



Frederico Carvalho Gomes

**Modelo Assintótico do Deslocamento de
Líquidos em Anulares com Excentricidade
Variável**

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. Márcio da Silveira Carvalho

Rio de Janeiro
Abril de 2009



Frederico Carvalho Gomes

**Modelo Assintótico do Deslocamento de
Líquidos em Anulares com Excentricidade
Variável**

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

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Andre Leibsohn Martins

CENPES – Petrobras

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Abril de 2009

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

Frederico Carvalho Gomes

Frederico Carvalho Gomes graduou-se em Engenharia Mecânica e de Produção Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro [2005].

Ficha Catalográfica

Gomes, Frederico Carvalho

Modelo Assintótico do Deslocamento de Líquidos em Anulares com Excentricidade Variável / Frederico Carvalho Gomes; orientador: Márcio da Silveira Carvalho. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2009.

v., 54 f: il. ; 29,7 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. Escoamento em Anular. 3. Teoria da Lubrificação. 4. Processo de Cimentação. I. Carvalho, Márcio da Silveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

À minha família por tudo.

Ao meu orientador Professor Márcio Carvalho pelo apoio e incentivo para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas da PUC-Rio e do TecGraf.

Ao CNPq, CAPES, FAPERJ e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

Resumo

Gomes, Frederico Carvalho; Carvalho, Márcio da Silveira. **Modelo Assintótico do Deslocamento de Líquidos em Anulares com Excentricidade Variável**. Rio de Janeiro, 2009. 54p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Uma das etapas do processo de perfuração de um poço de petróleo é a cimentação, ela prove o isolamento das zonas e a sustentação do revestimento. Durante o processo de cimentação é necessário a substituição da lama de perfuração pela pasta de cimento. Para evitar a mistura entre esses fluidos é normalmente utilizado um fluido espaçador. Dessa forma é comum que sejam bombeados 3 ou mais fluidos através do anular excêntrico formado pela parede da rocha e o revestimento. A análise completa do escoamento no espaço anular que ocorre durante o processo de cimentação é extremamente complexa, pois os fluidos em questão podem apresentar comportamento não-Newtoniano e o escoamento é tridimensional e em regime transiente. Desta forma, a análise computacional do processo é extremamente cara. Modelos simplificados para o processo estão disponíveis na literatura e são largamente utilizados em softwares comerciais pela indústria de exploração de petróleo. No entanto, as muitas simplificações adotadas nestes modelos limitam os parâmetros nos quais são obtidos bons resultados. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo 2D para esse escoamento 3D utilizando as simplificações propostas pela teoria de lubrificação. O modelo desenvolvido considera a variação de inclinação e excentricidade ao longo do poço e as características não-Newtonianas dos fluidos envolvidos. Os resultados obtidos mostram como as propriedades dos fluidos e a geometria do poço afetam a eficiência do processo de bombeio.

Palavras-chave

Escoamento em Anular; Teoria da Lubrificação; Processo de Cimentação;

Abstract

Gomes, Frederico Carvalho; Carvalho, Márcio da Silveira (Adviser). **Asymptotic Model for Displacement of Liquids in Annular with Variable Eccentric**. Rio de Janeiro, 2009. 54p. MSc Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The cementation process is an important step in the construction of oil and gas wells. It provides zonal isolation and support for the well bore. During the cementation, it is necessary to displace the drilling mud by the cement slurry. To avoid mixing of these liquids, spacer fluids are usually used. Therefore, it is common to have three or more liquids flowing through the eccentric annular space. A complete analysis of the flow in the annular space that occurs during cementation is extreme complex, because of the presence of different liquids, that often present non-Newtonian characteristic and the flow is three dimensional and transient. Thus, a complete model has a prohibitive high computational cost. Simplified models are available in the literature and are used by the oil industry in commercial simulation software for cementation. However, the strong simplifying assumptions limit the range of parameters at which these models are accurate. In this work, a 2D model for this 3D flow was developed using the lubrication theory. The developed model considered the variation of the inclination and eccentricity along the well and the non-Newtonian behavior of the flowing liquids. The results show how the liquid properties and well geometry affect the efficiency of the displacement process.

