



**Liliane Tojeira Velozo**

**Estudo da estabilidade do material de sustentação de  
fraturas estimuladas hidráulicamente em poços de petróleo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadores: Deane de Mesquita Roehl  
Paulo Dore Fernandes

Rio de Janeiro, fevereiro de 2006



**Liliane Tojeira Velozo**

## **Estudo da estabilidade do material de sustentação de fraturas estimuladas hidráulicamente em poços de petróleo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Deane de Mesquita Roehl**  
Orientador  
PUC-Rio

**Paulo Dore Fernandes**  
Co-orientador  
CENPES/PETROBRAS

**Celso Romanel**  
PUC-Rio

**Raul Rosas e Silva**  
PUC-Rio

**José Eugênio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de fevereiro de 2006.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

## **Liliane Tojeira Velozo**

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ - em 2004. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil, com ênfase em Estruturas no ano de 2004. Desenvolveu pesquisa sobre refluxo de material de sustentação de fraturas em poços de petróleo.

### Ficha Catalográfica

Velozo, Liliane Tojeira

Estudo da estabilidade do material de sustentação de fraturas estimuladas hidráulicamente em poços de petróleo / Liliane Tojeira Velozo; orientadora: Deane de Mesquita Roehl; co-orientador: Paulo Dore Fernandes. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

v.,89 f.: il.; 29.7 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Poços de petróleo. 3. Refluxo de propante. 4. Fraturamento hidráulico. 5. Modelos empíricos e teóricos. 6. Sistema orientado a objeto. I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Fernandes, Paulo Dore. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

**CDD: 624**

A Leonida, minha querida avó,  
e a Rafael, meu amado marido,  
pelo constante incentivo.

## **Agradecimentos**

A Deus, por tudo que sou e tenho.

A meus pais e irmão pela compreensão nos momentos ausentes.

A minha avó e meu marido pelo apoio incondicional em todos momentos.

À professora Deane de Mesquita Roehl pela confiança, estímulo e orientação.

Ao professor Paulo Dore Fernandes pela paciência e apoio técnico.

Ao professores do Departamento de Engenharia Civil pelos conhecimentos transmitidos.

Aos amigos da pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, em especial Alexandre Del Savio e Marcos Queiroz, por toda ajuda prestada.

À PUC-Rio e ao CNPQ pelo suporte financeiro imprescindível para o desenvolvimento da pesquisa.

## Resumo

Velozo, Liliane Tojeira. Roehl, Deane de Mesquita. Fernandes, Paulo Dore. **Estudo da estabilidade do material de sustentação de fraturas estimuladas hidráulicamente em poços de petróleo.** Rio de Janeiro, 2006. 89p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

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 poços. A técnica de estimulação mais utilizada atualmente é o fraturamento hidráulico, que tem como uma das etapas principais a injeção de um material granular, denominado de propante, para a manutenção da abertura da fratura. Tal técnica tem como obstáculo o refluxo do propante para o interior do poço (*proppant flowback*), ocasionando diversos problemas que podem levar à interrupção da produção do mesmo. Alguns modelos teóricos e empíricos foram desenvolvidos para a previsão desse fenômeno, mas os mecanismos que o governam não são ainda claramente explicados. Alguns fatores que influenciam na produção de propante são largura da fratura, tensão de fechamento, gradiente hidráulico e características do propante. O refluxo de propante não é considerado nos procedimentos atuais de projeto de fraturamento hidráulico. Nessa dissertação de mestrado foi desenvolvida uma ferramenta computacional com uma arquitetura orientada a objeto, em linguagem de programação Java, para a análise de estabilidade do propante no interior da fratura com base em modelos empíricos e teóricos. Além disso, foi investigada a influência da inclusão de restrições no projeto de fraturamento de modo a prevenir o fenômeno. Busca-se, desse modo, a obtenção de melhores projetos de fraturamento hidráulicos com prevenção do refluxo de propante, garantindo a produtividade do poço e prolongando sua vida útil.

