



João Neuenschwander Escosteguy Carneiro

**Simulação Numérica de Escoamentos Bifásicos no
Regime de Golfadas em Tubulações Horizontais e
Levemente Inclínadas**

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.

Orientadora: Professora Angela Ourivio Nieckele

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2006



João Neuenschwander Escosteguy Carneiro

**Simulação Numérica de Escoamentos Bifásicos no
Regime de Golfadas em Tubulações Horizontais e
Levemente Inclinadas**

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

Profa. Angela Ourivio Nieckele

Orientadora

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Dr. Iberê Nascentes Alves

PETROBRAS

Dr. José Roberto Fagundes Netto

CENPES/PETROBRAS

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 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.

João Neuenschwander Escosteguy Carneiro

Graduou-se em Engenharia Mecânica na PUC-RJ no ano de 2003, tendo participado do programa de graduação sanduíche CAPES/DAAD no ano de 2001 na Technische Universität München (Munique, Alemanha)

Ficha Catalográfica

Carneiro, João Neuenschwander Escosteguy

Simulação numérica de escoamentos bifásicos no regime de golfadas em tubulações horizontais e levemente inclinadas / João Neuenschwander Escosteguy Carneiro ; orientadora: Angela Ourivio Nieckele. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005.

128 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Escoamento em golfadas. 3. Modelo de dois fluidos. 4. Tubulação horizontal e levemente inclinada. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Ao CNPq e à FAPERJ pelo apoio fornecido à pesquisa realizada.

Ao Dr. Iberê Nascentes Alves (PETROBRAS), pela motivação num tema tão interessante como o de escoamentos multifásicos aplicado à produção de petróleo.

Ao Prof. R. I. Issa (Imperial College), cujas sugestões foram de enorme importância ao desenvolvimento do presente trabalho.

Aos meus amigos, com os quais sempre compartilhei meus sucessos e fracassos, e que tornaram esta caminhada mais leve e tranqüila, proporcionando inúmeros momentos de alegria e descontração.

À Profa. Angela Ourivio Nieckele, primeiramente pela amizade durante quase todos os anos de minha vida acadêmica; e como orientadora, pela paciência em transmitir muito do seu valioso conhecimento, por sempre ter me dado oportunidades e espaço para o meu crescimento, e por nunca ter deixado de exigir o melhor de mim.

À minha família, Pai, Mãe, Irmã; ao apoio incondicional nas mais difíceis situações e decisões, e por constituírem sempre a referência fundamental da minha vida....vocês moram no meu coração!

À minha esposa e “musa inspiradora”, Vanessa, que sempre esteve do meu lado com esse brilho especial que a faz ser a pessoa cativante que me conquistou. Nossa convivência repleta de alegria e amor me faz uma pessoa melhor a cada dia!

Resumo

Carneiro, João N. E., Nieckele, Angela, O. **Simulação Numérica de Escoamentos Bifásicos no Regime de Golfadas em Tubulações Horizontais, Levemente Inclinadas.** Rio de Janeiro, 2006. 110p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Escoamentos bifásicos no regime de golfadas são caracterizados pela alternância de pacotes de líquido e grandes bolhas de gás na tubulação, sendo associados a altas perdas de carga, além de trazer uma indesejada intermitência aos escoamentos. O desenvolvimento do regime de golfadas em tubulações horizontais se dá a partir do escoamento estratificado em decorrência de dois fatores: do crescimento natural de pequenas perturbações (por um mecanismo de instabilidade do tipo *Kelvin-Helmholtz*) ou devido à acumulação de líquido causada por mudanças de inclinação no perfil do duto. O presente trabalho consiste da simulação numérica do surgimento das golfadas em ambas as situações descritas acima, assim como do subsequente desenvolvimento do escoamento neste padrão para um regime estatisticamente permanente. A previsão do escoamento é obtida utilizando-se uma formulação unidimensional baseada no Modelo de Dois Fluidos. Parâmetros médios das golfadas (comprimento, velocidade e frequência) são comparados com estudos numéricos e experimentais da literatura, obtendo-se uma concordância bastante satisfatória, especialmente dada a simplicidade de uma formulação unidimensional.

