



**Eduardo Stein Soares Dutra**

**Deslocamento de Líquidos não  
Newtonianos em Tubos Anulares  
Excêntricos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de  
Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes  
Co-Orientador: Prof. Mônica Feijó Naccache

Rio de Janeiro  
abril de 2005



**Eduardo Stein Soares Dutra**

**Deslocamento de Líquidos não  
Newtonianos em Tubos Anulares  
Excêntricos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
graduação em Pós-graduação do Departamento de En-  
genharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-  
Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Paulo Roberto de Souza Mendes**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Mônica Feijó Naccache**

Co-Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**André Leibsohn Martins**

CENPES/PETROBRAS

**Ângela Ourívio Nieckele**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 4 de abril de 2005

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

**Eduardo Stein Soares Dutra**

Graduou-se em Engenharia Mecânica na *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro* -PUC-Rio (Rio de Janeiro, Brasil) em 2001.

Ficha Catalográfica

Soares Dutra, Eduardo Stein

Deslocamento de Líquidos não Newtonianos em Tubos Anulares Excêntricos/ Eduardo Stein Soares Dutra ; orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes; co-orientador: Mônica Feijó Naccache. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005.

104 f. :il.; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Dissertações. 2. Cimentação de poços. 3. Deslocamento de líquidos. 4. Anular. 5. Reologia I. Mendes, Paulo Roberto de Souza. II. Naccache, Mônica Feijó. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

## Agradecimentos

Aos meus avós e pais pelo carinho e apoio em todos esse anos de vida. À minha namorada Aline pelo amor e companheirismo em todos os momentos.

Aos professores, sem exceção, que ao longo da minha vida acadêmica contribuíram para a minha formação. Em especial ao professor Márcio da Silveira Carvalho que me convidou para fazer parte do grupo de pesquisa de reologia da PUC-Rio onde pude ter contato com o ambiente de constantes desafios e aprendizados. Aos meus orientadores, Professor Paulo Roberto de Souza Mendes e Professora Mônica Feijó Naccache pelos ensinamentos tanto na dissertação quanto no dia a dia de pesquisa nos diversos trabalhos que há 3 anos desenvolvemos juntos.

A todo pessoal de apoio técnico do Laboratório de Termociências - Jandir da Cunha Neto, Lourenço Ribeiro, Deivid Ramos e Fábio Mesquita. Aos alunos de iniciação científica Carlos Alberto Orofino, Artur Filho, José Roberto Siffert e Bruno Paula.

Meu obrigado ao CENPES - PETROBRAS, em especial aos Engenheiros André Leibsohn Martins e Cristiane Richard Miranda, pelo apoio técnico e financeiro sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Finalmente aos inúmeros amigos. Àqueles que deixei em São Paulo - Fabio e Beto - com os quais mantenho contato até hoje. Aos que conheci no Ciclo Básico da faculdade - Tovar, Zé, Marcão, Rafael, Pedro, Felipe Lima e Felipe Leite e suas respectivas namoradas e esposas. Aos amigos que tive a felicidade de conhecer no trabalho - Joel, Julio, Bruno, Daniel, Frank, Andrea, Juliana Abrantes e Juliana Vianna, Tatiana, Erick, Roney, André, Luis Antônio - Amigos com os quais tive oportunidade de trocar interessantes idéias que transcendiam o fabuloso mundo de Navier-Stokes.

