

1 Introdução

1.1. Motivação

O desenvolvimento e o emprego de técnicas de perfuração horizontal começaram nos Estados Unidos em meados dos anos 70. Atualmente, a perfuração de poços horizontais é o método mais utilizado na produção de óleo/ gás de reservatórios em que os estratos são horizontais, porque oferece maior área de contato com a camada produtiva do que poços verticais.

O custo de um poço horizontal é cerca de três vezes maior do que o custo de um poço vertical, entretanto a produção pode ser aumentada em até vinte vezes. De acordo com a *Journal of Petroleum Technology* (JPT, 1999), a perfuração de poços horizontais, representa aproximadamente 10 a 15% de toda a atividade da perfuração (Figura 1.1).

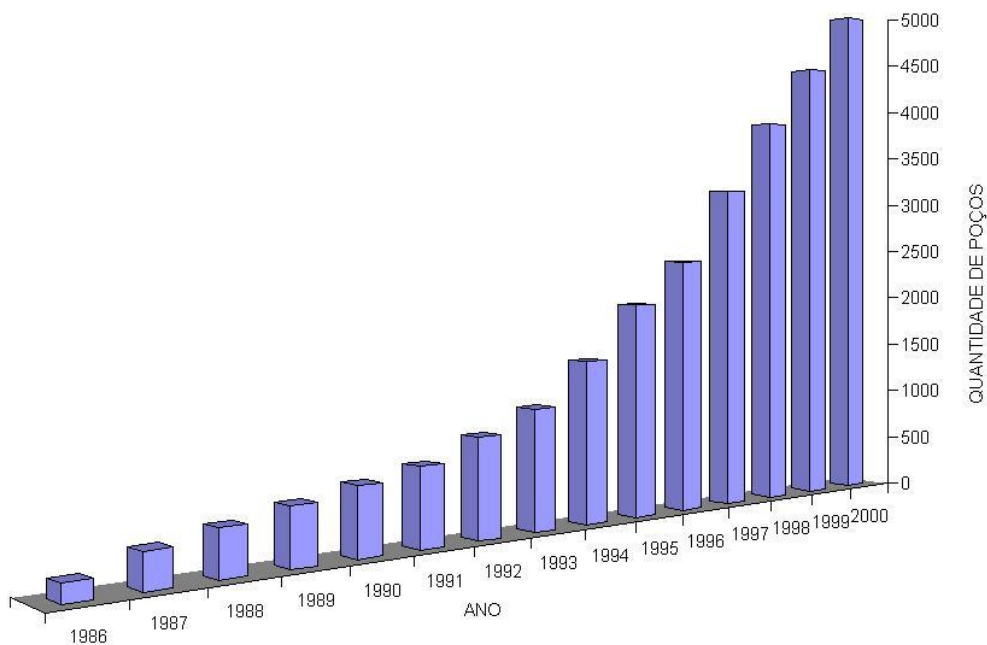


Figura 1.1 – Evolução da perfuração de poços horizontais (JPT, 1999)

O presente trabalho tem o objetivo de analisar o problema do deslocamento de um fluido por outro no interior de um espaço anular, através da simulação numérica do

escoamento em poços horizontais. Para estudar o processo de perfuração de poços horizontais, foram analisados os seguintes itens:

- Poços Horizontais;
- Etapas de Perfuração;
- Técnica de *Gravel-Packing*
- Processo de Deslocamento de Fluidos.

1.2. Poços Horizontais

1.2.1. Tipos de Poços Direcionais

Poços direcionais são perfurados por diversos propósitos, conforme descrito por Rocha et al. (2006):

- Aumentar o comprimento da seção exposta do reservatório perfurando inclinadamente;
- Perfurar em um reservatório onde é difícil ou impossível o acesso vertical;
- Perfurar em um reservatório abaixo de uma formação de difícil perfuração (domos salinos e falhas).
- Permitir o agrupamento de vários poços em um único local, de modo a minimizar os impactos ambientais, diminuindo a área de perturbação, facilitando a completação e produção de poços.
- Perfurar poços de alívio, para controlar um poço que está em *blow out*, diminuindo a pressão do poço.
- Desviar poços que tiveram um trecho de coluna perdido ou preso.
- Dificuldade para instalação da sonda diretamente sobre o alvo.
- O poço original foi abandonado e um desvio (*side track*) é realizado para atingir novo objetivo.
- Campanha exploratória complementar:
 - Poço direcional perfurado de uma plataforma já existente.
 - Poço direcional usado para delimitar a fronteira de um reservatório.

