

# 1 Introdução

## 1.1. Contexto

Nos últimos anos a simulação de reservatórios vem tendo um rápido crescimento, gerando um desenvolvimento nos programas dos computadores, com a finalidade de ajudar os engenheiros a entender os mecanismos envolvidos na produção de hidrocarbonetos.

Apesar desse continuo avanço, os simuladores convencionais ainda não conseguem gerar resultados do comportamento do reservatório, deixando de explicar alguns fenômenos decorrentes da produção, tais como: compactação, subsidência, instabilidade de poços, produção de areia, reativação de falhas, faturamento hidráulico, entre outros.

A maioria dos simuladores convencionais não consideram devidamente as variações de tensões e deformações das rochas causadas pelas mudanças de poro pressão dentro do reservatório durante sua produção/injeção.

O impacto físico para este tipo de aspecto geomecânico no comportamento do reservatório não é pequeno. Por exemplo, redução do espaço poroso pode causar colapso dos poros, ocasionando uma compactação abrupta do reservatório, que por sua vez provoca subsidência da superfície do fundo do mar (Tran, *et al.*, 2002)

Há muitos casos de impacto ambiental causado pelo efeito geomecânico resultante da produção ou injeção nos reservatórios. Exemplos bem conhecidos incluem a subsidência do fundo do mar no campo Ekofisk (Style, *et al.*, 1999) ou campo de Valhall no Mar do Norte (Patillo, *et al.*, 1998) onde a compactação representou aproximadamente 50% da energia total do reservatório, também o caso da subsidência sobre uma grande área no porto de Long Beach Harbor, California (Gilluli & Grant, 1949) ou nas regiões do litoral Bolívar e Lagunillas na Venezuela (Van der Knaap & Van der Vlis, 1967).

A importância da consideração do efeito geomecânico nas simulações de reservatórios foi relatada em vários trabalhos, como (Rhett & Teufel, 1992); (Ruisten, *et al.*, 1996); (Gutierrez & Lewis, 1998), que fornecem evidências de

que a compressibilidade e a permeabilidade do reservatório são fortemente dependentes da trajetória de tensões seguida pelo reservatório. (Osorio, *et al.*, 1999, 1998) estudaram o efeito das rochas adjacentes no reservatório em seu modelo fluxo/tensão. Nos reservatórios fraturados, Gutierrez & Makurat (1997) mostraram que a permeabilidade da fratura (dependente da variação da temperatura e da pressão do fluido) pode afetar o *water flood* decorrente dos mecanismos de injeção (Inoue & Fontoura, 2008).

Estas interações entre deformações em meios porosos e fluxo de fluidos vêm sendo estudada por numerosos pesquisadores ao longo dos anos, usando diferentes métodos de acoplamento para resolver o problema, com o intuito de considerar os efeitos geomecânicos na simulação de reservatórios.

Diferentes estudos mediante métodos de acoplamento são realizados por inúmeros pesquisadores para buscar a solução, sendo a de maior aproximação através de um único sistema de equações onde as variáveis de fluxo e de tensão são estudadas em conjunto, esta solução é conhecida como acoplamento total, o outro método é resolver de forma separada o conjunto de equações onde as informações são trocadas para garantir o acoplamento, este método é chamado de acoplamento parcial e dependendo dos parâmetros de troca e do tipo de esquema a ser empregado podem ser iterativo, em uma via ou pseudo acoplamento.

O grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleo (GTPE) vem realizando implementações através de esquemas de acoplamento que possibilitem o estudo dos fenômenos provocados pela interação pressão-tensão-porosidade apresentado nos trabalhos Fontoura & Inoue (2008, 2009), sendo esta dissertação orientada na avaliação dos mesmos.

## **1.2. Descrição do Trabalho**

A presente dissertação foi dividida nas seguintes etapas:

- Estudo do problema físico;
- Revisão Bibliográfica sobre o problema de acoplamento fluxo/tensão;
- Estudo dos parâmetros de troca envolvidos no acoplamento com os correspondentes simuladores utilizados na pesquisa;

- Estudo do método do acoplamento empregado na dissertação;
- Modelagem e validação das metodologias usadas através de exemplos;
- Modelagem do exemplo com uma nova discretização.

A seguir é apresentada uma descrição de cada uma das etapas realizadas.

No estudo do problema físico é importante considerar não só a rocha reservatório como também as rochas adjacentes a este e qual é o processo que é realizado num reservatório durante sua produção ou injeção.

Um reservatório encontra-se encaixado em rochas circundantes que cumprem funções segundo sua posição.

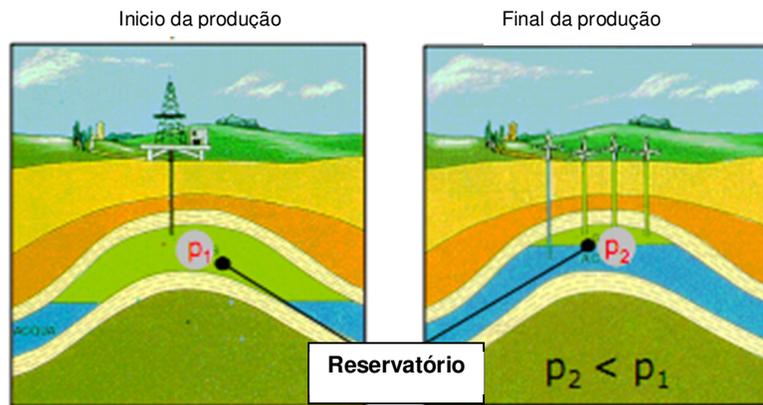
A rocha capeadora (*overburden*) que se encontra entre o leito e o reservatório servem para determinar o grau de transmissão de compactação do reservatório para a subsidência da superfície através da geometria, espessura e propriedades constitutivas (Samier & De Gennaro, 2007).

