revisão bibliográfica permite-nos apresentar, aplicar e discutir sobre a escolha de parâmetros nos modelos de Eaton e Bowers; definindo-se as incertezas existentes num processo de calibração dos gradientes de pressão de poros. Este assunto é complementado com uma análise de sensibilidade dos parâmetros correspondentes para cada modelo.

Foram analisados e comparados 4 modelos de previsão de pressão de poros, mostrando suas incertezas e as vantagens de uma análise probabilística. Desta forma, foi descrita e aplicada, a metodologia empregada pela *Knowledge Systems*, através de seu *software Predict v.11*, para fazer uma análise de incertezas através da técnica de Monte Carlo, mostrando como identificar os parâmetros com maior incerteza, e como selecionar uma função de distribuição de probabilidade (PDF) corretamente.

Finalmente, a aplicação de Eaton em 3D através de cubos obtidos por interpolação espacial ponderada, e o *Trend* de Bowers 3D, permite observar sua aplicabilidade como uma técnica para identificar zonas de maior e menor risco de sobrepressão.

1.5. Escopo da Pesquisa

Este trabalho divide-se em seis capítulos, no presente descreve-se o problema a solucionar, a importância de resolver o problema, e as contribuições obtidas como resultado da pesquisa.

O segundo capítulo corresponde à revisão bibliográfica, onde serão destacadas as maiores contribuições relacionadas ao assunto; onde pode-se observar os mecanismos de geração de pressão de poros, os modelos de previsão, o conceito do Centróide, técnicas para reconhecer a presença do mecanismo da expansão de fluidos, uma descrição do uso da sísmica na previsão da pressão de poros, e uma recompilação de fluxos de trabalho (*workflows*) usados em 4 companhias internacionais de petróleo.

Aplicações dos modelos de Eaton (1975), Bowers (1995), Kan e Swan (2001), e Doyen et al. (2004) são desenvolvidos no terceiro capítulo. Apresenta-se uma discussão sobre as incertezas dos parâmetros nos modelos de Eaton e de Bowers, assim como dos registros de medição (perfilagem). Além disso, são mostrados os resultados de uma análise de sensibilidade dos modelos de Eaton e Bowers para mostrar os efeitos das variações de seus parâmetros e suas influências nos resultados da previsão.

No capítulo 4 se realiza uma análise probabilística ao longo de um poço projeto com o objetivo de apresentar os resultados da previsão de pressão de poros, dentro de intervalos de confiança e atingir planos de contingência antes da perfuração do poço. O modelo de previsão de Eaton (1975) foi usado junto à simulação de Monte Carlo; a qual foi descrita junto às incertezas das medições de perfilagem, base de dados empregada, e às hipóteses assumidas. Como ferramenta de cálculo se usou o módulo de incertezas do pacote computacional Drillworks Predict.

No capítulo 5 desenvolve-se uma aplicação tridimensional de previsão de pressão de poros através do modelo de Eaton e o *Trend* de Bowers. Aqui se descreve e se aplicam técnicas de interpolação espacial ponderada partindo de registros de poços; com o objetivo de obter cubos de parâmetros físicos e poder utilizar-los num modelo de previsão. Esta aplicação obteve resultados satisfatórios, a partir de um ponto de vista qualitativo, identificando zonas de maior e menor risco de encontrar sobrepressões.

Finalmente, o capítulo seis resume as principais conclusões do trabalho, além de algumas sugestões para futuras pesquisas. O trabalho é complementado com a bibliografia utilizada no desenvolvimento da tese. Existem muitas pesquisas que não foram possíveis revisar pelo tempo disponível, embora se espera haver atingido com os objetivos, apresentando um documento que sirva de referência tanto para estudantes como para profissionais.