

1 INTRODUÇÃO

No cenário mundial atual, uma das principais preocupações da humanidade está relacionada às fontes de energia, que se apresentam cada vez mais escassas. Isso torna o fator econômico decisivo para a viabilidade de qualquer empreendimento industrial, seja esse relativo à exploração de recursos naturais ou não. No caso da indústria de extração do petróleo, a viabilidade da exploração de um campo petrolífero está associada às características produtivas da formação, obtidas mediante o desenvolvimento e a aplicação de técnicas capazes de aumentar a economicidade dos campos produtores de petróleo.

Atualmente, o fraturamento hidráulico é a técnica de estimulação de poços mais utilizada na indústria do petróleo (Fernandes, 2001). Isto tem motivado o desenvolvimento de diversas pesquisas que visam o aprimoramento da técnica de fraturamento hidráulico e a solução de alguns problemas a ela relacionados. Neste contexto, a motivação dessa dissertação de mestrado é contribuir para a obtenção de projetos de fraturamento hidráulico ótimos, ou sub-ótimos, através da prevenção do fenômeno do refluxo de material de sustentação de fraturas.

A técnica de fraturamento hidráulico consiste na injeção de um fluido de fraturamento na formação, sob vazão e pressão controladas e elevadas o suficiente para provocar a ruptura da rocha por tração, dando início a uma fratura que se propaga durante o período de bombeamento do fluido. Com a interrupção do bombeamento, as fraturas recém-criadas tenderiam a se fechar devido ao peso exercido pelas camadas de rocha superiores (overburden). Para que isso não ocorra, um material granular, conhecido como material de sustentação de fratura ou propante, é bombeado, juntamente com o fluido de fraturamento, mantendo a fratura aberta e criando caminhos preferenciais de alta permeabilidade para o deslocamento dos fluidos que serão produzidos. A Figura 1.1, baseada em uma publicação da Environmental Protection Agency (EPA, 2004), apresenta as etapas da técnica de fraturamento hidráulico.

