

# 1 Introdução

## 1.1. Descrição do Problema

A interpretação sísmica *time-lapse* é o processo de vincular diferenças observadas entre levantamentos sísmicos repetidos com mudanças nas saturações do fluido, pressão e temperatura no reservatório. Vários desafios precisam ser vencidos nessa tarefa. Em princípio, entender de que maneira os atributos sísmicos são afetados por fatores como pressão, temperatura, saturação, tipo de fluido, porosidade e razão de achatamento, entre outros, se torna fundamental. Pesquisas focadas ao esclarecimento da sensibilidade da resposta sísmica a cada um destes parâmetros mostram que a saturação é um dos fatores mais importantes, especialmente em arenitos, pois influencia o módulo elástico da rocha e sua resposta sísmica e também gera uma dependência da velocidade com relação à frequência utilizada. Além disso, existe uma sensibilidade das ondas sísmicas com relação à distribuição espacial da saturação. A transição de fluido efetivo (distribuição homogênea e menores velocidades) para fluido com distribuição heterogênea (e maiores velocidades) pode introduzir incertezas na interpretação dos atributos sísmicos para detecção de hidrocarbonetos.

A modelagem dos efeitos da composição mineral, da porosidade e do fluido na velocidade sísmica pode ser feita através de uma combinação de relações empíricas e formulações teóricas. Dessa maneira, a física de rochas tem um papel essencial na modelagem sísmica, pois estabelece a conexão entre as propriedades da rocha e do fluido do reservatório com os dados sísmicos. Em 1951, Gassmann deduziu equações que relacionam velocidades da onda elástica num meio poroso saturado com as propriedades da rocha porosa e do fluido, onde a frequência não interfere na velocidade de propagação da onda. No entanto, a amplitude da onda sofre uma redução quando atravessa a rocha e sua velocidade varia segundo a frequência de propagação. Essa dependência entre as velocidades sísmicas e a frequência de propagação da onda é conhecida como dispersão. A dispersão pode

ser favorecida pelos deslocamentos da fase sólida com relação à fase fluida, que constituem os mecanismos conhecidos como fluxo de Biot (1956a, 1956b) e de fluxo local (Mavko & Nur, 1979). Apesar da ocorrência desse fenômeno, a equação de Gassmann é aplicada amplamente na técnica de substituição de fluidos, o que poderia estar conduzindo a resultados desvinculados da realidade.

Outro elemento importante é a simulação de fluxo de reservatórios. A simulação de fluxo pode trabalhar de maneira combinada com a interpretação sísmica para fazer interpretações mais realistas, pois a modelagem sísmica pode ser validada através da comparação com os conceitos da engenharia de reservatórios. No entanto, uma apropriada conexão entre mudanças sísmicas e mudanças de fluido e pressão sempre requer a estimativa destas últimas numa escala pequena o suficiente para permitir capturar os detalhes da heterogeneidade do reservatório e a distribuição espacial da saturação. Isso infelizmente não é possível, visto que, entre outros motivos, a simulação de um modelo nessa escala de resolução é proibida pelos enormes custos computacionais. Por isso, existe a necessidade de contar com estratégias consistentes de transferência de escala para garantir o uso das equações da física de rochas e da engenharia de reservatórios de forma integrada. Daí a motivação para desenvolver técnicas de transferência de escala para processar simulações mais realistas em tempo razoável.

## **1.2. Motivação**

A avaliação da dinâmica do reservatório através da interpretação sísmica no tempo tem adquirido uma importância relevante na indústria do petróleo (Albright *et al*, 1994; Lumley, 2001; Hirshe, 2006). A grande aceitação do emprego desta técnica é evidenciada pelo crescente número de publicações nas principais conferências e revistas científicas da área de geofísica que testemunham o sucesso da aplicação dessa tecnologia. Atualmente, a sísmica ao longo do tempo é utilizada com grande sucesso ao redor do mundo em campos de petróleo importantes, principalmente no Mar do Norte (Gullfaks, Gannet, Alba, Nelson).

No processo para conduzir pesquisas da sísmica para monitoramento de reservatórios o estudo de viabilidade para sísmica 4D é um passo essencial (Lumley *et al*, 1997). O alvo principal é estimar se é possível “imagear” os efeitos

da injeção e/ou produção esperados e definir o projeto *time-lapse* através do levantamento sísmico. Para isso, é necessário modelar e quantificar diferentes cenários de saturação, pressão e temperatura, o que é possível através da técnica de substituição de fluidos, que requer um modelo de física de rochas que represente as condições do cenário em estudo. Dessa maneira, resulta importante compreender até onde a equação de Gassmann pode ser livremente aplicada em cenários que favorecem a ocorrência de dispersão da velocidade devido ao mecanismo de fluxo de Biot e o mecanismo de fluxo local.