## Resumo

Soares Dutra, Eduardo Stein; Mendes, Paulo Roberto de Souza; Naccache, Mônica Feijó. **Deslocamento de Líquidos não Newtonianos em Tubos Anulares Excêntricos**. Rio de Janeiro, 2005. 104p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Após a perfuração de poços de petróleo, a lama utilizada na remoção de cascalho, lubrificação e resfriamento da broca deve ser removida e substituída por uma mistura de cimento. Essa substituição se dá pelo deslocamento de um fluido por outro no espaço anular entre a formação rochosa e a coluna de completação ou revestimento. A mistura de cimento tem a função de garantir a estabilidade estrutural do poço evitando danos ambientais e prejuízos econômicos. Para melhores resultados do processo de cimentação, utilizam-se fluidos intermediários, também chamados de colchões lavadores e espaçadores, entre os fluidos principais. A boa qualidade do deslocamento dos fluidos pode ser avaliada pela forma da interface entre eles. Perfis mais acentuados sugerem um atravessamento indesejável do fluido deslocante (cimento) através do deslocado (fluido de perfuração). Por outro lado, perfis achatados indicam um deslocamento mais eficiente. Neste trabalho foi feita uma análise experimental e numérica do processo de cimentação, investigando a forma da interface e a eficiência do deslocamento dos fluidos. Uma planta experimental vertical foi construída, simulando um processo de deslocamento de fluidos em anulares excêntricos de poços. Com uma câmera digital CCD foram filmadas as interfaces entre os fluidos durante o escoamento e com essas imagens puderam-se comparar os resultados com as simulações numéricas realizadas num software comercial, usando o método de volumes finitos. Foram analisados os efeitos de diferentes parâmetros como a excentricidade, o regime de escoamento, e, principalmente o comportamento mecânico dos fluidos envolvidos (reologia) na eficiência do deslocamento. Com base nesses resultados é possível prever quais parâmetros operacionais otimizam o processo de deslocamento.

## Palavras-chave

Cimentação de Poços, Deslocamento de Líquidos, Anular, Reologia.

## Abstract

Soares Dutra, Eduardo Stein; Mendes, Paulo Roberto de Souza; Naccache, Mônica Feijó. **Displacement of non-Newtonian Liquids in Eccentric Annuli**. Rio de Janeiro, 2005. 104p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In cementing processes of oil wells, the mud formerly used to drag the gravel, to lubricate and to cool the drill is removed and substituted by a cement mixture. This substitution is obtained by the displacement of a fluid by another in the annulus between the rock formation and the casing. For best results of cementing process, intermediate fluids, also called spacers, are used between the drill mud and the cement mixture. The displacement process is very complex due to geometry and fluids characteristics. The annular space is eccentric in most cases, and both drilling mud and cement mixtures are non-Newtonian fluids. In this work, an experimental and numerical study is performed to analyze this process. A vertical experimental plant was constructed to simulate the fluid displacement through eccentric annuli. The interface shapes between two adjacent fluids were visualized using a digital CCD camera. The images were compared with the results obtained in the numerical simulations. The numerical solution was obtained via the Finite Volume technique and using the Volume-of-Fluid method. The effects of eccentricity, displacement velocity and rheological parameters on the displacement efficiency were investigated. Based on these results we can predict the liquid characteristics and the operational parameters that optimize the displacement process.

## Keywords

Well Cementing, Liquid Displacement, Annuli, Rheology.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>17</b>
1.1	Motivação e Descrição do Problema	17
1.2	Revisão Bibliográfica	21
1.3	Proposta	30
<b>2</b>	<b>Formulação Matemática</b>	<b>31</b>
2.1	Equação de Conservação de Massa	31
2.2	Equação de Conservação de Quantidade de Movimento Linear	32
2.3	Adimensionalização	33
2.4	Funções Viscosidade	35
2.5	Standoff	38
2.6	Tensão Superficial	39
2.7	Condições de Contorno	39
2.8	Condições Iniciais	40
<b>3</b>	<b>Formulação Numérica</b>	<b>41</b>
3.1	Teste de Malha	42
3.2	Abordagem Multi-Fásica	45
<b>4</b>	<b>Métodos Experimentais</b>	<b>48</b>
4.1	Projeto da Planta Experimental	48
4.2	Sistema de Visualização	52
4.3	Sistema de Bombeamento	53
4.4	Preparação dos Fluidos	54
4.5	Caracterização Reológica	55
4.6	Procedimento Experimental	58
4.6.1	Caso 1 - Fluido Newtoniano deslocando um não Newtoniano	58
4.6.2	Caso 2 - Fluido não Newtoniano deslocando um Newtoniano	61
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão - Caso 1</b>	<b>64</b>
5.1	$\chi = 0$ - Excentricidade Máxima	64
5.2	$\chi = 0,5$ - Excentricidade Média	65
5.3	$\chi = 1$ - Sem Excentricidade	65
<b>6</b>	<b>Resultados e Discussão - Caso 2</b>	<b>77</b>
6.1	$\chi = 0$ - Excentricidade Máxima	77
6.2	$\chi = 0,5$ - Excentricidade Média	78
6.3	$\chi = 1$ - Sem Excentricidade	78
<b>7</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>92</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>94</b>
<b>A</b>	<b>Apêndice 1 - Método dos Volumes Finitos</b>	<b>98</b>