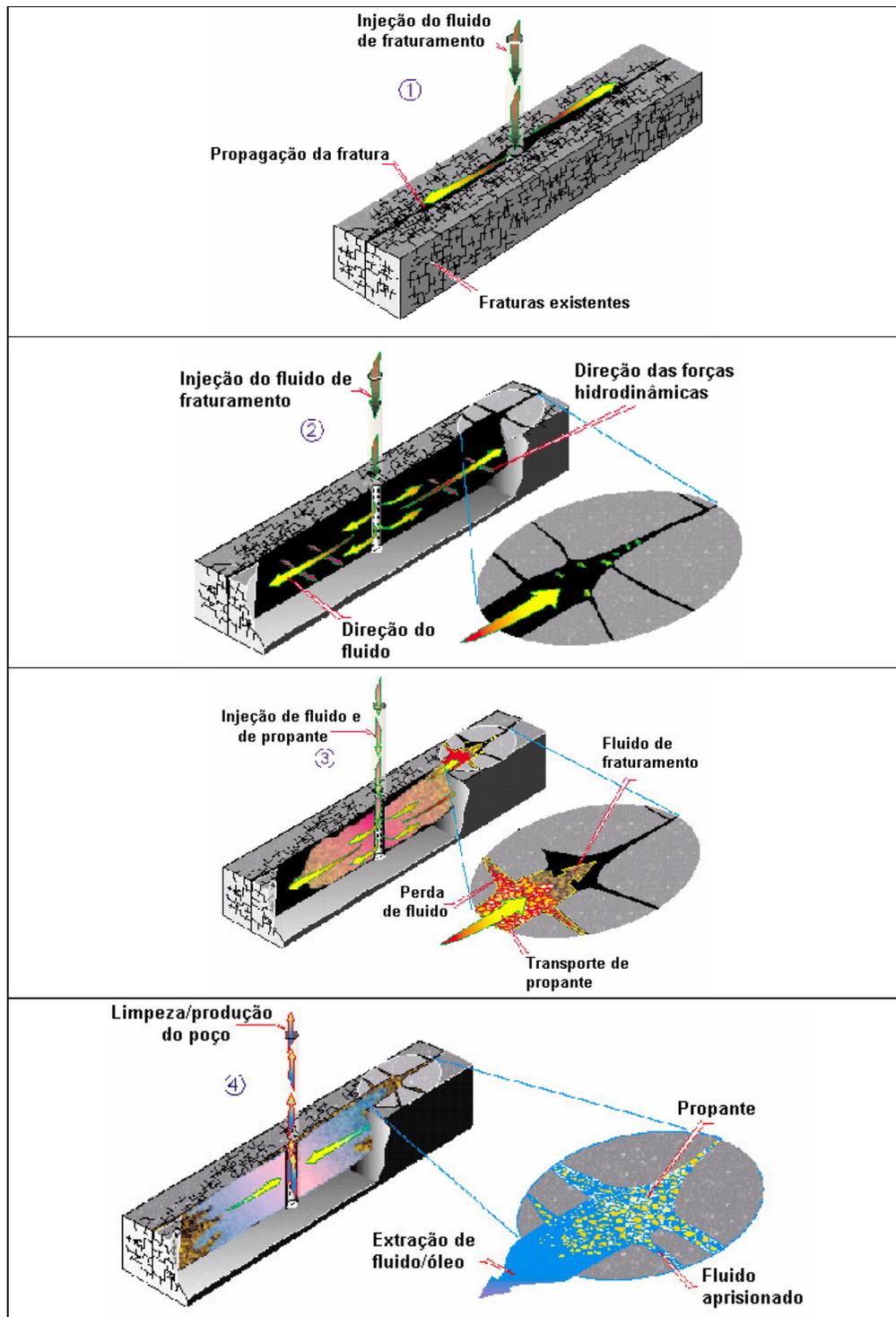


Figura 1.1 – Esquema da técnica de fraturamento hidráulico (EPA, 2004).

Neste processo, pode ocorrer, tanto na fase de limpeza quanto na fase de produção do poço (Andrews, 1998), o fluxo do material granular, juntamente com o fluido, para o interior do poço, caracterizando o que na literatura técnica é

comumente referido como *proppant flowback*, ou ainda, produção de propante, conforme ilustrado na Figura 1.2.

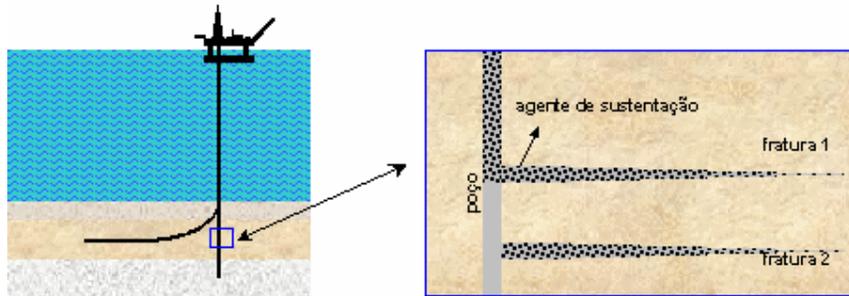


Figura 1.2 – Esquema do refluxo de propante (Cachay, 2004).

Durante a fase de limpeza do poço é praticamente impossível evitar a presença do material de preenchimento no interior do poço, em decorrência do próprio processo de tratamento da fratura. Entretanto, durante essa fase, a produção do material granular não causa danos operacionais e econômicos, visto que o mesmo pode ser convenientemente eliminado através de equipamentos e pessoal técnico. Por outro lado, durante a fase de produção de óleo, um fluxo inverso do material de preenchimento da fratura para o interior do poço pode causar problemas significativamente mais complexos e importantes, que em casos extremos, podem levar ao abandono do poço se os custos para a reativação e retorno à produção forem excessivos.

