

1

Introdução

A previsão da distribuição de pressão de poros na formação é de extrema importância para a indústria do petróleo, tanto para a perfuração de poços quanto para o planejamento de recuperação de reservas de óleo e gás. No caso da perfuração, pressões de poros elevadas não previstas em sedimentos permeáveis implicam em influxos do fluido da formação (*Kicks*). Em casos extremos, o influxo de gases inflamáveis torna-se incontrolável, acarretando em sérios acidentes na superfície (*Blowout*). No caso do planejamento de recuperação de reservas, pode-se citar pelo menos duas aplicações diretas das informações sobre a distribuição de pressão de poros na formação. Em primeiro lugar, a pressão de poros é determinante no projeto de recuperação primária, pois reflete a capacidade de produção inicial do reservatório. Em segundo lugar, destaca-se o papel crucial que essas informações apresentam na identificação da compartimentação de reservatórios, o que interfere em todo o planejamento de recuperação de reservas.

1.1.

Histórico sobre a estimativa de pressão de poros

Devido à importância da distribuição de pressão de poros na formação, muito vem sendo pesquisado sobre o uso da sísmica para realizar previsões de pressões de poros. Em trabalho pioneiro, Pennebaker (1968) sugere a expansão do uso das relações empíricas de Hottman e Johnson (1965) para a previsão de pressões de poros através da sísmica. Originalmente, as relações de Hottman e Johnson correlacionam pressões de poros medidas *in situ* com desvios da tendência (*trend*) normal de compactação¹ de folhelhos observados em perfis sônicos. Desta forma,

¹ Por tendência (*trend*) normal de compactação, entende-se a tendência de variação que uma certa propriedade apresenta ao longo da profundidade, caso existam condições normais de compactação. Neste trabalho, este termo se refere à tendência em que as velocidades compressoriais de folhelhos (ou tempos de transito intervalares) descrevem ao longo da profundidade.

velocidades anormalmente baixas (desvios da tendência normal) são associadas a altas pressões de poros. No método de Pennebaker, ao invés de se utilizar as velocidades sônicas, utiliza-se o perfil de velocidades compressoriais intervalares obtidas pela formulação de Dix (1955).

A partir desse ponto, a evolução da previsão de pressão de poros através da sísmica baseou-se no desenvolvimento independente de melhores relações entre velocidades compressoriais e pressões de poros em folhelhos (Eaton, 1976; Bowers, 1995; Dutta 2002a; Khazanehdari et al., 2005) e em melhores métodos sísmicos de análise de velocidades (Sayers et al., 2002a; Sayers et al., 2002b; Dutta 2002b; Kan e Swan, 2001). Muitos trabalhos intitulados como previsão de pressão de poros através de sísmica se ocupam na verdade em como obter velocidades intervalares adequadas para a transformação em pressão de poros, o que não deixa de ser essencial para o desenvolvimento de métodos mais eficazes de previsão.

A partir do início dos anos 2000, alguns trabalhos vêm se ocupando da previsão de pressão de poros em rochas-reservatório através de atributos sísmicos, tema que de certa forma se confunde com a caracterização geofísica de reservatórios. Nesta abordagem, a física de rochas é utilizada na tentativa de estabelecer relações entre atributos sísmicos e parâmetros da formação, como por exemplo, o campo de pressão de poros. Neste assunto, pode-se dizer que existe um número considerável de trabalhos experimentais em física de rochas que estudam a relação entre atributos sísmicos e pressão de poros (Mukerji et al. 2002). Apesar disso, o número de metodologias propostas para previsão de pressão de poros é ainda pequeno.

Sayers et al. (2003) propõem a utilização da expressão de Bowers (1995), originalmente desenvolvida para previsão de pressões de poros em folhelhos, para a previsão de pressões de poros em arenitos. Doyen et al. (2004) apresentam uma metodologia probabilística de previsão de pressão de poros em arenitos que possibilita a integração da expressão de Bowers (1995) com estimativas geoestatísticas de porosidade, conteúdo de argila e sobrecarga ao longo do reservatório. Nesses trabalhos, utiliza-se exclusivamente o atributo velocidade compressional (V_p) para a realização da previsão de pressão de poros. Dvorkin et al. (2002) propõem a utilização do atributo coeficiente de Poisson, ou alternativamente a relação V_p/V_s , para qualitativamente detectar pressões de poros anormais em rochas-reservatório. Embora apresente caráter qualitativo, este trabalho se apresenta

de forma importante, pois inaugura a consideração de outros atributos sísmicos na previsão de pressão de poros.

Por outro lado, a previsão de outras propriedades de reservatórios, como a porosidade, já utiliza outros atributos sísmicos para a previsão. Dolberg et al. (2000), Pendrel e Riel (1997) e Hegelsen et al. (2000) descrevem e debatem a utilização de impedâncias obtidas por inversão sísmica para estimativa de porosidades em reservatórios. Loures e Moraes (2001) apresentam uma metodologia de inferência bayesiana para estimar porosidades em reservatórios através dos atributos velocidade compressional (V_p), velocidade cisalhante (V_s) e densidade. Ushirobira (2004) adapta a metodologia apresentada por Loures e Moraes (2001) e utiliza impedâncias elásticas (I_p e I_s) obtidas por inversão sísmica para estimar porosidades no campo de Mulata (bacia de Campos). Buland e Landro (2001) utilizam também os atributos V_p , V_s e densidade, obtidos através de inversão de AVO, para estimar porosidades no campo de Valhall/Hod (Mar do Norte).