A.0.1	Discretização	99
A.0.2	Equação de Correção da Pressão	101
A.0.3	Equação de Correção da Velocidade	101
A.0.4	Resíduos	103
<b>B</b>	<b>Apêndice 2 - Ajuste de Curva</b>	<b>104</b>



## Lista de Figuras

1.1	Processo de Cimentação de um Poço de Petróleo	18
1.2	Interface entre dois Fluidos	20
1.3	Regimes e Perfis de Escoamento	24
1.4	Experimento proposto por Tehrani <i>et al</i> (1992)	29
1.5	Geometria do problema a ser resolvido	30
2.1	Função Viscosidade - <i>Carreau</i>	36
2.2	Função Viscosidade - <i>Herschel-Bulkley</i>	37
2.3	Excentricidade	38
3.1	Malha da Superfície de Entrada - Geometria $\chi = 0,5$	42
3.2	Malha Garal e Condições de Contorno - Geometria $\chi = 0,5$	42
3.3	Perfil de velocidade na superfície de saída - Variação da malha	43
3.4	Resultado do teste de malha - Tempos x malha	44
3.5	Interface com Malha 20x5x50	45
3.6	Interface com Malha 20x20x200	45
3.7	Interface com Malha 20x20x400	45
4.1	Diagrama Esquemático da Planta Experimental - Vista Lateral e Frontal	49
4.2	Planta Experimental - Visão Geral	52
4.3	Região Jusante - Mangueiras de Saída e Variador de Excentricidade Superior	53
4.4	Calibração da Bomba	54
4.5	Função Viscosidade para Fluido de Perfuração, Cimento e Colchão, Medida Experimentalmente	56
4.6	Viscosidade x Tensão Cisalhante - Avaliação da Tensão Limite de Escoamento	57
4.7	Ajuste de Curva - Teste de Reologia para cimento e fluido de perfuração x Modelos de <i>Herschel-Bulkley</i> e <i>Carreau</i>	58
4.8	Função Viscosidade - Fluidos x Carbopol	59
4.9	Condição Inicial do Caso 1	60
4.10	Procedimento experimental – Passo-a-passo – Caso 1	61
4.11	Procedimento experimental – Passo-a-passo – Caso 2	62
5.1	Caso 1 – $\chi = 0 - 1$ BPM	68
5.2	Caso 1 – $\chi = 0 - 2$ BPM	68
5.3	Caso 1 – $\chi = 0 - 3$ BPM	69
5.4	Caso 1 – $\chi = 0 - 4$ BPM	69
5.5	Caso 1 – $\chi = 0,5 - 1$ BPM	70
5.6	Caso 1 – $\chi = 0,5 - 2$ BPM	70
5.7	Caso 1 – $\chi = 0,5 - 3$ BPM	71
5.8	Caso 1 – $\chi = 0,5 - 4$ BPM	71
5.9	Caso 1 – $\chi = 1 - 1$ BPM	72
5.10	Caso 1 – $\chi = 1 - 2$ BPM	72