Apesar dos problemas apresentados, os projetos de fraturamento hidráulico desenvolvidos e aplicados nos campos petrolíferos brasileiros não levam em consideração o fenômeno de refluxo de material de sustentação de fratura durante a produção do poço. Desta forma, as dimensões da fratura são determinadas e nenhuma previsão de refluxo de material de sustentação é realizada. Conseqüentemente, muitos poços não apresentam a produtividade desejada devido à redução da condutividade e das dimensões da fratura decorrentes da produção do propante.

1.1. ESTUDOS RECENTES

O problema de refluxo de material de preenchimento de fratura não é recente e muitos estudos acerca desse assunto foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas; no entanto, ainda não é possível entender claramente os mecanismos que governam o fenômeno do refluxo de propante e o porquê de

algumas fraturas tratadas serem problemáticas e outras não, como pode ser observado na breve revisão bibliográfica feita a seguir.

Um dos trabalhos de maior relevância e grande avanço na pesquisa sobre propantes foi desenvolvido por Milton-Taylor et al. (1992). Neste trabalho foram realizados estudos experimentais nos quais foram identificados e investigados os principais fatores que controlam a estabilidade do pacote granular no interior de fraturas sustentadas. Um estudo numérico determinou comprimentos de fraturas para os quais a mesma era mantida aberta. A influência desses resultados sobre a produtividade do poço e sobre o entendimento do mecanismo de refluxo de propante também foi discutida. Milton-Taylor et al. sugeriram ainda que para fraturas sustentadas por mais de seis camadas de partículas de propante o pacote granular tende à instabilidade.

Posteriormente, a interação mecânica entre diversas partículas de propante foi simulada numericamente por Asgian & Cundall (1994). Cada partícula foi modelada individualmente a partir do Método Elementos Discretos (DEM) desenvolvido por Cundall (1992) aplicável a várias formas e propriedades de propante. A técnica DEM utiliza o Método Explícito de Diferenças Finitas para resolver as equações de movimento de cada partícula para uma série sucessiva de pequenos intervalos. Asgian & Cundall (1994) desenvolveram, então, o programa DEM TRUBAL para a análise da interação mecânica de partículas esféricas e elásticas. Neste estudo, os autores sugeriram que o mecanismo que governa a estabilidade do propante na fratura é o chamado “efeito do arco”, ou seja, no interior da fratura, as partículas de propante tendem a formar um arco de compressão para impedir a movimentação do material de sustentação na direção do poço, durante a produção do mesmo.

Andrews et al. (1998) desenvolveram simulações numéricas, cujos resultados foram respaldados por testes laboratoriais. Testes de refluxo de material de sustentação da fratura foram realizados, considerando uma superfície de estabilidade tridimensional, que permitiu prever o início da produção de propante. Técnicas de modelagem numérica, baseadas no Método dos Elementos Finitos, foram introduzidas para determinar a quantidade de propante produzida. Os efeitos do tratamento dos grãos de propante com resina também foram estudados mediante simulação computacional e os respectivos resultados comprovados a partir de testes laboratoriais.

Parker et al. (1999) desenvolveram modelagens físicas e numéricas com o objetivo de entender melhor os mecanismos que controlam a produção de material de sustentação da fratura hidráulica. Tais modelagens foram elaboradas

durante o desenvolvimento de processos químicos para o tratamento da superfície dos grãos de propante, que é considerado um dos procedimentos mais simples para a redução do refluxo de propante. Inicialmente, foram elaborados experimentos em modelos não tensionados, ou seja, a tensão de fechamento da fratura que influencia na estabilidade do pacote granular não foi simulada. Em estudos adicionais, foram desenvolvidas células de condutividade linear API que permitiram analisar a influência de alguns parâmetros no refluxo de propante, tais como, a largura da fratura, a vazão do fluido e a tensão de fechamento, sendo esta última simulada a partir de tensões aplicadas ao pacote de propante. Os dados obtidos na modelagem física foram usados para calibrar o modelo numérico, no qual o fluxo do fluido no pacote granular é descrito pela equação de Darcy. Os resultados da distribuição das velocidades permitem definir onde se obtém a estabilidade local ao longo da superfície entre o pacote de propante e a fase contínua do fluido. Sucintamente, os autores puderam concluir que o tratamento dos grãos com resina aumenta a velocidade crítica para o início da produção de propante, além de demonstrarem que as modelagens numéricas desenvolvidas estavam de acordo com os resultados dos testes laboratoriais.