Estes propósitos podem ser observados na Figura 1.2.

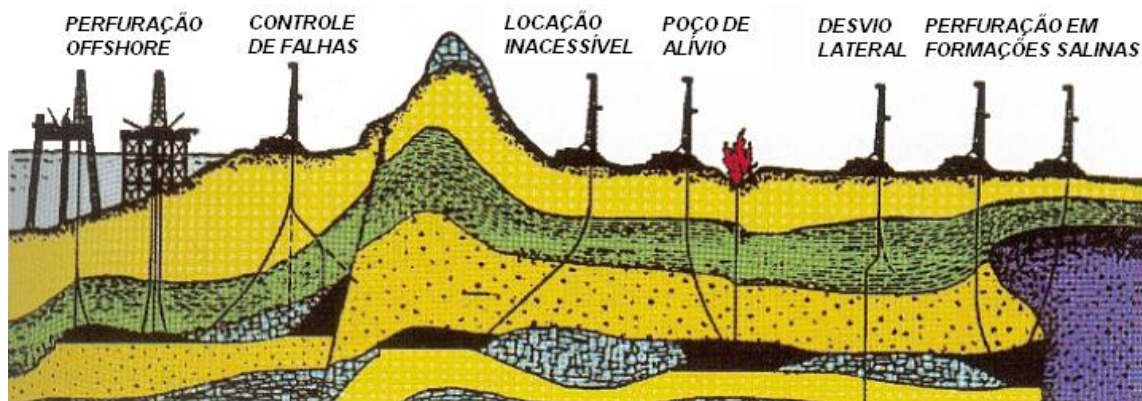


Figura 1.2 – Finalidades da perfuração direcional (Rocha et al, 2006)

1.2.2. Instrumentos de Orientação

Poços direcionais são perfurados a partir de estudos geofísicos, onde são determinadas as trajetórias de perfuração. Durante perfuração destes poços é realizada a aquisição de dados utilizando uma das ferramentas listadas abaixo:

- *Single shot* - Instrumento lançado dentro da coluna, que se aloja dentro do K-monel (comando não magnético), para registrar, numa única foto, a inclinação e direção do poço, através de uma bússola e um pêndulo. Após a foto, o instrumento é retirado a cabo.
- *Multishot* - Possui um filme fotográfico, permitindo tirar várias fotos durante a retirada da coluna.
- *Giroscópio* - A bússola é substituída por um giroscópio, que não sofre interferências magnéticas.
- *Steering Tool* - Um cabo elétrico transmite as informações desejadas durante a fase que um motor de fundo está sendo utilizado. Utiliza um *side entry sub* para proteção do cabo elétrico.
- *MWD (Measurement While Drilling)* - Envia as informações de inclinação e direção através de pulsos de pressão no fluido de perfuração.

1.2.3. Operação de Desvio

A partir destes dados é possível realizar uma perfuração mais eficiente, prontamente corrigindo a orientação do poço, caso não esteja conforme o planejado.

Para realizar a operação de desvio, podem ser utilizadas ferramentas tais como motores de fundo (*mud motors*) ou *rotary steerable systems*.

1.2.3.1. Motores de Fundo (*Mud Motors*)

Este tipo de equipamento começou a ser utilizado nos anos 70, representando um grande avanço na perfuração de poços direcionais. O motor é impulsionado pela força hidráulica da lama de perfuração, permitindo que a broca gire, enquanto a coluna de perfuração permanece estática. A mudança de direção da coluna é realizada utilizando um tubo dobrado (*bent housing*), que fica localizado entre a coluna de perfuração estacionária e o motor de fundo (Figura 1.3).

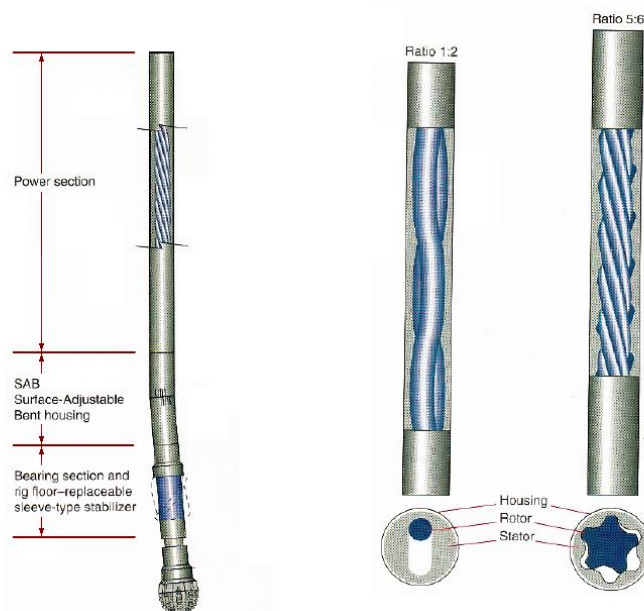


Figura 1.3 – Operações de desvio - *mud motor* (Schlumberger, 2004)