## Palavras-chave

Poços de petróleo; Refluxo de Propante; Fraturamento hidráulico; Modelos empíricos e teóricos; Sistema orientado a objeto;

## Abstract

Veloza, Liliane Tojeira. Roehl, Deane de Mesquita. Fernandes, Paulo Dore. **Study of propped material of fractures stimulated by hydraulic fracturing in oil wells.** Rio de Janeiro, 2006. 89p. M. Sc. Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The viability of the exploration of an oil field is associated with the productive characteristics of the formation, guaranteed by means of the development and application of techniques capable of increasing the productivity and the economy of the oil fields. The currently most used stimulation technique is hydraulic fracturing, by which one of the main stages is the injection of a granular material called proppant to keep the fracture open and enhance fracture permeability. This technique presents as a drawback the phenomenon known as proppant flowback. The proppant is carried to the inside of the well causing many problems which can lead to production interruption. Some empirical and theoretical models for its prediction have been developed, however the mechanisms that govern it are still not clearly explained. Parameters that are related to proppant flowback are fracture width, closure pressure, drag force and proppant characteristics. Proppant flowback prediction is not included in today's procedures of the hydraulic fracturing project. In the present work a computational tool for proppant stability analysis was developed based on empirical and theoretical prediction models. This tool has an object oriented architecture written in Java language. The influence of the introduction of restrictions to prevent proppant production in the hydraulic fracture design procedure was also investigated. In this way, it is aimed to obtain hydraulic fracturing projects by which proppant flowback is prevented in field situations assuring well productivity and extending its activity period.

## Keywords

Oil wells; proppant flowback; hydraulic fractures; empirical and theoretical models; Object-oriented system;

## Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1. ESTUDOS RECENTES	18
1.2. OBJETIVOS	21
2 MECANISMOS DO REFLUXO DE PROPANTE	22
2.1. GEOMETRIA DA FRATURA	22
2.2. TENSÃO EFETIVA SOBRE O PROPANTE	25
2.3. FORÇA DE ARRASTE	28
2.4. TIPOS DE PROPANTES	28
2.5. PROPRIEDADES FÍSICAS DO PROPANTE	29
2.5.1. Resistência ao esmagamento	29
2.5.2. Tamanho dos grãos	29
2.5.3. Densidade do propante	30
2.5.4. Arredondamento e esfericidade das partículas	31
2.6. CONCENTRAÇÃO DE PROPANTE	32
3 MODELOS EMPÍRICOS E TEÓRICOS PARA A PREVISÃO DE REFLUXO DE PROPANTE	33
3.1. DENSIDADE DO FLUIDO	33
3.2. EFEITOS DA GRAVIDADE E DA VISCOSIDADE	34
3.3. MODELOS EMPÍRICOS	35
3.3.1. Correlação Stimlab	35
3.3.2. Modelo de Cunha Livre	36
3.3.3. Modelo de Potência	37
3.3.4. Modelo de Bi-potência	38
3.4. MODELOS TEÓRICOS	39
3.4.1. Modelo de Velocidade Mínima de Fluidificação	39
3.4.2. Modelo Semimecânico	40
3.4.3. Modelo de Potência Modificado	41
3.4.4. Método dos elementos discretos (DEM)	42
3.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS	43

4 SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A PREVISÃO DE REFLUXO DE PROPANTE	46
4.1. DIAGRAMA DO SISTEMA PFP	48
4.1.1. Diagrama de casos de uso	48
4.1.2. Diagrama de componentes	49
4.1.3. Diagramas de classes	50
4.2. DIAGRAMA DE CLASSE PARA O SUBSISTEMA <i>MODEL</i>	52
4.2.1. Atributos e operações das classes	53
4.3. DIAGRAMA DE COMPONENTES DO PACOTE <i>MODEL</i>	55
4.4. DIAGRAMA DE COMPONENTES DO PACOTE <i>EVENT</i>	56
4.4.1. Tratamento de eventos	57
4.4.2. Ouvintes de eventos	57
4.5. INTERFACE GRÁFICA DO SISTEMA PFP	58
5 ESTUDO DOS CENÁRIOS SELECIONADOS	63
5.1. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS CENÁRIOS	63
5.1.1. Vazão de produção	65
5.1.2. Velocidade do fluido e gradiente hidráulico	65
5.1.3. Tensão efetiva sobre o propante	66
5.1.4. Massa específica do fluido	66
5.1.5. Viscosidade	66
5.2. APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS	66
5.2.1. Cenário 1A	67
5.2.2. Cenário 1B	68
5.2.3. Cenário 2A	70
5.2.4. Cenário 2B	71
5.3. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS CENÁRIOS	72
5.4. ESTUDO PARAMÉRICO PARA A DETERMINAÇÃO DE UMA GEOMETRIA ÓTIMA	76
5.5. ESTUDO DA PRODUTIVIDADE DA FRATURA PARA UMA GEOMETRIA ÓTIMA	80
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	84
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

