



Jerry da Ressureição Geraldo Inácio

**Simulação do Regime Intermitente em Tubulações
Verticais Utilizando o Modelo de Dois Fluidos com
Diferentes Relações de Fechamento**

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. Angela Ourivio Nieckele
Co-orientador: João Neuenschwander Escosteguy Carneiro

Rio de Janeiro
Setembro de 2012



Jerry da Ressureição Geraldo Inácio

**Simulação do Regime Intermitente em Tubulações
Verticais Utilizando o Modelo de Dois Fluidos com
Diferentes Relações de Fechamento**

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.

Profa. Angela Ourivio Nieckele

Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica -PUC- Rio

Dr. João Neuenschwander Escoteguy Carneiro

Co-Orientador

Sintef do BRASIL

Prof. Eugênio Spano Rosa

UNICAMP

Dr. Igor Braga

Departamento de Engenharia Mecânica -PUC- Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Setembro de 2012

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

Jerry da Ressureição Geraldo Inácio

Graduou-se em Engenharia de Petróleo no Depto. de Engenharia de Petróleo da UGF (Universidade Gama Filho do Rio de Janeiro), em 2010. Atualmente trabalhando no Programa de simulação numérica de escoamento Bifásico em tubulação vertical.

Ficha Catalográfica

Inácio, Jerry da Ressureição Geraldo.

Simulação do regime intermitente em tubulações verticais utilizando o modelo de dois fluidos com diferentes relações de fechamento / Jerry da Ressureição Geraldo Inácio; orientador: Angela Ourivio Nieckele ; co-orientador: João Neuenschwander Escosteguy Carneiro. – 2012.

110 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Escoamento bifásico. 3. Escoamento intermitente. 4. Tubulação vertical. 5. Unidimensional. 6. Modelo de dois fluidos. 7. Relações de fechamento. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Carneiro, João Neuenschwander Escosteguy. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

A esperança é o sonho de um homem decidido – Aristóteles

Agradecimentos

A minha mãe e aos meus irmãos por seu amor, credibilidade e apoio incondicional.

A Edna Patricia Soares da Costa, minha noiva por todo o seu apoio nos momentos cruciais deste trabalho.

A Angela Ourivio Nieckele, minha orientadora, pela enorme paciência, amizade, conhecimento prestado em fim foi muito bom trabalhar com você durante estes anos.

Ao meu co-orientador João Neuenschwander Escoteguy Carneiro, Pelos conhecimentos prestados, pelo tempo dedicado a este trabalho, paciência e amizade.

Ao João Henrique Paulino de Azevedo pela ajuda na realização dos pós-processamentos dos dados.

Agradecimentos em particular a PUC-Rio e aos órgãos de fomento à pesquisa CNPq, e CAPES.

Resumo

Inácio, Jerry R. G; Nieckele, Angela, O; Carneiro, João N.E. **Simulação do Regime Intermitente em Tubulações Verticais Utilizando o Modelo de Dois Fluidos com Diferentes Relações de Fechamento**. Rio de Janeiro, 2012. 110p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Escoamentos intermitentes bifásicos são caracterizados pela sucessão de golfadas de líquido separadas por bolhas de diferentes tamanhos, escoando com frequência variável. A previsão deste tipo de escoamento é muito importante, uma vez que o mesmo pode ser encontrado em diversas aplicações industriais. No presente trabalho, é realizado um estudo do regime intermitente em tubulações verticais, utilizando o Modelo de Dois Fluidos uni-dimensional, juntamente como o método de Volumes Finitos. O Modelo de Dois Fluidos uni-dimensional requer a inclusão de diversas relações de fechamento para as fases líquida e gasosa. Estas relações devem representar realisticamente o fenômeno físico de interesse, e as equações resultantes devem ser bem postas. No presente trabalho, duas relações de fechamento foram consideradas: salto de pressão devido à curvatura da interface e parâmetro de distribuição de fluxo de quantidade de movimento. A presença do salto de pressão não se mostrou significativa, enquanto que o parâmetro relacionado a distribuição da fase líquida ampliou a região em que o sistema de equações é bem posto. Para os casos analisados, o parâmetro de distribuição da fase líquida apresentou influência nas características do escoamento. As principais grandezas do regime estatisticamente permanente, como comprimento e velocidade de translação da golfada e da bolha, foram comparadas com dados experimentais disponíveis na literatura, apresentando boa concordância.

Palavras-chave

Escoamento Bifásico; Escoamento Intermitente; Tubulação Vertical; Unidimensional; Modelo de Dois Fluidos; Relações de Fechamento.

