



Bernardo Bastos Alexandre

**Escoamento de Fluido não Newtoniano em
Espaço Anular com Excentricidade Variável**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Rio de Janeiro
Setembro de 2009



Bernardo Bastos Alexandre

**Escoamento de Fluido não Newtoniano em
Espaço Anular com Excentricidade Variável**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação 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. Mônica Feijó Naccache

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de setembro de 2009

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

Bernardo Bastos Alexandre

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio (Rio de Janeiro, Brasil) em 2006.

Ficha Catalográfica

Alexandre, Bernardo Bastos

Escoamento de fluido não newtoniano em espaço anular com excentricidade variável / Bernardo Bastos Alexandre; orientador: Márcio da Silveira Carvalho. – 2009.

107 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Teoria da lubrificação. 3. Espaço anular. 4. Fluido não newtoniano. 5. Excentricidade variável. 6. Escoamento de fluido de perfuração. I. Carvalho, Márcio da Silveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Aos meus pais pelo amor, carinho e apoio em todos esses anos de vida.

À minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado e ajudaram no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica que ao longo da graduação e do mestrado contribuíram para minha formação acadêmica.

Ao meu orientador Márcio da Silveira Carvalho com quem venho trabalhando desde o último ano de graduação e que esteve sempre presente, com grande sabedoria, nessa caminhada através da mecânica dos fluidos não Newtonianos e dos métodos numéricos para engenharia.

Ao professor Washington Braga Filho que me orientou durante os dois anos de iniciação científica realizados na graduação, permitindo um grande aprendizado e contato com um ambiente de constante desafio.

À Petrobras que investiu no meu potencial e me liberou dos meus compromissos profissionais quando foi necessário. Em especial aos colegas da gerência setorial MATERIAIS/ECBS/ESP com quem tenho o prazer de trabalhar e conviver no meu dia-a-dia.

À PUC-Rio e ao CNPq, pelo auxílio concedido ao longo do mestrado, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Alexandre, Bernardo Bastos; Carvalho, Márcio da Silveira. **Escoamento de fluido não Newtoniano em espaço anular com excentricidade variável.** Rio de Janeiro, 2009. 107p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Na perfuração de poços é necessária a utilização de um fluido de perfuração que apresenta diversas funções. Esse fluido retorna para superfície pelo anular formado entre a coluna de perfuração e o poço, sendo fundamental a correta previsão desse escoamento. Uma análise dessa situação é extremamente complexa, uma vez que o fluido tem comportamento não Newtoniano, a coluna de perfuração apresenta rotação e é excêntrica, sendo que a excentricidade pode não ser constante ao longo do poço. Os trabalhos disponíveis na literatura estudam os efeitos da rotação e do comportamento do fluido, mas consideram a excentricidade constante. No presente trabalho as equações de conservação de quantidade de movimento e massa que governam o escoamento serão simplificadas utilizando a teoria da lubrificação, resultando em um problema com solução mais simples e baixo custo computacional. Modelos similares desprezam o efeito de curvatura, sendo válidos somente para razões de raio próximas da unidade. A formulação desenvolvida considera todos os termos, dando origem a uma teoria de lubrificação em coordenadas cilíndricas. A simplificação resulta em uma equação diferencial para o campo de pressão. O comportamento do fluido será avaliado através do método da Viscosidade Newtoniana Equivalente. A partir da solução é possível avaliar o perfil de velocidade que varia ao longo da coordenada axial. Os resultados foram validados a partir de soluções disponíveis na literatura (excentricidade constante). Além disso, os efeitos da variação da excentricidade no fator de atrito foram estudados e a existência de escoamento azimutal mesmo sem rotação da coluna foi observada.

Palavras-Chave

Teoria da lubrificação; espaço anular; fluido não Newtoniano; excentricidade variável; escoamento de fluido de perfuração.