Palavras-chave

Escoamento em golfadas; Modelo de Dois Fluidos; tubulação horizontal e levemente inclinada.

Abstract

Carneiro, João N. E., Nieckele, Angela, O. **Numerical Simulation of Two-phase Slug Flow in Horizontal and Nearly Horizontal Pipes** Rio de Janeiro, 2004. 110p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Slug flow is a two-phase flow pattern which is characterized by the periodic presence of packs of liquid and long bubbles in the tube, associated with high pressure-drops and an often undesired intermittency in the system. The development of the slug pattern in horizontal pipes is caused by two reasons: the natural growth of small disturbances at the interface (by a *Kelvin-Helmholtz* instability mechanism) or the liquid accumulation at valleys of hilly terrain pipelines with sections of different inclinations. The present work consists of the numerical simulation of the onset of slugging in both situations, as well as the subsequent development of statistically steady slug flow in the pipe. The prediction of the flow is obtained through a one-dimensional formulation based on the Two-Fluid Model. Averaged slug parameters (length, velocity and frequency) are compared with previous numerical studies and experimental correlations available in the literature, and a very satisfactory agreement is obtained, specially given the simplicity of a one dimensional formulation.

Keywords

Slug flow; Two Fluid Model; horizontal pipeline; hilly terrain.

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Objetivo	5
1.2. Organização do Trabalho	6
2. Revisão bibliográfica	7
2.1. Padrões de Escoamento	7
2.2. Regime de Golfadas	13
2.2.1 Estudos Experimentais	13
2.2.2 Estudos Numéricos	15
3. Modelagem Matemática	21
3.1. Equações de Fechamento	24
3.2. Condições de Contorno e Iniciais	26
4. Método Numérico	31
4.1. Fração Volumétrica	32
4.2. Velocidades	34
4.3. Pressão	37
4.4. Condições de Contorno	38
4.5. Procedimento de Execução	40
4.6. Formação da Golfada	41
4.7. Malha Computacional e Passo de Tempo	42
4.8. Critério de Convergência	44
4.9. Cálculo dos Parâmetros Médios das Golfadas	44

5. Análise da Hiperbolicidade do Modelo de Dois Fluidos	47
5.1. Caso Incompressível	51
5.2. Caso Compressível	58
6. Resultados para Tubulações horizontais	61
6.1. Obtenção dos Regimes Estratificado e de Golfadas	62
6.2. Investigação da Influência do <i>Hold-up</i> de Líquido Inicial	63
6.3. Parâmetros Médios das Golfadas	66
6.3.1. Comprimento das Golfadas	68
6.3.2. Velocidade de Translação das Golfadas	71
6.3.3. Freqüência das golfadas	73
6.4. Investigação do Efeito do Salto de Pressão na Interface	77
7. Resultados para Tubulações Inclinadas	83
7.1. Obtenção dos Regimes Estratificado e de Golfadas	84
7.2. Características das Golfadas	86
7.2.1. Categoria 1	87
7.2.2. Categoria 2	90
8. Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros	94
Referências Bibliográficas	97
Apêndice A	104
Apêndice B	107
Apêndice C	108
Apêndice D	110

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Fórmulas para o cálculo do fator de atrito	25
Tabela 7.1 - Variação dos parâmetros médios das golfadas com a geometria da tubulação, em $x = 37\text{m}$, para $U_{sL} = 0,6$ m/s e $U_{sG} = 0,64$ m/s	89
Tabela 7.2 - Variação dos parâmetros médios das golfadas com a geometria da tubulação, para $U_{sL} = 1,22$ m/s e $U_{sG} = 1,3$ m/s.	92
Tabela D.1 - Conjunto de velocidades superficiais de líquido e gás e espaçamento da malha utilizados.	100