Sendo assim, um passo natural para a evolução dos métodos de previsão de pressões de poros se refere a incorporação de outros atributos sísmicos na previsão, além da tradicional velocidade compressional (V_p).

1.2.

Objetivos

O objetivo principal desta tese é desenvolver uma metodologia probabilística de previsão de pressão de poros em rochas-reservatório, através da qual seja possível considerar os atributos V_p e V_s de forma conjunta, reduzindo as incertezas associadas às previsões realizadas pelos métodos existentes, onde somente o atributo V_p é utilizado. Naturalmente, objetiva-se também analisar a contribuição que o atributo V_s pode fornecer à previsão de pressão de poros, considerando as incertezas associadas a este atributo e considerando também o estado de consolidação da rocha-reservatório.

1.3.

Resumo da metodologia

A metodologia apresentada nesta tese propõe encarar a transformação de V_p e V_s em pressão de poros como um problema de inversão. As velocidades são consideradas grandezas observáveis de um sistema físico, cujo comportamento depende de um determinado número de grandezas não observáveis (incógnitas do sistema), dentre as quais a pressão de poros é apenas uma dessas incógnitas. Um modelo de física de rochas, calibrável para a formação em estudo, representa a formulação do problema direto, onde as velocidades da rocha são escritas em função dos principais parâmetros de rocha, fluido e estado de tensões, que são as incógnitas do problema. Para inferir esses parâmetros, adota-se uma abordagem bayesiana de inversão. Através do uso de uma função de verossimilhança, utilizam-se V_p e V_s para transformar as informações *a priori* sobre as incógnitas do sistema em informações *a posteriori*, sendo que as informações *a posteriori* relativas à pressão de poros constituem a resposta da metodologia. Para realizar essa transformação, utiliza-se o algoritmo de Metropolis-Hastings (Tarantola, 2004), que se baseia em simulações de Monte Carlo para amostrar aleatoriamente a solução do problema inverso.

1.4.

Contribuições

A principal contribuição desta tese é o desenvolvimento de uma metodologia probabilística de previsão de pressão de poros em rochas-reservatório que permite a consideração conjunta dos atributos V_p e V_s obtidos por inversão sísmica, o que é algo inédito na literatura. A análise quantitativa da contribuição de V_s na previsão de pressão de poros, considerando o nível de incertezas associadas a este atributo e o estado de consolidação da rocha, é também algo inédito. A possibilidade de se considerar incertezas associadas ao fluido de saturação na previsão de pressão de poros constitui também uma contribuição inédita.

Observa-se também que o caráter probabilístico e geral da metodologia, no sentido de que todas as incertezas existentes são possíveis de serem consideradas, permite um debate sincero sobre a previsibilidade de pressões de poros em rochas-reservatório. Como será visto, a previsibilidade da pressão de poros, bem como a de outros parâmetros de reservatório, depende de uma combinação de fatores que englobam o estado de consolidação da rocha, o nível de informações *a priori* sobre os parâmetros da rocha-reservatório e o nível de incertezas associadas aos atributos sísmicos. Esse debate é bastante produtivo e é algo inédito na literatura referente à previsão de pressão de poros.

1.5.

Escopo da tese

O texto divide-se em introdução, revisão bibliográfica, desenvolvimento do modelo de física de rochas calibrável para a formação em estudo, desenvolvimento de modelos de física de rocha que simulam o comportamento de rochas consolidadas e não consolidadas, análises paramétricas dos modelos, descrição do algoritmo de inversão, descrição da metodologia proposta, exemplos sintéticos de aplicação e conclusões.

Neste capítulo, o assunto da tese foi introduzido. No capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre previsão de pressão de poros em rochas-reservatório, envolvendo os métodos existentes, os principais aspectos da física de rochas relacionada ao assunto e a definição do conceito “compartimento de pressão”, o que é essencial para a previsão de pressões de poros em rochas-reservatório.

No capítulo 3, desenvolve-se um modelo de física de rochas, calibrável para a formação em estudo, através do qual as velocidades da rocha são escritas em função dos principais parâmetros de rocha, fluido e estado de tensões, o que constitui a formulação do problema direto.

No capítulo 4, apresentam-se outros dois modelos de física de rochas, que simulam o comportamento de rochas consolidadas e não consolidadas.

No capítulo 5, apresentam-se análises paramétricas dos modelos propostos, considerando as duas situações de consolidação de rocha (não consolidada e consolidada).

No capítulo 6, descreve-se a metodologia de inferência bayesiana adotada para resolução do problema inverso.

No capítulo 7, a metodologia proposta para previsão de pressão de poros é apresentada, o que envolve a calibração do modelo de física de rochas, a aplicação da metodologia de inversão ao problema e um debate sobre a obtenção de informações *a priori* sobre os parâmetros de rocha, fluido e estado de tensões.

No capítulo 8, apresentam-se dois exemplos sintéticos de aplicação da metodologia. Através desses exemplos, analisa-se a contribuição de V_s na previsão de pressão de poros, considerando os casos de rochas consolidadas e não consolidadas.

No capítulo 9, apresentam-se as conclusões e as sugestões para futuros trabalhos.