1.2.3.2. *Rotary Steerable Systems*

Moderna técnica de perfuração utilizada em substituição aos motores de fundo. Permite a alteração da trajetória do poço em perfuração sem necessidade de parar a rotação da coluna. Há basicamente dois métodos de atuação desses sistemas:

PUSH-THE-BIT - A alteração da trajetória é obtida através de uma força que a ferramenta exerce contra a parede do poço, proveniente da atuação de um pistão ou braço articulado (Figura 1.4). Exige a utilização de brocas com capacidade de corte

lateral. De uma maneira geral, a qualidade do poço perfurado não é muito diferente de um poço perfurado com motor de fundo.

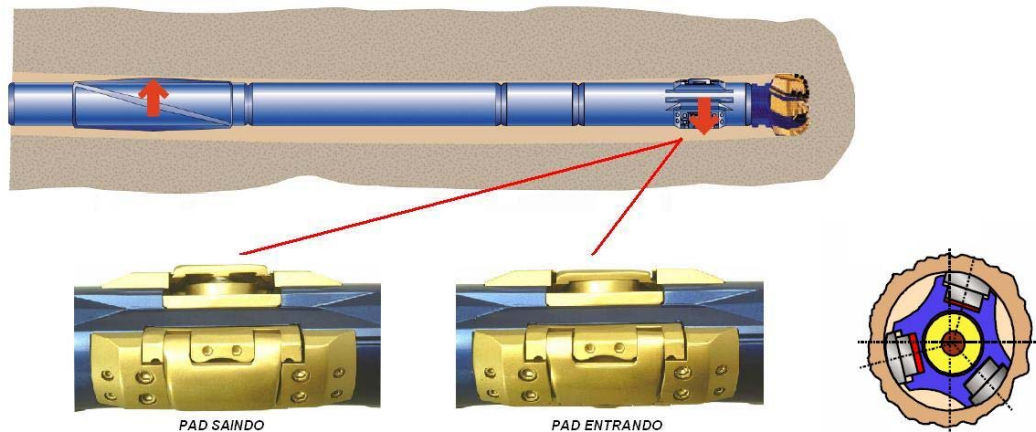


Figura 1.4 – Operações de desvio – *push-the-bit* (Baker Hughes, 2004)

POINT-THE-BIT - A broca é apontada na direção desejada. Gera-se uma flexão no eixo rotativo conectado à broca que permite desviar o poço de forma constante e uniforme, na intensidade desejada (Figura 1.5). Neste sistema a qualidade do poço perfurado é superior à gerada pelos outros sistemas.

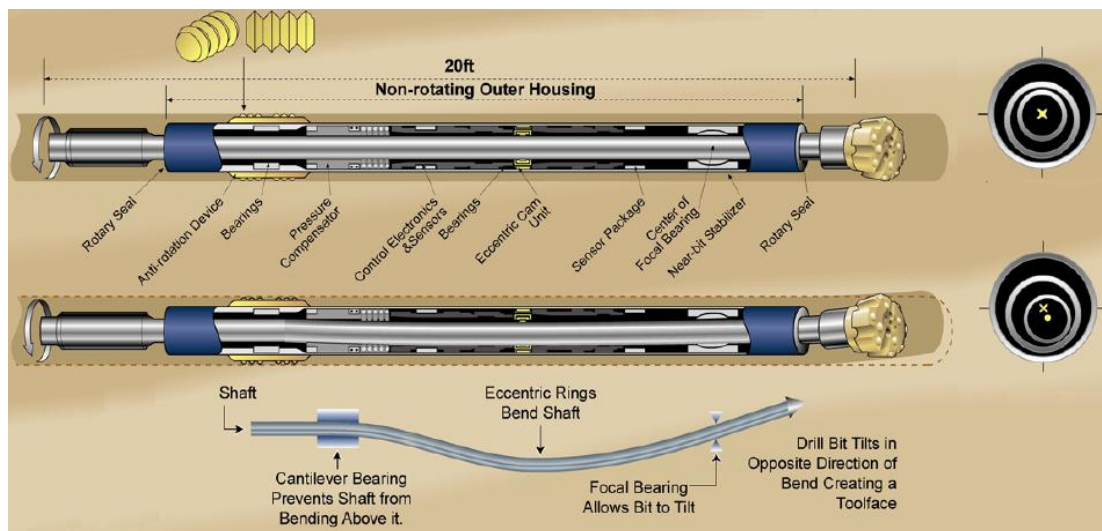


Figura 1.5 – Operações de desvio – *point-the-bit* (Halliburton, 2007)