Lista de figuras

Figura 1.1 - Plataforma semi-submersível situada na Bacia de Campos	1
Figura 1.2 - Diagramas esquemáticos dos padrões de escoamento para os fluxos horizontal e vertical	2
Figura 1.3 - Ilustração do regime de golfada	3
Figura 1.4 - Mecanismo de Formação das Golfadas. (a) instabilidades de <i>Kelvin-Helmholtz</i> ; (b) acumulação de líquido devido à mudança de inclinação	4
Figura 1.5 - Ilustração do fenômeno da golfada severa	4
Figura 2.1 - Janela típica de visualização experimental de padrões de escoamento: padrão em golfadas.	9
Figura 2.2 - Mapa dos padrões de escoamento proposto por Baker (1954).	9
Figura 2.3 - Mapa generalizado de padrões de escoamento (<i>Barnea</i> , 1986)	11
Figura 2.4 - Sistema considerado por <i>Barnea</i> (1986).	12
Figura 2.5 - Comparação com os dados experimentais de <i>Shoham</i> (1962)	12
Figura 2.6 - Mapas de padrão de escoamento obtidos a partir da análise viscosa (—) e não-viscosa (----) de <i>Barnea</i> e <i>Taitel</i> (1994); e comparação com os dados experimentais (x x x) de <i>Shoham</i> (1962).	17
Figura 3.1 - Esquema da seção transversal da tubulação.	23
Figura 3.2 - Condições de contorno utilizadas	26
Figura 3.3 - Influência da viscosidade na relação entre os fatores K_V , K_{TD} críticos e a velocidade superficial do gás (<i>Barnea</i> e <i>Taitel</i> , 1994).	29
Figura 4.1 - Volumes de controle escalar (a) e vetorial (b) utilizados.	31
Figura 4.2 - Volumes de Controle próximos à entrada do domínio.	39

Figura 4.3 -	Volumes de Controle próximos à saída do domínio.	39
Figura 4.4 -	Fluxograma esquemático do procedimento de execução: Método PRIME.	40
Figura 4.5 -	Ilustração da medição da velocidade e do comprimento de cada golfada.	45
Figura 4.6 -	Sinal temporal típico do <i>hold-up</i> de líquido na posição $x = x_0$.	46
Figura 5.1 -	Mapas de U_{sL} vs. U_{sG} : Influência do número de onda nas curvas de transição para o modelo bem- e mal-posto.	57
Figura 6.1 -	Configuração utilizada: tubulação horizontal.	61
Figura 6.2 -	Mapa de padrões de escoamento; $D = 0,078$ m, tubulação horizontal e propriedades dos fluidos segundo Issa e Kempf (2003) e Bonizzi (2003).	63
Figura 6.3 -	Desenvolvimento do regime de golfadas na tubulação para $\alpha_L = 0,01$. (a); desenvolvimento do nível de líquido em equilíbrio, segundo Taitel e Dukler (1976); (b) crescimento de perturbações na interface até formar a golfada precursora.	64
Figura 6.4 -	Desenvolvimento do regime de golfadas na tubulação para $\alpha_L = 0,25$.	65
Figura 6.5 -	Curvas para $\alpha_L =$ constante, correspondentes aos valores do <i>hold-up</i> inicial das simulações preliminares ($U_{sL} = 3$ m/s e $U_{sG} = 0,55$ m/s); superpostas ao mapa de padrões de escoamento para a configuração utilizada.	66
Figura 6.6 -	Evolução dos perfis de <i>hold-up</i> com o tempo para o Caso 1: $U_{sL} = 0,55$ m/s e $U_{sG} = 2,18$ m/s .	67
Figura 6.7 -	Evolução dos perfis de <i>hold-up</i> com o tempo para o Caso 2: $U_{sL} = 0,625$ m/s e $U_{sG} = 2$ m/s .	68
Figura 6.8 -	Caso 1: $U_{sL} = 0,55$ m/s e $U_{sG} = 2,18$ m/s . Histograma do comprimento adimensional das golfadas próximo à saída da tubulação.	69
Figura 6.9 -	Caso 1: $U_{sL} = 0,55$ m/s e $U_{sG} = 2,18$ m/s. Evolução do	70

comprimento médio das golfadas ao longo da tubulação.