## Lista de figuras

Figura 1.1 – Esquema da técnica de fraturamento hidráulico (EPA, 2004).	17
Figura 1.2 – Esquema do refluxo de propante (Cachay, 2004).	18
Figura 2.1 – Modelo bidimensional de geometria de fratura de Perkins & Kern (PKN).	22
Figura 2.2 – Geometria da fratura adotada para as análises dessa dissertação.	23
Figura 2.3 – Largura da fratura e diâmetro do propante (Canon et al., 2003).	24
Figura 2.4 – Esquema do efeito do arco proposto por Asgian & Cundall (1994).	25
Figura 2.5 – Esquema de atuação da tensão horizontal mínima e da pressão no fundo do poço (Economides, 2000).	25
Figura 2.6 – Efeitos da tensão de fechamento na estabilidade da fratura hidráulica (Canon et al., 2003).	27
Figura 2.7 – Jazida de bauxita e pacote granular de bauxita tratado com resina ( <a href="http://www.edafologia.ugr.es/rocas/bauxita.htm">www.edafologia.ugr.es/rocas/bauxita.htm</a> ).	29
Figura 2.8 – Valores de condutividade da fratura em função do tamanho dos grãos de propante e da tensão de fechamento ( <a href="http://www.carboceramics.com">www.carboceramics.com</a> ).	30
Figura 2.9 – Fator de forma de Krumbein para a caracterização do arredondamento e da esfericidade dos grãos de propantes ( <a href="http://www.carboceramics.com">www.carboceramics.com</a> ).	31
Figura 2.10 – Valores de condutividade da fratura em função da concentração de propante e da tensão de fechamento ( <a href="http://www.carboceramics.com">www.carboceramics.com</a> ).	32
Figura 4.1 – Esquema de funcionamento da arquitetura MVC ( <a href="http://hercules.nce.ufrj.br/arg-mvc.html">http://hercules.nce.ufrj.br/arg-mvc.html</a> ).	47
Figura 4.2 – Diagrama de caso de uso para o sistema PFP sob a perspectiva do usuário.	48
Figura 4.3 – Diagrama de componentes para o sistema PFP.	49
Figura 4.4 – Diagrama de classes do sistema PFP.	51
Figura 4.5 – Diagrama de classe elidido para o subsistema modelo.	52
Figura 4.6 – Classes com atributos, operações e notações de visibilidade.	54
Figura 4.7 – Diagrama de componentes do pacote model.	56
Figura 4.8 – Diagrama de componentes para o pacote event.	56
Figura 4.9 – Interface gráfica do PFP System.	59
Figura 4.10 – Visualização do campo de seleção do modelo de previsão desejado.	60

Figura 4.11 – Visualização do campo de seleção do tipo de propante.	60
Figura 4.12 – Visualização do campo de seleção do diâmetro médio do grão.	61
Figura 4.13 – Visualização do campo de seleção do fator de coesão.	61
Figura 4.14 – Exemplo de aplicação do PFP System.	62
Figura 5.1 – Esquema da metodologia do estudo paramétrico.	77
Figura 5.2 – Esquema do reservatório e da fratura para determinação da produtividade.	80