5.11	Caso 1 – $\chi = 1$ – 3 BPM	73
5.12	Caso 1 – $\chi = 1$ – 4 BPM	73
5.13	Eficiência – $\chi = 0$	74
5.14	Eficiência – $\chi = 0,5$	74
5.15	Eficiência – $\chi = 1$	74
5.16	Eficiência – $\chi = 0$ - Saída do domínio	75
5.17	Seção de saída – $\chi = 0$ - 4 BPM - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$	75
5.18	Eficiência – $\chi = 0,5$ - Saída do domínio	75
5.19	Seção de saída – $\chi = 0,5$ - 4 BPM - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$	75
5.20	Eficiência – $\chi = 1$ - Saída do domínio	76
5.21	Seção de saída – $\chi = 1$ - 4 BPM - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$	76
6.1	Caso 2 – $\chi = 0$ – 1BPM	80
6.2	Caso 2 – $\chi = 0$ – 2 BPM	80
6.3	Caso 2 – $\chi = 0$ – 3 BPM	81
6.4	Caso 2 – $\chi = 0$ – 4 BPM	81
6.5	Caso 2 – $\chi = 0,5$ – 1 BPM	82
6.6	Caso 2 – $\chi = 0,5$ – 2 BPM	82
6.7	Caso 2 – $\chi = 0,5$ – 3 BPM	83
6.8	Caso 2 – $\chi = 0,5$ – 4 BPM	83
6.9	Caso 2 – $\chi = 1$ – 1 BPM	84
6.10	Caso 2 – $\chi = 1$ – 2 BPM	84
6.11	Caso 2 – $\chi = 1$ – 3 BPM	85
6.12	Caso 2 – $\chi = 1$ – 4 BPM	85
6.13	Eficiência – $\chi = 0$ – <i>Carreau</i>	86
6.14	Eficiência – $\chi = 0,5$ – <i>Carreau</i>	86
6.15	Eficiência – $\chi = 1$ – <i>Carreau</i>	86
6.16	Eficiência – $\chi = 0$ – <i>Herschel-Bulkley</i>	87
6.17	Eficiência – $\chi = 0,5$ – <i>Herschel-Bulkley</i>	87
6.18	Eficiência – $\chi = 1$ – <i>Herschel-Bulkley</i>	87
6.19	Eficiência – $\chi = 0$ – Saída do domínio - <i>Carreau</i>	88
6.20	Cortes na seção de saída – $\chi = 0$ - 1 BPM - Modelo de <i>Carreau</i> - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$	88
6.21	Eficiência – $\chi = 0,5$ – Saída do domínio - <i>Carreau</i>	88
6.22	Cortes na seção de saída – $\chi = 0,5$ - 1 BPM - Modelo de <i>Carreau</i> - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$	88
6.23	Eficiência – $\chi = 1$ – Saída do domínio - <i>Carreau</i>	89
6.24	Cortes na seção de saída – $\chi = 1$ - 1 BPM - Modelo de <i>Carreau</i> - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$	89
6.25	Eficiência – $\chi = 0$ – Saída do domínio - <i>Herschel-Bulkley</i>	90
6.26	Cortes na seção de saída – $\chi = 0$ - 1 BPM - Modelo de <i>Herschel-Bulkley</i> - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$	90
6.27	Eficiência – $\chi = 0,5$ – Saída do domínio - <i>Herschel-Bulkley</i>	90
6.28	Cortes na seção de saída – $\chi = 0,5$ - 1 BPM - Modelo de <i>Herschel-Bulkley</i> - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$	90
6.29	Eficiência – $\chi = 1$ – Saída do domínio - <i>Herschel-Bulkley</i>	91
6.30	Cortes na seção de saída – $\chi = 1$ - 1 BPM - Modelo de <i>Herschel-Bulkley</i> - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$	91

7.1	Velocidades da Ponta e da Linha de Contato com a Parede da Interface entre dois Fluidos	93
A.1	Volume de Controle	98
A.2	Loop Iterativo	102
B.1	Modelo de procedimento para ajuste de dados	104

## Lista de Tabelas

3.1	Teste de Malha	43
4.1	Tabela de Velocidades	51
4.2	Parâmetros Reológicos do Fluido de Perfuração Ajustado com os Modelos <i>Herschel-Bulkley</i> e de <i>Carreau</i> .	56
4.3	Parâmetros Reológicos da Pasta de Cimento Ajustado com os Modelos <i>Herschel-Bulkley</i> .	57
4.4	Tabela de Número de Reynolds e Capilaridade - Caso 1	60
4.5	Tabela de Número de Reynolds e Weber - Caso 2	63