- Figura 6.10 - Caso 2: $U_{sL} = 0,625$ m/s e $U_{sG} = 2$ m/s. Histograma do comprimento adimensional das golfadas próximo à saída da tubulação. 70
- Figura 6.11 - Caso 2: $U_{sL} = 0,625$ m/s e $U_{sG} = 2$ m/s. Evolução do comprimento médio das golfadas ao longo da tubulação. 71
- Figura 6.12 - Evolução da velocidade média da frente e cauda das golfadas ao longo da tubulação; Caso 1: $U_{sL} = 0,55$ m/s e $U_{sG} = 2,18$ m/s . 72
- Figura 6.13 - Evolução da velocidade média da frente e cauda das golfadas ao longo da tubulação; Caso 2: $U_{sL} = 0,625$ /s e $U_{sG} = 2$ m/s . 73
- Figura 6.14 - Razão entre as constantes $C_{o\ num}$, obtidas numericamente, e $C_{o\ exp}$ ($C_{o\ exp} = 1,05$, se $U_M < 3,06$ m/s; $C_{o\ exp} = 1,2$, se $U_M > 3,06$ m/s), da correlação de Bendiksen (1984). 73
- Figura 6.15 - Variação do *hold-up* do líquido com o tempo para $x = 15$ m. Caso 1. 74
- Figura 6.16 - Variação do *hold-up* do líquido com o tempo para $x = 30$ m. Caso 1 74
- Figura 6.17 - Distribuição da freqüência com o tempo obtida para o Caso 1, em $x = 30$ m. 74
- Figura 6.18 - Distribuição da freqüência com o tempo obtida para o Caso 2, em $x = 30$ m. 75
- Figura 6.19 - Comparação dos valores médios da freqüência com a correlação de Gregory e Scott (1969), para $U_{sL} = 0,55$ m/s. 75
- Figura 6.20 - Comparação dos valores médios da freqüência com a correlação de Gregory e Scott (1969), para $U_{sL} = 0,625$ m/s. 76
- Figura 6.21 - Comparação dos valores médios da freqüência com a correlação de Gregory e Scott (1969), para $U_{sL} = 1$ m/s. 76

Figura 6.22 - Razão entre as freqüências na próximo à região de formação das golfadas ($x = 15$ m) e próximo à saída da tubulação ($x = 30$ m).	77
Figura 6.23 - Evolução dos perfis de <i>hold-up</i> com o tempo: $U_{sL} = 1$ m/s e $U_{sG} = 2$ m/s; $\Delta x/D = 2,64$.	78
Figura 6.24 - Evolução dos perfis de <i>hold-up</i> com o tempo: $U_{sL} = 1$ m/s e $U_{sG} = 2$ m/s; $\Delta x/D = 1,32$.	79
Figura 6.25 - Evolução dos perfis de <i>hold-up</i> com o tempo: $U_{sL} = 1$ m/s e $U_{sG} = 2$ m/s; $\Delta x/D = 0,33$.	79
Figura 6.26 - Influência da do espaçamento da malha na freqüência das golfadas: (a) $U_{sL} = 0,625$ m/s e $U_{sG} = 2$ m/s; (b). $U_{sL} = 1$ m/s e $U_{sG} = 2$ m/s	80
Figura 6.27 - Influência do espaçamento da malha na freqüência média das golfadas, sem e com o salto de pressão interfacial; (a) $U_{sL} = 0,625$ m/s e $U_{sG} = 3,1$ m/s; e (b) $U_{sL} = 1$ m/s e $U_{sG} = 2$ m/s.	81
Figura 6.28 - Variação da influência relativa do termo fonte na equação discretizada com o espaçamento da malha para $U_{sL} = 0,625$ m/s e $U_{sG} = 3,1$ m/s, e $U_{sL} = 1$ m/s e $U_{sG} = 2$ m/s.	82
Figura 7.1 - Configurações utilizadas: a) tubulação horizontal; (b) levemente inclinada. (c) tubulação em "V".	84
Figura 7.2 - Mapa de padrões de escoamento; $D = 0,0508$ m, tubulação horizontal ($\beta = 0^\circ$), e propriedades dos fluidos segundo Al Safran et al. (2005).	85
Figura 7.3 - Mapa de padrões de escoamento; $D = 0,0508$ m, tubulação descendente ($\beta = -1,93^\circ$), e propriedades dos fluidos segundo Al Safran et al. (2005).	85
Figura 7.4 - Evolução dos perfis de <i>hold-up</i> com o tempo: $U_{sL} = 0,6$ m/s e $U_{sG} = 0,64$ m/s; tubulação horizontal.	88
Figura 7.5 - Evolução dos perfis de <i>hold-up</i> com o tempo: $U_{sL} = 0,6$ m/s e $U_{sG} = 0,64$ m/s; tubulação descendente.	88
Figura 7.6 - Evolução dos perfis de <i>hold-up</i> com o tempo:	89