As principais vantagens desta tecnologia são:

- Aumento do desempenho hidráulico e de retirada de cascalhos, devido à rotação contínua da broca;
- Redução da tortuosidade do poço, devido à estabilidade do sistema;
- Obtenção de uma geometria do poço mais constante;

- Minimização nas variações de diâmetro do poço durante a perfuração.

Atualmente há 7 fornecedores deste tipo de tecnologia no mercado:

- **Well-Guide RSS™** (Gyrodatta);
- **PowerDrive** (Schlumberger);
- **AutoTrak** (Baker Hughes);
- **Geo-Pilot/ EZ-Pilot** (Sperry Drilling Services/ Halliburton);
- **Pathmaker** (Pathfinder);
- **Revolution** (Weatherford);
- **DeviDrill™** (Devico AS).

1.3.

Etapas de Perfuração

A perfuração de poços é realizada através de uma sequência de etapas, denominada “fase”, que são repetidas até que seja atingido o ponto de interesse para produção de petróleo. Cada fase possui as seguintes etapas: perfuração, instalação da coluna de revestimento e cimentação primária.

1.3.1.

Perfuração

Perfuração é a etapa onde a broca perfura a formação rochosa, através da rotação da coluna de perfuração, gerando cascalhos. Durante esta etapa, o fluido (lama de perfuração) desloca-se por dentro da coluna de perfuração. A lama de perfuração tem as seguintes funções:

- Lubrificar/ resfriar a broca;
- Carrear o cascalho produzido até a superfície;
- Promover uma coluna hidrostática.

Logo, a densidade deste fluido deve estar dentro da seguinte “janela operacional”:

- Pressão de Poros (limite inferior): conhecida também como pressão de formação ou pressão estática. Pode ser definida como a pressão do fluido contido nos espaços da rocha.
- Pressão de Fratura e Colapso (limite superior): atuam nas falhas que ocorrem nas rochas. A pressão de fratura é a pressão que ocasiona a falha da rocha por tração. A pressão de colapso ocasiona a falha da rocha por cisalhamento (esforços de compressão).

Ou seja, a densidade da lama de perfuração deve ser cuidadosamente selecionada, de forma que a coluna hidrostática deste fluido promova uma pressão maior do que a pressão de poros (para evitar a produção do poço ainda durante a perfuração) e menor que a pressão de fratura/ colapso (para evitar a fratura da rocha, causando perda de circulação), conforme observado na Figura 1.6.

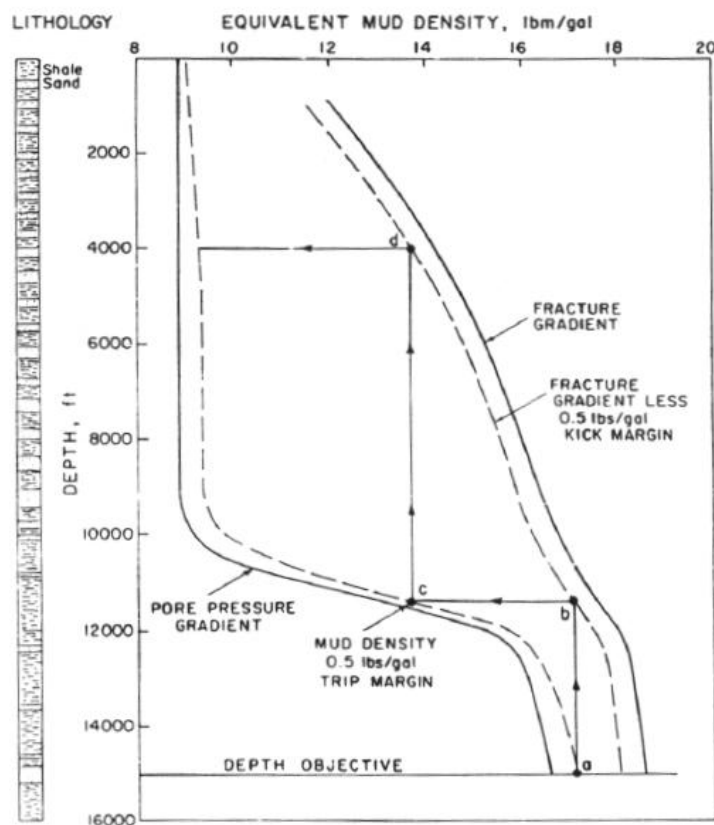


Figura 1.6 – Pressão de poço e de fratura de um poço (Bourgoyne, 1991)