Abstract

Alexandre, Bernardo Bastos; Carvalho, Márcio da Silveira. **Flow of non-Newtonian fluid in annular space with varying eccentricity**. Rio de Janeiro, 2009. 107p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In drilling operation of wells it is necessary to use a drilling fluid that has many functions. Flow in the annular space between the drill pipe and the well occurs during the return to the surface. The correction prediction of this flow is important and the complete study is very complex: the fluid has non-Newtonian behavior, the drill pipe is rotating and a varying eccentricity of the drill pipe is possible. Previous analyses in the literature study effects of the rotation and the rheological behavior of the fluid, but consider a constant eccentricity along the axial coordinate. In this work, the equations of momentum and mass conservation that govern the flow is simplified by the lubrication approximation and a two-dimensional problem that has simple solution and lower computational cost is obtained. Similar models available neglect the curvature and are only accurate for radius ratio close to one. The formulation developed in this work considers all terms, leading to a lubrication approximation in cylindrical coordinates. The consequence of this approximation is a differential equation for the pressure field. The rheological behavior of the fluid will be evaluated using the method of Equivalent Newtonian Viscosity. With pressure field is possible to determinate the velocity that varies along axial coordinate. The accuracy of the model was analyzed using solutions available in literature (constant eccentricity case). The results show the effects of the variation of the eccentricity on the friction factor and the existence of azimuthal flow even without rotation of the drill pipe.

Keywords

Lubrication approximation; annular space; non-Newtonian fluid; varying eccentricity; mud flow.

Sumário

1. Introdução	17
1.1. Motivação e Descrição do Problema	17
1.2. Revisão Bibliográfica	22
1.3. Proposta e Objetivo	26
2. Formulação Matemática	27
2.1. Geometria	27
2.2. Conservação de Quantidade de Movimento	30
2.3. Conservação de Massa	33
2.4. Teoria da Lubrificação	34
2.5. Método da Viscosidade Newtoniana Equivalente	41
2.6. Avaliação do Campo de Velocidade	47
3. Método Numérico	52
3.1. Discretização da Equação Diferencial	52
3.2. Integração Numérica	56
3.3. Processo Iterativo	58
4. Parâmetros Adimensionais	60
5. Resultados	63
5.1. Validação a partir de Solução para caso Concêntrico	64
5.2. Validação a partir de Solução para caso Excêntrico	67
5.3. Espaço Anular Tridimensional	78
6. Considerações Finais	101
7. Referências bibliográficas	105

Lista de Figuras

Figura 1.1	- Processo de Perfuração de um Poço de Petróleo	18
Figura 1.2	- Cimentação Primária de um Poço de Petróleo	20
Figura 1.3	- Falha na Operação de Cimentação	20
Figura 2.1	- Espaço Anular com Excentricidade Variável	28
Figura 2.2	- Configuração da Seção Transversal	29
Figura 2.3	- Razão entre a Vazão para Coordenadas Cilíndricas e Placas Paralelas	33
Figura 2.4	- Balanço de Força no Espaço Anular	45
Figura 2.5	- Seção Transversal do Anular	48
Figura 2.6	- Plano rz do Espaço Anular	49
Figura 3.1	- Domínio da Equação do Campo de Pressão	53
Figura 3.2	- Representação Geométrica da Integral	57
Figura 3.3	- Processo Iterativo do Modelo Proposto	59
Figura 5.1	- Campo de Velocidade para Fluido não Newtoniano no Anular Concêntrico	67
Figura 5.2	- Seção Transversal do Anular com Excentricidade Horizontal Constante	68
Figura 5.3	- Produto $f \times Re$ em Função da Excentricidade ($n = 0,8 / k = 0,5$)	69
Figura 5.4	- Produto $f \times Re$ em Função da Excentricidade ($n = 0,5 / k = 0,5$)	70
Figura 5.5	- Produto $f \times Re$ em Função da Excentricidade ($n = 0,2 / k = 0,5$)	71