	$U_{sL} = 0,6$ m/s e $U_{sG} = 0,64$ m/s; tubulação seção em “V”	
Figura 7.7 -	Evolução dos perfis de <i>hold-up</i> com o tempo:	91
	$U_{sL} = 1,22$ m/s e $U_{sG} = 1,3$ m/s; tubulação horizontal	
Figura 7.8 -	Evolução dos perfis de <i>hold-up</i> com o tempo: $U_{sL} = 1,22$ m/s e $U_{sG} = 1,3$ m/s; tubulação descendente.	91
Figura 7.9 -	Evolução dos perfis de <i>hold-up</i> com o tempo:	92
	$U_{sL} = 1,22$ m/s e $U_{sG} = 1,3$ m/s; seção em “V”.	
Figura 7.10 -	Variação do comprimento médio das golfadas ao longo da tubulação: $U_{sL} = 1,22$ m/s e $U_{sG} = 1,3$ m/s; tubulação horizontal, descendente e seção em “V”.	93

Lista de símbolos

A	Área da seção transversal da tubulação
\mathbf{A}	Matriz Jacobiana do sistema característico
\mathbf{B}	Matriz Jacobiana do sistema característico
D	Diâmetro da tubulação
\mathbf{C}	Vetor coluna do sistema característico
C	Número de <i>Courant</i>
c	Velocidade do som
C_o	Parâmetro de distribuição
E_o	Número de <i>Eötvös</i>
f	Fator de fricção
Fr	Número de <i>Froude</i>
g	Aceleração da gravidade
h_L	Altura da superfície do líquido
L_s	Comprimento das golfadas
P	Pressão interfacial e da fase gasosa

R	Constante do gás
Re	Número de <i>Reynolds</i>
S	Perímetro molhado
s	Coefficiente de correção
t	Tempo
T	Temperatura de referência
U_d	Velocidade de “ <i>drift</i> ”
U_K	Velocidade da fase K
U_M	Velocidade da mistura
U_{sK}	Velocidade superficial da fase K
U_t	Velocidade de translação da golfada
x	Coordenada axial

Símbolos gregos

α	Fração volumétrica da fase
β	Ângulo de inclinação da tubulação com respeito à horizontal
\mathcal{D}	Diâmetro corrigido
Δ	Varição de uma grandeza / Discriminante da equação do 2º grau
ϕ	Grandeza a ser calculada
Φ	Vetor solução do sistema de autovalores
γ	Fator de subrelaxação
γ^*	Razão de calores específicos
κ	Curvatura da interface
k_p	Número de onda da perturbação
λ_p	Comprimento de onda da perturbação
λ	Autovalores da análise característica
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ν_s	Frequência das golfadas
π	Constante Pi
\wp	Parâmetro auxiliar referente a derivada de h_L com respeito à α_L

ρ	Massa específica
σ	Tensão superficial
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
L	Fase líquida
M	Mistura
max	Máximo valor
N	Número total de nós no domínio / medidas realizadas
n	n-ésima medida
P	Referente ao centro do volume de controle principal
p	Referente à perturbação
r	Relativa
ref	Referência
s	Referente a “slug”, ou golfada
$saída$	Saída da tubulação
t	Translação
w	Parede da tubulação
W	Referente ao centro do volume principal de controle a leste

Sobrescritos

o	Referente ao passo de tempo anterior
ref	Referência

- ^ Referente a uma grandeza aproximada mediante o esquema *upwind*
- ~ Referente a uma grandeza aproximada
- * Referente à iteração anterior

“O homem é do tamanho dos seus sonhos”.

Fernando Pessoa