Na Figura 1.6 pode ser observado o planejamento da perfuração de um poço. Utiliza-se uma determinada lama de perfuração entre os pontos “a” e “b”, com densidade igual a 2040 kg/m^3 (17 lbm/gal), e outra entre os pontos “c” e “d”, com densidade igual a 1670 kg/m^3 (14 lbm/gal).

1.3.2. Instalação da Coluna de Revestimento

Após a perfuração, a coluna de perfuração é removida do poço, deixando a lama de perfuração dentro da parede do poço. Um tubo de aço (revestimento ou *liner*) é introduzido na parede do poço, deixando uma pequena abertura entre a parte externa do tubo e o interior da parede do poço, isto é, o espaço anular. Desta forma, evita-se a

contaminação dos lençóis freáticos; permite adotar fluidos diferentes em cada fase; previne-se o desmoronamento das paredes e confina-se produção ao interior do poço.

Revestimento é uma tubulação que se estende desde a cabeça. *Liner* é um revestimento de que se estende apenas a partir do revestimento precedente.

Em determinados pontos, são introduzidos centralizadores à parte externa do tubo, para impedir que a pesada tubulação de aço desmorone para o lado mais baixo da parede do poço. Entretanto, é ainda muito comum que o anular seja excêntrico, especialmente em poços inclinados.

1.3.3. Cimentação Primária

Cimentação primária é a etapa onde um fluido (lama de perfuração) desloca outro fluido (cimento). No entanto, fluidos intermediários chamados colchões espaçadores e/ou lavadores fazem o papel de separar o fluido de perfuração do cimento.

Esta sequência de fluidos é bombeada, circulando pelo interior da tubulação até alcançar a parte inferior da coluna, retornando pelo anular.

Os colchões espaçadores têm como finalidade minimizar o contato entre a lama de perfuração e o cimento, enquanto os colchões lavadores limpam a região anular (preenchida com fluido de perfuração), preparando-a para a deposição do cimento.

O cimento tem a função de revestir a parede da formação, prover estabilidade mecânica (evitar o desmoronamento) e prevenir infiltração. Após a cura do cimento, a fase está isolada e uma nova sequência de perfuração pode ser executada, com uma broca com diâmetro menor. Desta forma, uma lama de perfuração com densidade maior pode ser utilizada na fase seguinte.

Frequentemente os poços terminam com um arranjo telescópico de revestimentos e *liners*. A tubulação de aço é uma parte significativa do custo material de uma operação de cimentação primária; portanto se utiliza *liners* nas seções inferiores do poço.

1.4. Técnica de *Gravel-Packing*

Cimentar e canhonear longos trechos horizontais podem ser operações críticas e de alto custo. Assim, a técnica usual de completação de poços horizontais no Brasil inclui a completação a poço aberto com bombeio de *gravel pack* como barreira adicional para contenção de areia.

A técnica de *Gravel-Packing* em poço aberto (OHGP – *Open Hole Gravel Packing*) consiste em posicionar um duto, com telas de metalurgia especial (Figura 1.7), na região produtora dos poços. Logo após, é realizado o deslocamento de uma mistura sólido-líquido (cascalho/ fluido de completação), de forma a preencher o espaço anular entre o tubo e a formação produtora. O preenchimento do espaço anular poço/ duto promove um filtro permeável, onde os diâmetros dos cascalhos são menores que o material particulado do reservatório.