Figura 5.6	- Produto $f \times Re$ em Função da Excentricidade ($n = 0,5 / k = 0,8$)	72
Figura 5.7	- Produto $f \times Re$ em Função da Excentricidade ($n = 0,5 / k = 0,2$)	72
Figura 5.8	- Velocidade Máxima Axial em Função da Excentricidade	73
Figura 5.9	- Variação da Velocidade Axial com a Coordenada Azimutal ($\varepsilon = 0,3 / k = 0,5$)	75
Figura 5.10	- Variação da Velocidade Axial com a Coordenada Azimutal ($\varepsilon = 0,6 / k = 0,5$)	75
Figura 5.11	- Variação da Velocidade Axial com a Coordenada Azimutal ($\varepsilon = 0,9 / k = 0,5$)	76
Figura 5.12	- Campo de Velocidade para Fluido não Newtoniano com Excentricidade Constante ($\varepsilon = 0,7$)	77
Figura 5.13	- Representação do Anular com Excentricidade Senoidal ($\lambda = L / \varphi = - \pi/2$)	79
Figura 5.14	- Produto $f \times Re$ para Diferentes Funções que Descrevem a Excentricidade, considerando um Fluido Newtoniano	80
Figura 5.15	- Produto $f \times Re$ para Diferentes Funções que Descrevem a Excentricidade, considerando um Fluido não Newtoniano	81
Figura 5.16	- Produto $f \times Re$ em Função da Amplitude da Excentricidade para $k = 0,5$	82
Figura 5.17	- Campo de Velocidade para Fluido não Newtoniano ($n = 0,8$), considerando Excentricidade Variável ($\varepsilon = 0,3 / k = 0,8$)	84
Figura 5.18	- Variação ao Longo da Direção Azimutal da Componente Axial da Velocidade ($n = 0,8 / \varepsilon = 0,3 / k = 0,8$)	85
Figura 5.19	- Variação ao Longo da Direção Azimutal da Componente Azimutal da Velocidade ($n = 0,8 / \varepsilon = 0,3 / k = 0,8$)	86
Figura 5.20	- Variação ao Longo da Direção Axial da Componente Axial da Velocidade ($n = 0,8 / \varepsilon = 0,3 / k = 0,8$)	88

Figura 5.21	- Variação ao Longo da Direção Axial da Componente Azimutal da Velocidade ($n = 0,8 / \varepsilon = 0,3 / k = 0,8$)	89
Figura 5.22	- Viscosidade Efetiva para Fluido não Newtoniano ($n = 0,8$), considerando Excentricidade Variável ($\varepsilon = 0,3 / k = 0,8$)	90
Figura 5.23	- Campo de Velocidade para Fluido não Newtoniano ($n = 0,8$), considerando Excentricidade Variável ($\varepsilon = 0,7 / k = 0,8$)	91
Figura 5.24	- Variação ao Longo da Direção Azimutal da Componente Axial da Velocidade ($n = 0,8 / \varepsilon = 0,7 / k = 0,8$)	92
Figura 5.25	- Variação ao Longo da Direção Azimutal da Componente Azimutal da Velocidade ($n = 0,8 / \varepsilon = 0,7 / k = 0,8$)	93
Figura 5.26	- Magnitude da Velocidade Azimutal em Relação à Velocidade Axial ao Longo da Direção Azimutal ($n = 0,8 / \varepsilon = 0,7 / k = 0,8$)	94
Figura 5.27	- Variação ao Longo da Direção Axial da Componente Axial da Velocidade ($n = 0,8 / \varepsilon = 0,7 / k = 0,8$)	95
Figura 5.28	- Viscosidade Efetiva para Fluido não Newtoniano ($n = 0,8$), considerando Excentricidade Variável ($\varepsilon = 0,7 / k = 0,8$)	96
Figura 5.29	- Campo de Velocidade para Fluido não Newtoniano ($n = 0,8$), considerando Excentricidade Variável ($\varepsilon = 0,3 / k = 0,5$)	97
Figura 5.30	- Variação ao Longo da Direção Azimutal da Componente Azimutal da Velocidade ($n = 0,8 / \varepsilon = 0,3 / k = 0,5$)	98