Canon et al. (2003) desenvolveu um modelo teórico de previsão de refluxo de material de sustentação na fase de tratamento da fratura hidráulica. O modelo, denominado Semimecânico, possibilita antecipar o fenômeno de refluxo de propante de forma mais rigorosa e, conseqüentemente, conduz a tratamento de fraturas mais eficientes. Diferentes condições de tensão de fechamento, propriedades do fluido e características do propante podem ser avaliadas através desse modelo teórico. Com base em dados de campo, a comparação entre três modelos de previsão de refluxo (Consórcio Stimlab, modelo de Cunha livre e modelo Semimecânico) evidenciou os benefícios do modelo desenvolvido por Canon et al. (2003).

Finalmente, Cachay (2004) desenvolveu um estudo detalhado dos principais modelos de previsão de refluxo de propante apresentados na literatura e dos principais tipos de propante e suas respectivas propriedades. Desenvolveu, ainda, uma retroanálise baseada em resultados de ensaios de laboratório, considerando 22 poços da Petrobrás, localizados em Sergipe, para uma comparação da eficiência entre quatro modelos de previsão de refluxo de propante (Correlação Stimlab, modelo de Cunha livre, modelo Semimecânico e modelo de Bi-potência).

1.2. OBJETIVOS

Um dos principais objetivos dessa pesquisa é contribuir para a obtenção de projetos de fraturamento hidráulico ótimos, considerando o fenômeno de refluxo de material de sustentação de fratura. Para isso, é desenvolvida uma ferramenta computacional, com arquitetura orientada a objeto, baseada em modelos empíricos e teóricos existentes na literatura para a previsão de refluxo de propante, de acordo com as condições do poço e do material de sustentação adotado.

Os trabalhos existentes na literatura não são conclusivos em relação aos mecanismos que governam a produção de propante. No entanto, é constatado um consenso entre os autores em relação aos parâmetros que influenciam o fenômeno, tais como largura da fratura, tensão de fechamento, força de arraste e características do propante. Com base neste consenso, a análise de sensibilidade da estabilidade do pacote granular em relação aos parâmetros envolvidos no projeto de fraturamento hidráulico (controláveis ou não) também se torna objeto da presente pesquisa.

Desse modo, a tese está estruturada da seguinte forma:

O capítulo 2 descreve os principais fatores, controláveis ou não, que influenciam o fenômeno de refluxo de material de sustentação. Em relação às características do material granular são descritos os tipos, tamanhos dos grãos, a resistência ao esmagamento, densidade, arredondamento e esfericidade. Descreve-se, ainda, a largura da fratura, o gradiente hidráulico e a tensão de fechamento da fratura.

No capítulo 3 são apresentados os principais modelos de previsão da produção de material de sustentação existentes na literatura: Correlação Stimlab, modelo de Cunha Livre, modelo de Potência, modelo de Correlação de Bi-Potência, modelo de Velocidade Mínima de Fluidificação e, finalmente, modelo Semimecânico.

O capítulo 4 descreve as diversas etapas para o desenvolvimento da ferramenta computacional para a análise da estabilidade do pacote granular em relação aos parâmetros que influenciam o fenômeno de produção de propante.

O capítulo 5 é dedicado à apresentação de algumas aplicações do presente estudo e dos respectivos resultados.

O capítulo 6 apresenta as conclusões finais da dissertação e algumas sugestões para a continuidade dos estudos sobre o assunto.