Keywords

Annular Flow; Lubrication Theory; Cementation Process;

Sumário

1	Introdução	10
2	Formulação do Problema	15
2.1	Considerações Gerais	15
2.2	Equação da Quantidade de Movimento	16
2.3	Teoria de Lubrificação	18
2.4	Equação de Continuidade	20
2.5	Discretização do modelo	22
2.6	Avanço da Interface	25
2.7	Modelo Não-Newtoniano	29
3	Simulação Numérica e Resultados	32
3.1	Avaliação da Precisão do Modelo em Coordenadas Cartesianas	33
3.2	Exemplo Poço vertical – Newtoniano – 2 Fluidos	36
3.3	Exemplo Poço vertical – não-Newtoniano – 3 Fluidos	38
3.4	Exemplo Poço Horizontal	40
3.5	Exemplo Excentricidade Variável	42
3.6	Exemplo Geometria Real	46
4	Considerações Finais e Trabalhos Futuros	51
	Referências Bibliográficas	53

Lista de figuras

1.1	Exemplo esquemático de um poço	10
1.2	Exemplo esquemático da perfuração do poço	11
2.1	Geometria do problema - vista lateral	15
2.2	Geometria do problema - vista superior	16
2.3	Domínio do modelo	23
2.4	Discretização do modelo	23
2.5	Detalhe da discretização do modelo	24
2.6	Função degrau	28
2.7	Função degrau	28
2.8	Fluxograma de solução para fluido não-Newtoniano	30
3.1	Fluxograma de solução	32
3.2	Campo de pressão – Caso 5	35
3.3	Gráfico de avanço da interface – Exemplo Vertical Newtoniano	37
3.4	Geometria do exemplo – Vertical não-Newtoniano	38
3.5	Gráfico de avanço da interface – Exemplo Vertical não-Newtoniano	39
3.6	Gráfico de avanço da interface – Exemplo Poço Horizontal	42
3.7	Geometria do exemplo em escala – Exemplo Excentricidade Variável	43
3.8	Gráfico de avanço da interface – Exemplo Excentricidade Variável	44
3.9	Gráfico de avanço da interface – Exemplo Excentricidade Variável	45
3.10	Geometria do exemplo em escala – Exemplo Geometria Real	46
3.11	Gráfico de avanço da interface – Exemplo Geometria Real	48
3.12	Gráfico de avanço da interface – Exemplo Geometria Real	49
3.13	Gráfico de concentração – Exemplo Geometria Real	50
4.1	Iso-linhas de pressão	52

Lista de tabelas

3.1	Dados para avaliação do modelo Newtonino	33
3.2	Resultados para avaliação do modelo Newtonino	34
3.3	Dados para avaliação do modelo não-Newtonino	34
3.4	Resultados para avaliação do modelo não-Newtonino	35
3.5	Fluidos bombeados – Exemplo Vertical Newtoniano	36
3.6	Dados da geometria – Exemplo Vertical Newtoniano	36
3.7	Comparação da Posição da Interface – Exemplo Vertical Newtoniano	36
3.8	Dados da geometria – Exemplo Vertical não-Newtoniano	38
3.9	Fluidos bombeados – Exemplo Vertical não-Newtoniano	39
3.10	Dados da geometria – Exemplo Poço Horizontal	40
3.11	Fluidos bombeados – Exemplo Poço Horizontal	41
3.12	Dados dos segmentos – Exemplo Excentricidade Variável	43
3.13	Fluidos bombeados – Exemplo Excentricidade Variável	43
3.14	Dados dos segmentos – Exemplo Geometria Real	46
3.15	Dados dos Fluidos – Exemplo Geometria Real	47