Lista de Tabelas

Tabela 2-1	- Funções Viscosidades	31
Tabela 5-1	- Solução Concêntrica para Fluido Newtoniano ($n = 1$)	65
Tabela 5-2	- Solução Concêntrica para Fluido não Newtoniano	66
Tabela 5-3	- Efeito da Variação do Número de Reynolds no Produto $f \times Re$	83

Lista de Símbolos

r	- coordenada radial
z	- coordenada axial
θ	- coordenada azimutal
R_i	- raio do cilindro interno
R_o	- raio do cilindro externo
k	- razão de raios do espaço anular
D_h	- diâmetro hidráulico do espaço anular
δ	- folga radial
L	- comprimento do espaço anular
Ω	- rotação do cilindro interno
$e(z)$	- excentricidade resultante da seção transversal
e_1	- excentricidade horizontal da seção transversal
e_2	- excentricidade vertical da seção transversal
R	- coordenada radial da parede do cilindro externo
α	- ângulo formado entre a direção da excentricidade resultante $e(z)$ e o vetor que representa $R(\theta, z)$
γ	- ângulo formado entre a direção da excentricidade resultante $e(z)$ e $\theta = 0^\circ$ (linha horizontal)
ρ	- massa específica do fluido
\vec{v}	- vetor velocidade
\vec{g}	- aceleração da gravidade
T	- tensor das tensões

τ	- tensor das tensões viscosas
$\dot{\gamma}$	- tensor taxa de deformação
p	- pressão
μ	- viscosidade do fluido Newtoniano
η	- função viscosidade
m	- índice de consistência do fluido
n	- índice de comportamento do fluido
u	- componente axial da velocidade
v	- componente radial da velocidade
w	- componente azimutal da velocidade
A	- amplitude da função senoidal que descreve a excentricidade ao longo do domínio
λ	- comprimento de onda da função senoidal que descreve a excentricidade ao longo do domínio
φ	- fase da função senoidal que descreve a excentricidade
$\bar{\mu}$	- viscosidade Newtoniana equivalente
τ_o	- tensão cisalhante na parede do cilindro externo
τ_i	- tensão cisalhante na parede do cilindro interno
$d\bar{p}/dz$	- gradiente de pressão axial modificado
U	- velocidade axial média de um dado elemento no domínio
W	- velocidade azimutal média de um dado elemento no domínio
Q	- vazão volumétrica na direção axial
Q_N	- vazão volumétrica na direção axial para um fluido Newtoniano
Q_θ	- vazão volumétrica na direção azimutal
Δp	- diferencial de pressão existente entre a seção de entrada e a seção de saída do espaço anular
f	- fator de atrito

Re	- número de Reynolds
Γ	- comprimento adimensional
ε	- excentricidade adimensional
e_c	- excentricidade característica
z^*	- coordenada axial adimensional
\bar{U}	- velocidade média axial do escoamento no espaço anular
U^*	- velocidade média axial adimensional para um elemento
W^*	- velocidade média azimutal adimensional para um elemento
χ	- magnitude da componente azimutal da velocidade em relação à componente axial
P_{ENT}	- pressão na seção de entrada do anular
P_{SAIDA}	- pressão na seção de saída do anular
Q_{ENT}	- vazão volumétrica na entrada do anular
NZ	- número de nós utilizados na discretização da direção axial
$N\theta$	- número de nós utilizados na discretização da direção azimutal
N	- número total de nós
i	- índice na direção axial
j	- índice na direção azimutal
$P_{i,j}$	- pressão do nó i, j
Δz	- tamanho do elemento na direção axial
$\Delta \theta$	- tamanho do elemento na direção azimutal
NI	- número de intervalos utilizados na integração numérica para dividir a faixa de integração
$\Delta \tau$	- tamanho do intervalo de integração
X	- vetor solução com a pressão em cada nó do domínio