As rochas localizadas lateralmente ao reservatório (*sideburden*) influenciam a trajetória das tensões e na quantidade de compactação que ocorre no reservatório.

No caso de *sideburden* de alta resistência, uma parte da carga do *overburden* é transferida para o *sideburden*, gerando o efeito de arqueamento. Por conseguinte, a tensão vertical da camada de *overburden* não é inteiramente e nem uniformemente aplicada sobre o reservatório.

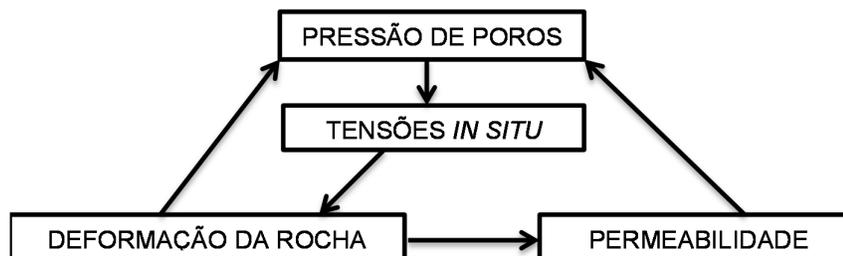
A rocha situada a baixo do reservatório (*underburden*) também tem grande influencia no processo de compactação e subsidência. Como o *sideburden* está diretamente mantido pelo *underburden*, um *underburden* rígido permite um maior arqueamento do que um *underburden* menos rígido (Samier & De Gennaro, 2007).

Quando um reservatório entra no processo de produção ocorrem variações no campo das pressões dentro do reservatório, que geram variações nas tensões. Estas variações afetam todas as rochas adjacentes envolvidas (*overburden*, *sideburden*, *underburden*), gerando variações nas deformações dentro do reservatório, o qual é representado pela porosidade ou volume poroso, conforme ao mostrado na Figura 1.



**Figura 1 - Modelo de um reservatório no início e final da produção (Capasso & Mantica, 2006).**

A Figura 2 ilustra os parâmetros principais envolvidos na interação da análise geomecânica e fluxo em meio poroso deformável, e como esses parâmetros teoricamente interagem entre si. A pressão do fluido é a principal quantidade necessária para prever o movimento do fluido e a produtividade de um reservatório. Este parâmetro é responsável, também, por parte do suporte das cargas transmitidas pelas rochas adjacentes ao reservatório. Uma mudança na pressão do fluido altera o estado de tensões efetivas, o que sugere duas formas de acoplamento do escoamento de fluido com a deformação da rocha: acoplamento tensão–permeabilidade, onde a deformação da rocha causa mudança da estrutura do poro, afetando a permeabilidade e o escoamento; e acoplamento deformação–poro pressão, em que a deformação da rocha afeta a poro pressão e vice-versa (Gutierrez & Lewis, 1998).



**Figura 2 - Esquema de interação entre geomecânica e fluxo num reservatório deformável (Gutierrez & Lewis, 1998).**

Na atualidade têm-se simuladores que resolvem separadamente o problema. Através de um simulador de fluxo são resolvidas as questões das variações da pressão de poro para cada fase e outro simulador resolve a parte geomecânica calculando os efeitos geomecânicos (variações do estado de tensão e deslocamento) no reservatório e rochas adjacentes ao longo da produção de petróleo. Os simuladores não interagem um com outro pelo qual a exatidão da solução computacional dista da realidade.

### **1.3. Objetivos da Dissertação**

O objetivo geral da dissertação será verificar os esquemas de acoplamento que foram desenvolvidos pelo GTEP nos trabalhos (Fontoura & Inoue, 2008, 2009), em relação aos critérios de precisão na solução, tolerância, tipo de acoplamento e tempo de processamento.

Os objetivos específicos serão:

1. Descrever os diferentes esquemas e suas variáveis envolvidas;
2. Comparar resultados das soluções em função da precisão e viabilidade;
3. Analisar qual esquema de acoplamento é melhor para resolver o problema;
4. Investigar possíveis melhoras nas respostas;

### **1.4. Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos adicionais, conforme descrito a seguir.

a) O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o problema de fluxo/tensão, além do estudo dos parâmetros de viabilidade em função dos tipos de acoplamento. Também inclui o histórico dos principais trabalhos que usam diversos tipos de acoplamento nas suas soluções;

b) O capítulo 3 apresenta o estudo dos simuladores empregados. STARS um software com módulo geomecânico, ABAQUS e ECLIPSE para o desenvolvimento do código de acoplamento, suas aplicações no esquema e as principais diferenças encontradas ao realizar troca de informações entre um

simulador de fluxo (ECLIPSE) que trabalha com MDF (método das diferenças finitas) e um simulador geomecânico (ABAQUS) com MEF (método de elementos finitos) em sua formulação. A filosofia empregada na tese será apresentada incluindo os fluxogramas dos tipos de acoplamento usados;

c) O capítulo 4 apresenta a modelagem e validação das metodologias empregadas (Inoue & Fontoura, 2008), através de um exemplo usado por outros autores. Além disso, resultados dos tempos de processamento e possíveis melhoras encontradas ao longo da dissertação são apresentados.

d) O capítulo 5 apresenta os resultados do mesmo exemplo do capítulo 4 com uma nova discretização e sua correspondente análise para cada tipo de acoplamento;

e) Finalmente o capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões encontradas ao longo da dissertação.