Para uma interpretação quantitativa da sísmica *time-lapse*, gerar modelos numa escala apropriada é um passo essencial na simulação de um cenário de produção, pois esta deve ser realizada para uma escala (pequena o suficiente) que permita manter a validade das equações da física de rochas. Além disso, a integração apropriada da simulação de fluxo e a modelagem sísmica é uma das questões fundamentais a resolver no estudo de viabilidade para monitoramento sísmico *time-lapse*. Devido ao enorme impacto da sísmica *time-lapse* no desenvolvimento de projetos para exploração de campos de hidrocarboneto, surgiu a motivação por implementar uma metodologia que tornasse possível a comparação entre modelos com e sem dispersão de forma quantitativa. Para conseguir esse propósito, dita metodologia deve envolver simulação de fluxo em reservatórios, transformações de física de rochas, transferência de escala e modelagem sísmica,

### **1.3. Objetivo**

Avaliar e comparar as respostas sísmicas obtidas através da implementação de duas teorias de substituição de fluidos. Este trabalho propõe esclarecer a importância de levar em conta a dispersão da velocidade pela influência do fluido no estudo de viabilidade *time-lapse* em rochas arenito. A análise será conduzida para descobrir qual o impacto, e os eventuais erros, de realizar a substituição de fluidos sem considerar o fluido como agente dispersor da velocidade.

De modo a cumprir esse objetivo serão feitas simulações de fluxo em escala pequena para diferentes cenários de injeção de gás. O *upscaling* dos dados obtidos para diferentes tempos será utilizado para conseguir uma integração apropriada

entre simulação de fluxo e modelagem sísmica. Posteriormente, serão obtidas as velocidades através da técnica de substituição de fluidos e construídos os sismogramas sintéticos correspondentes à modelagem sísmica de incidência normal. Para conseguir observar o deslocamento do fluido será calculada a diferença entre os sismogramas obtidos para os levantamentos monitores (500 dias e 1000 dias) e o sismograma obtido para o levantamento base, antes da produção ( $t = 0$ ). Essa metodologia toda será integrada através de um código criado no MATLAB®.

#### **1.4. Descrição**

O Capítulo 2 explora o papel da saturação e sua distribuição na velocidade da onda sísmica. Os fluidos afetam as propriedades acústicas, pois influenciam no módulo elástico da rocha e sua resposta sísmica, e por outro, lado introduzem dispersão da velocidade (variação da velocidade com a frequência de propagação da onda). São apresentados modelos de substituição considerando distribuição homogênea e heterogênea da saturação. Além disso, os fenômenos de fluxo provocados pela perturbação da onda, fluxo local e de Biot são introduzidos como elementos de dispersão, além da heterogeneidade na distribuição da saturação no meio.

Os fundamentos teóricos importantes para estudos de viabilidade para sísmica *time-lapse* relacionados com simulação de reservatórios e modelagem sísmica também estão contidos no Capítulo 2. É feita uma descrição de cada processo e sua importância na análise *time-lapse*. Além disso, a escala de simulação de fluxo e a importância da transferência de escala são definidas como elementos básicos para o objetivo deste trabalho.

No Capítulo 3 é explorado o comportamento da velocidade em função do tipo de fluido e sua distribuição para escalas menores que o comprimento de onda sísmico ou que a célula usada na simulação fluxo. Para isso, são utilizados os modelos de distribuição de fluido efetivo uniforme e heterogêneo apresentados no Capítulo 2. Os resultados obtidos mostram que, para o mesmo valor de saturação, distribuições heterogêneas de fluido multifásico apresentam maiores valores de velocidade compressional com relação a distribuições uniformes de fluido. A

análise é realizada para diferentes tipos de rocha e fluido com o intuito de avaliar a sensibilidade de cada modelo a parâmetros do reservatório tais como temperatura, pressão, porosidade e parâmetros elásticos da rocha. É discutida a relevância da consideração de cada modelo na modelagem da resposta sísmica para cenários de injeção de água e injeção de gás.

Os detalhes da simulação de fluxo na escala pequena são apresentados no Capítulo 4. O estudo de viabilidade apresentado dentro do contexto deste trabalho abrange a análise das mudanças da distribuição da saturação mediante o desenvolvimento de simulações de reservatórios em cenários de injeção de gás. São definidos os parâmetros da rocha e dos fluidos e os esquemas de injeção adotados. Também são mostrados os mapas de saturação e pressão para os diferentes cenários após 100, 500 e 1000 dias do início da injeção.

No Capítulo 5 é feita a integração da simulação de reservatórios com a sísmica *time-lapse*, através da física de rochas, da transferência de escala (*upscaling*) e da modelagem. São analisados resultados de velocidade obtidos segundo a teoria de Gassmann (1951) e também segundo o modelo proposto por Mavko & Jizba (1991). Mapas de velocidade compressional e impedância acústica para os diferentes cenários simulados segundo cada modelo de física de rochas são construídos para contribuir com as análises. As seções sísmicas num tempo qualquer são calculadas subtraindo a seção sísmica para o tempo inicial (antes de começar a produção), com o intuito de se conseguir detectar a dinâmica do fluido no reservatório.

No Capítulo 6, com base nos resultados obtidos, são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

Por fim, no Apêndice A são apresentadas algumas características dos programas utilizados (UT-Chem, Tesseral, Hydro\_Gen). No Apêndice B se encontram as rotinas desenvolvidas em MATLAB utilizadas no Capítulo 3 e no Apêndice C as implementações feitas para fazer a integração da simulação de fluxo com a modelagem sísmica segundo os fundamentos teóricos explicados no Capítulo 2.