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Comparação entre os modelos de previsão de refluxo de propante.	44
Tabela 5.1 – Características do propante.	64
Tabela 5.2 – Características da formação.	67
Tabela 5.3 – Características do poço.	68
Tabela 5.4 – Características do fluido.	68
Tabela 5.5 – Características da fratura.	68
Tabela 5.6 – Características da formação.	69
Tabela 5.7 – Características do poço.	69
Tabela 5.8 – Características do fluido.	69
Tabela 5.9 – Características da fratura.	69
Tabela 5.10 – Características da formação.	70
Tabela 5.11 – Características do poço.	70
Tabela 5.12 – Características do fluido.	70
Tabela 5.13 – Características da fratura.	71
Tabela 5.14 – Características da formação.	71
Tabela 5.15 – Características do poço.	71
Tabela 5.16 – Características do fluido.	72
Tabela 5.17 – Características da fratura.	72
Tabela 5.18 – Resultados da análise de estabilidade para o cenário 1A.	73
Tabela 5.19 – Resultados da análise de estabilidade para o cenário 1B.	73
Tabela 5.20 – Resultados da análise de estabilidade para o cenário 2A.	74
Tabela 5.21 – Resultados da análise de estabilidade para o cenário 2B.	74
Tabela 5.22 – Determinação da geometria ótima para o cenário 1A.	77
Tabela 5.23 – Determinação da geometria ótima para o cenário 1B.	78
Tabela 5.24 – Determinação da geometria ótima para o cenário 2A.	78
Tabela 5.25 – Determinação da geometria ótima para o cenário 2B.	78
Tabela 5.26 – Estudo da produtividade para o cenário 1A.	81
Tabela 5.27 – Estudo da produtividade para o cenário 1B.	81
Tabela 5.28 – Estudo da produtividade para o cenário 2A.	82
Tabela 5.29 – Estudo da produtividade para o cenário 2B.	82

## Lista de símbolos

### Letras Latinas

- C – termo de fechamento no modelo Cunha Livre.
- $C_0$  – fator de coesão.
- $C_p$  – concentração de propante.
- $d_p$  – diâmetro da partícula de propante em polegadas (in).
- $d_{p,min}$  – diâmetro mínimo para a estabilidade do propante.
- $dP/dx$  – gradiente hidráulico.
- $d_{ref}$  – diâmetro médio de referência baseado no propante Carbolite 20/40.
- $D'p$  – diâmetro da partícula de propante em micron.
- F – termo de arraste no modelo Cunha Livre.
- $F_{cd}$  – coeficiente adimensional de condutividade.
- $F_{FV}$  – gradiente hidráulico mínimo para desestabilizar o propante na fratura.
  
- $F_{sta}$  – máximo gradiente hidráulico para a estabilidade do propante na fratura.
  
- g – aceleração da gravidade ( $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ ).
- G – módulo de elasticidade transversal da formação.
- $h_f$  – altura da fratura.
- IP – índice de produtividade.
- k – permeabilidade da formação.
- $k_p$  – permeabilidade do pacote granular.
- J – produtividade do poço.
- L – comprimento da fratura.
- $P_{c,net}$  – tensão de fechamento da fratura.
- $P_e$  – pressão estática do fluido.
- $P_f$  – pressão do fluido no fundo do poço.
- $Q_P$  – vazão de produção do poço.
- $Q_T$  – vazão de tratamento do fraturamento hidráulico.
- $r_e$  – raio do reservatório.
- $R_f$  – número de Reynolds para as condições reais do fluido.
- $R_{ft}$  – número de Reynolds crítico.
- $R_G$  – número de Reynolds para a partícula.
- $SG_p$  – densidade relativa do propante.

- $S_{\max}$  – resistência máxima do propante ao esmagamento.  
 $S_T$  – termo da resistência ao esmagamento para o modelo Semimecânico.  
 $T$  – temperatura do fluido.  
 $V_c$  – velocidade crítica do fluido.
- $V_{c,s}$  – velocidade crítica do fluido normalizada em relação a uma fratura sustentada por 8,4 camadas de propante de tamanho 20/40  
 $W$  – largura média da fratura.  
 $W_{\max}$  – largura máxima da fratura.  
 $W_r$  – largura normalizada da fratura.
- $W_{r,\max}$  – largura normalizada máxima para a estabilidade do propante na fratura.  
 $W_T$  – termo da largura da fratura para o modelo Semimecânico.  
 $x_f$  – metade do comprimento da fratura.

### **Letras Gregas**

- $\delta_0$  – densidade relativa do fluido.  
 $\Delta$  – densidade do fluido em graus API.  
 $\mu$  – viscosidade do fluido.  
 $\rho_f$  – massa específica do fluido.  
 $\rho_p$  – massa específica da partícula de propante.  
 $\nu$  – coeficiente de Poisson  
 $\nu_f$  – velocidade mínima de fluidificação.  
 $\phi_p$  – esfericidade da partícula de propante.  
 $\epsilon_{mf}$  – porosidade mínima de fluidificação.  
 $\sigma_{\min}$  – tensão horizontal mínima atuante na formação.

“A diferença entre o sonho e a realidade é a quantidade certa de tempo e  
trabalho”.

*William Douglas*