## Lista de Símbolos

### Nomenclatura - 1

a - Coeficiente da equação geral de conservação discretizada ( )

A - área da seção transversal ao escoamento ( $\text{m}^2$ )

$\vec{A}$  - Vetor normal à Área ( $\text{m}^2$ )

b - Coeficiente da parte constante do termo fonte  $S_c$  ( )

B - Parcela de fonte da variável  $\phi$  ( )

Bu - Número de Buoyancy - Empuxo ( )

c - Menor folga do anular (m)

Ca - Número de Capilaridade ( )

d - diâmetro interno do Tubo (m)

D - Condutância de difusão em cada face ( $\text{Kg}/\text{m}^2.\text{s}$ )

Dh - diâmetro hidráulico (m)

Di - diâmetro interno do espaço anular (m)

Do - diâmetro externo do espaço anular (m)

$\delta V$  - Volume infinitesimal ( $\text{m}^3$ )

F - Fluxo de massa em cada face ( $\text{Kg}/\text{m}^2.\text{s}$ )

Fr - Número de Froude ( )

g - Aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}$ )

k - Índice de consistência ( $\text{Pa}.\text{s}^n$ )

## Nomenclatura - 2

$L$  - Comprimento da geometria anular (m)

$m$  - Massa adimensional depositada na parede ( )

$n$  - Índice *power-law* ( )

$p$  - Pressão (Pa)

$p^*$  - Pressão estimada (Pa)

$p'$  - Pressão corrigida (Pa)

$P$  - Número de Peclet ( )

$Q$  - Vazão Volumétrica ( $m^3$ )

$R$  - Resíduo das iterações numéricas ( )

$RD$  - Razão de diâmetros ( )

$Re$  - Número de Reynolds ( )

$S$  - Termo Fonte ( )

$t$  - Tempo ( $s$ )

$t^*$  - Tempo adimensional ( )

$\mathbf{T}$  - Tensor das Tensões ( )

$\vec{v}$  - Vetor velocidade (m/s)

$\bar{v}$  - Velocidade média (m/s)

$v^*$  - Velocidade estimada (m/s)

### **Nomenclatura - 3**

$v'$  - Velocidade corrigida (m/s)

$v_e$  - Velocidade entrada (m/s)

$V$  - Volume Interno do Anular ( $m^3$ )

$\Delta V$  - Volume de controle ( $m^3$ )

$x$  - Coordenada cartesiana axial (m)

$y$  - Coordenada cartesiana radial (m)

$We$  - Número de Weber ( )

$z$  - Coordenada cartesiana radial (m)

**Nomenclatura - Símbolos gregos**

$\alpha$  - Função fração volumétrica ( )

$\dot{\gamma}$  - Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

$\dot{\gamma}_c$  - Taxa de deformação característica ( $s^{-1}$ )

$\dot{\gamma}$  - Tensor taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

$\Gamma$  - Coeficiente de Difusão ( )

$\eta$  - Viscosidade dinâmica não Newtoniana (Pa.s)

$\eta_c$  - Viscosidade característica dinâmica não Newtoniana (Pa.s)

$\eta_0$  - Viscosidade em baixas taxas de deformação (Pa.s)

$\eta_\infty$  - Viscosidade em altas taxas de deformação (Pa.s)

$\lambda$  - Constante de tempo (s)

$\mu$  - Viscosidade dinâmica (Pa.s)

$\phi$  - Variável dependente ( )

$\rho$  - Densidade ( $Kg/m^3$ )

$\sigma$  - Tensão Superficial entre líquidos (N/m)

$\tau$  - Tensão (Pa)

$\boldsymbol{\tau}$  - Tensor extra-tensão ( )

$\tau_0$  - Tensão limite de escoamento (Pa)

$\chi$  - Excentricidade ( )