Abstract

Inácio, Jerry R. G; Nieckele, Angela, O; Carneiro, João N.E (Advisor). **Simulation of Intermittent Flow in Vertical Pipes using the Two-Fluid Model with Different Closure Parameters.** Rio de Janeiro, 2012. 110p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Intermittent two phase flows are characterized by a succession of liquid slugs separated by bubbles of different sizes, with varying frequency. The prediction of this type of flow is very important, since it can be found in several industrial applications. In the present work, studies of intermittent flows in vertical pipes are performed, employing the Two Fluid Model along with the Finite Volume method. The one-dimensional Two Fluid Model requires the inclusion of several closure relations for both gas and liquid phases. These relations should realistically represent the physical phenomenon of interest, and the resulting equations should be well posed. In this work, two closure relations were considered: pressure jump due to the interface curvature and momentum flux distribution parameter. The inclusion of the pressure jump did not present a significant influence, whereas the momentum flux parameter of the liquid phase increased the region in which the system of equations is well posed. For the cases analyzed, the momentum flux parameter of the liquid phase affected the flow characteristics. The main statistical slug quantities, such as length and translational speed of the bubble and slug, were compared with experimental data available in the literature, showing good agreement.

Keywords

Two-Phase Flow; Slug Flow; Vertical Pipe; One-Dimensional; Two Fluid Model; Closure Parameters.

Sumário

1. Introdução	17
1.1. Regime Intermitente	19
1.2. Grandezas Características das Golfadas	21
1.3. Objetivo	22
1.4. Organização do Trabalho	22
2. Revisão Bibliográfica	24
2.1. Escoamento Intermitente	24
2.2. Simulação Numérica do Escoamento Intermitente	28
3. Modelo Matemático	33
3.1. Equações de Conservação	35
3.2. Parâmetros Geométricos	36
3.2.1. Escoamento Estratificado	36
3.2.2. Escoamento Anular	37
3.3. Equações de Estado	38
3.4. Tensões Cisalhantes	38
3.5. Parâmetro de Fluxo de Quantidade de Movimento (C_k)	40
3.6. Distribuição da Pressão Hidrostática	40
3.7. Salto de Pressão na Interface	42
3.7.1. Escoamento Estratificado	42
3.7.2. Escoamento Anular	43
3.8. Equações de Conservação de Quantidade de Movimento Linear	44
3.9. Análise de Hiperbolicidade	45
4. Método Numérico	53
4.1. Fração Volumétrica	54
4.2. Velocidades	55
4.3. Pressão	58
4.4. Volumes de Controle das Fronteiras	59
4.5. Malha Computacional e Critérios para o Passo de Tempo	60
4.6. Critério de Convergência	61
4.7. Procedimento de Execução	62
4.8. Formação da Golfada	63

4.9. Cálculos dos Parâmetros Médios das Golfadas	64
5. Resultados	67
5.1 Tubulação Horizontal	67
5.2 Tubulação Vertical	71
5.2.1. Análise do bom/mal condicionamento para escoamentos verticais	73
5.2.2. Influência dos parâmetros de fechamento	77
5.3. Configuração 1	85
5.4. Configuração 2	98
6. Comentários Finais	100
6.1. Conclusões	101
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	102
Referência Bibliográfica	103
Apendice A1	110

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Correlações para o fator de atrito.	39
Tabela 5.1– Propriedades do Fluido (Caso H).	67
Tabela 5.2 – Condições de Contorno para Casos Verticais bifásico	72

Lista de figuras

Figura 1.1. – Campo de Dália, Angola	17
Figura 1.2. - Padrões de Escoamento para Fluxos Horizontal e Vertical	18
Figura 1.3. – Padrão Intermitente	20
Figura 1.4. – Unidade Básica de uma Golfada	21
Figura 3.1 – Geometria Escoamento Estratificado	37
Figura 3.2. – Geometria do Escoamento Vertical	37
Figura 3.3. – Aproximação Hidrostática para o Perfil de Pressão no Escoamento Estratificado.	41
Figura 3.4. – Interface Gás-Líquido e Definições Geométricas para o Cálculo da Curvatura Carneiro (2006)	42
Figura 3.5. - Raios de Curvatura da Geometria Anular	44
Figura 4.1 - Volumes de Controle (a) Escalar e (b) Vetorial.	53
Figura 4.2. - Volumes de Controle (a) Entrada e (b) Saída	60
Figura 4.3. – Fluxograma Esquemático da Execução	63
Figura 4.4. - Ilustrações das Medições das Velocidades e Comprimento.	65
Figura 5.1. - Limite entre bem/mal posto para valores diferente do parâmetro de fluxo de quantidade de movimento (C_L e C_G), para escoamento horizontal.	68
Figura 5.2. - – Influência do parâmetro de fluxo de quantidade de movimento C_L , em função do espaçamento da malha. (a) <i>holdup</i> de líquido. (b) frequência de translação da golfada.	70
Figura 5.3. - Influência do parâmetro de fluxo de quantidade de movimento C_L , em função do espaçamento da malha.(a) comprimento da unidade de golfada (b) velocidade de translação da golfada	71
Figura 5.4. - Esquema dos experimentos.	72
Figura 5.5. - Mapa de padrões de escoamento para as duas configurações e os casos analisados.	73
Figura 5.6. - Influência do valor de C_L na linha de bem posto para escoamento vertical .	74