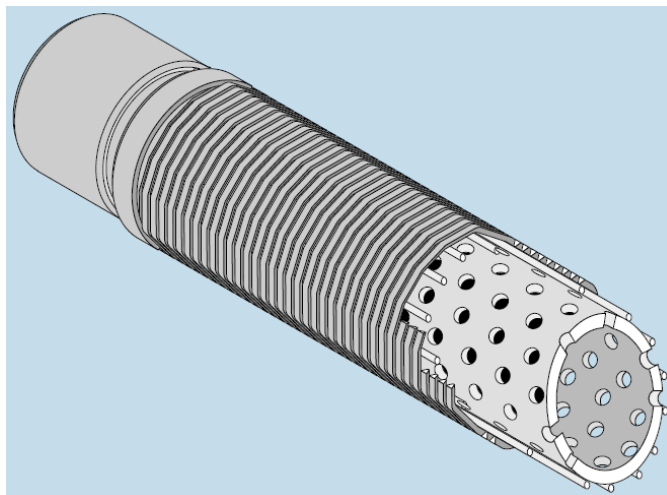


Figura 1.7 – Open Hole Gravel Packing (Halliburton, 2009)

Desta forma, evita-se a "produção de areia" proveniente da matriz rochosa inconsolidada (com baixo gradiente de fratura). O ingresso de material particulado na coluna de produção causa problemas de erosão/ deposição nas tubulações e equipamentos de superfície. Este problema leva a custos adicionais elevadíssimos, referentes às paradas de produção (necessárias para troca das tubulações erodidas) e demais serviços de manutenção/ reparo.

1.5. Processo de Deslocamento de Fluidos

Os fluidos envolvidos no processo de perfuração apresentam os seguintes comportamentos reológicos:

Colchão lavador apresenta comportamento newtoniano, porque é uma mistura de água com detergentes, em baixas concentrações.

Lama de perfuração, a pasta de cimento e a mistura sólido-líquido (*gravel pack*) têm comportamento viscoplástico. Tais materiais se comportam como sólidos quando submetidos a pequenas taxas de deformações. Entretanto, ao aplicar uma tensão

limite de escoamento, estes materiais passam a ter comportamento de fluido. Caso a taxas de deformação continuem aumentando, a viscosidade permanece em queda, com comportamento dado por um modelo *power-law*.

Colchões espaçadores possuem características pseudoplásticas. Ou seja, apesar de não apresentar a tensão limite de escoamento, a viscosidade diminui com o aumento da tensão aplicada, também regida por um modelo *power-law*. O comportamento *power-law* está descrito no Apêndice A.

Uma vez que o comportamento mecânico de fluidos não newtonianos é função da cinemática do escoamento, é necessário conhecer a natureza do escoamento. Escoamentos se dividem basicamente em extensionais e de cisalhamento. Escoamentos em geometrias anulares apresentam cinemática cisalhante.

1.6. Objetivos

Á luz do Estado da Arte, esse trabalho propôs a análise do problema de deslocamento de um fluido por outro no interior do espaço anular de um poço horizontal. O estudo foi realizado numericamente, utilizando o método dos volumes finitos e o *software* FLUENT (2005) para resolver as equações de governo, a partir de geometria/ malha criada no *software* GAMBIT (2003).

A perfuração de poços horizontais utiliza técnicas para alterar a direção da broca, de forma a evitar acidentes geológicos, otimizando a trajetória para atingir as formações produtoras de petróleo. A geometria analisada foi desenvolvida em ziguezague de modo a reproduzir desvios da horizontal devidos à navegação na rocha reservatório.

A geometria do problema foi baseada nas dimensões do poço de perfuração, em escala reduzida. Este tipo de análise torna possível comparação com testes experimentais, em um estudo futuro.

1.7. Roteiro

Inicialmente foi efetuada uma Revisão Bibliográfica (Capítulo 2) para estudar os problemas decorrentes do processo de cimentação.

O Capítulo 3 apresenta a Formulação Teórica, através dos seguintes itens:

- Equações de Conservação;
- Abordagem Multifásica;

- Modelo Reológico;
- Adimensionalização.

O Capítulo 4 apresenta a Formulação Numérica, do *software* FLUENT, com a descrição da técnica de volumes finitos para a solução das equações de conservação.

O Capítulo 5 apresenta a Metodologia de Solução Numérica utilizada para a validação do modelo:

- Definição do Problema;
- Adimensionalização do Problema;
- Condições de Contorno;
- Hipóteses do Modelo;
- Testes de Malha (tamanho da malha, passo de tempo e modelo reológico).

O Capítulo 6 apresenta os Resultados obtidos, onde é avaliada a eficiência do deslocamento através de gráficos e da forma da interface do escoamento. Na primeira situação, o fluido não newtoniano desloca o fluido newtoniano. Na segunda situação, ocorre o inverso.

Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as Considerações Finais, com as principais conclusões e recomendações para trabalhos futuros.