Figura 5.7. - Influência do valor de C_G nos limites de bom/mal condicionamento do modelo para escoamento vertical I	75
Figura 5.8. - Influência da curvatura transversal no salto de pressão nos limites de bom/mal condicionamento do modelo para escoamento vertical.	76
Figura 5.9. - Influência do comprimento de onda nos limites de bom/mal condicionamento do modelo para escoamento vertical.	76
Figura 5.10. - Influência dos termos de fechamento, juntamente com teste de malha para o duto curto.	78
Figura 5.11. - Influência dos termos de fechamento, juntamente com teste de malha para o duto real.	79
Figura 5.12. - Influência dos termos de fechamento na evolução espacial para Caso #1.	80
Figura 5.13. - Evolução temporal do holdup médio de líquido e o desvio padrão de para vários valores dos parâmetros de fluxo de quantidade de movimento do líquido..	81
Figura 5.14. - Influência do parâmetro de distribuição de fluxo de quantidade de movimento de líquido na evolução temporal do holdup de líquido instantâneo.	82
Figura 5.15. - Influência do parâmetro de distribuição de fluxo de quantidade de movimento de líquido na evolução espacial para Caso #1.	83
Figura 5.16. - Influência do parâmetro de distribuição de fluxo de quantidade de movimento de líquido próximo à saída do duto para Caso #1.	84
Figura 5.17. - Distribuição de pressão ao longo da seção de teste para o Caso # 1.	85
Figura 5.18. – Evolução espacial para o Caso #1.	87
Figura 5.19. - Histograma e PDFs para o Caso #1.	89
Figura 5.20. – Comparação de PDFs de comprimento de pistão para Caso #1	90
Figura 5.21. – Distribuição ao longo do Duto de algumas variáveis Caso #1	91

Figura 5.22. – Distribuição de pressão ao longo da seção de teste para o Caso #2	91
Figura 5.23. - Evolução espacial para o Caso #2.	92
Figura 5.24. - PDFs do comprimento da golfada para o Caso #2, em $x=4,68$ m.	93
Figura 5.25. - Distribuição de pressão ao longo da seção de teste para o Caso #3 e Caso # 4.	94
Figura 5.26. - Evolução espacial para o Caso #3 e Caso #4.	95
Figura 5.27. - PDFs do comprimento da golfada e da bolha para o Caso #3, em $x=4,68$ m.	96
Figura 5.28. - PDFs do comprimento da golfada e da bolha para o Caso #4, em $x=4,68$ m.	97
Figura 5.29. - Evolução espacial para o Caso #5.	98
Figura 5.30. - Evolução espacial para o Caso #6	99
Figura 5.31. - Evolução espacial para o Caso #7.	99

Lista de símbolos

A	Área da seção transversal da tubulação
D	Diâmetro da tubulação
C	Número de <i>Courant</i>
C_o	Parâmetro de distribuição
C_k	Parâmetro de fluxo de quantidade de movimento
f	Fator de fricção
Fr	Número de <i>Froude</i>
g	Aceleração da gravidade
h_L	Altura da superfície do líquido
L	Comprimento
P	Pressão interfacial e da fase gasosa
R	Constante do gás
Re	Número de <i>Reynolds</i>
S	Perímetro molhado
t	Tempo
T	Temperatura
U	Velocidade
\dot{V}	Vazão volumétrica
x	Coordenada axial

Símbolos gregos

α	Fração volumétrica da fase
β	Ângulo de inclinação da tubulação com respeito à horizontal
Δ	Variação de uma grandeza
γ	Fator de subrelaxação
μ	Viscosidade dinâmica

ν	Viscosidade cinemática
σ	Tensão cisalhante
π	Constante Pi
ρ	Massa específica
τ	Tensão de cisalhamento

Subscritos

e, w	Faces leste e oeste do volume de controle principal
E	Referente ao centro do volume principal de controle a leste
$entrada$	Entrada da tubulação
G	Fase gasosa
I	lésimo ponto nodal
i	Interface
k	Relativo a fase k
L	Fase líquida
m	Mistura
max	Máximo valor
P	Centro do volume de controle principal
ref	Referência
s	Referente a “slug”, ou golfada
$saída$	Saída da tubulação
sk	Superficial, relativa a fase k
TP	Bifásico
u	Unitário
w	Parede da tubulação
W	Corresponde ao volume de controle oeste ao volume principal

Sobrescritos

o	Referente ao passo de tempo anterior
-----	--------------------------------------

<i>ref</i>	Referência
\wedge	Grandeza aproximada mediante esquema <i>upwind</i>
\sim	Grandeza aproximada mediante interpolação linear
*	Referente a iteração anterior