



Arturo Jesús Ortega Malca

**Análise do Padrão *Slug* em Tubulações Horizontais
Utilizando o Modelo de Dois Fluidos**

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 Engenharia Mecânica.

Orientadora: Professora Angela Ourivio Nieckele

Rio de Janeiro
Julho de 2004



Arturo Jesús Ortega Malca

**Análise do Padrão *Slug* em Tubulações Horizontais
Utilizando o Modelo de Dois Fluidos**

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

Professora Angela Ourivio Nieckele

Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Professora Mônica Feijó Naccache

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Professor Luis Fernando Gonçalves Pires

Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento - Ctex

Professor José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Julho de 2004

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

Arturo Jesús Ortega Malca

Graduou-se em Engenharia Mecânica-Elétrica na Universidad Nacional de Ingeniería (Lima, Peru).

Ficha Catalográfica

Ortega Malca, Arturo Jesús

Análise do padrão *slug* em tubulações horizontais utilizando o modelo de dois fluidos / Arturo Jesús Ortega Malca ; orientadora: Angela Ourivio Nieckele. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

104 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Escoamento bifásico. 3. Padrão *slug*. 4. Modelo de dois fluidos. 5. Tubulação horizontal. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para Pilar, minha noiva, expressão de amor e ternura feita pessoa.

Agradecimentos

À minha orientadora a Professora Angela O. Nieckele, pela motivação para realizar este trabalho e pelos conhecimentos fornecidos, ainda mais por todo o apoio e amizade que encontrei da senhora desde minha chegada à PUC-RJ.

Ao Professor R. I. Issa do Imperial College, por suas “dicas”, sugestões e por ter respondido a todas minhas questões sobre suas pesquisas.

Ao Doutor Marco Bonizzi do Imperial College, de igual maneira por seus conselhos, sugestões, respostas e por ter fornecido sua tese, importante bibliografia para este trabalho.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Ortega Malca, Arturo Jesús; Ourivio Nieckele, Angela. **Análise do Padrão Slug em Tubulações Horizontais Utilizando o Modelo de Dois Fluidos.** Rio de Janeiro, 2004. 104p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Diversos processos práticos apresentam uma seqüência de diferentes configurações de escoamentos bifásicos, com diferentes padrões de escoamento. Dependendo das razões entre as velocidades superficiais do gás e do líquido, diferentes padrões de escoamento bifásico podem ser encontrados. O padrão de escoamento *slug* pode ser formado a partir do padrão estratificado, devido ao crescimento das instabilidades hidrodinâmicas ou devido às ondulações no terreno onde se instala a tubulação. O presente trabalho consiste na análise do escoamento bifásico no padrão *slug*, ao longo de tubulações horizontais, mediante a aplicação do modelo de dois fluidos em sua forma transiente e unidimensional. Através de uma análise de estabilidade de Kelvin-Helmholtz para escoamento estratificado, estima-se a possível faixa de operação para a obtenção de um modelo matemático *bem posto*. Diferentes técnicas de discretização foram implementadas e testadas. Comparações com dados disponíveis na literatura foram realizadas.

Palavras-chave

Escoamento bifásico; padrão *slug*; modelo de dois fluidos; unidimensional; tubulação horizontal.

Abstract

Ortega Malca, Arturo Jesús; Ourivio Nieckele, Angela. **Analysis of Slug flow in Horizontal Pipelines by the Two Fluid Model**. Rio de Janeiro, 2004. 104p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Several practical processes show a sequence of different configurations of two-phase flows, with different flows pattern. Depending upon the relation between the superficial velocities of gas and liquid, different two-phase flows patterns can be found. Slug flow can be formed from the stratified flow, due to growth of hydrodynamic instabilities or due to undulations of the surface where the pipes are installed. The present work consists in the analysis of two-phase flow in slug flow through horizontal pipes using the two-fluid model in its transient and one-dimensional form. By means of a Kelvin-Helmholtz stability analysis for stratified flows, the operation range for obtaining of a *well-posed* mathematical model is estimated. Different techniques of discretization were implemented and tested. Comparisons with result obtained in the literature were done.

Keywords

Two-phase flow; *slug* flow; two fluid model; one-dimensional; horizontal pipeline.

Sumário

1. Introdução	18
1.1. Revisão bibliográfica	20
1.2. Objetivo	23
1.3. Organização do trabalho	24
2. Modelagem matemática	25
2.1. Equações governantes	25
2.2. Condições de contorno e iniciais	31
2.3. Natureza das equações e a estabilidade do escoamento	32
3. Método numérico	37
3.1. Formulação conservativa	38
3.1.1. Fração volumétrica	38
3.1.2. Velocidades	40
3.1.3. Pressão	44
3.2. Formulação não conservativa	46
3.2.1. Fração volumétrica	46
3.2.2. Velocidades	47
3.2.3. Pressão	49
3.3. Condições de contorno	49
3.4. Formação do <i>slug</i>	54
3.5. Malha computacional	55
3.6. Critério de passo de tempo	55
3.7. Critério de convergência	56
3.8. Solução do sistema algébrico	56
3.9. Procedimento de execução	58
3.9.1. PRIME revisado	58

3.9.2. PISO	62
3.9.2.1. Velocidades	62
3.9.2.2. Pressão	63
3.9.2.3. Passo preditor	63
3.9.2.4. Primeiro passo corretor	64
3.9.2.5. Segundo passo corretor	66
3.9.2.6. Procedimento de execução do PISO	68
4. Análise de Resultados	71
4.1. Efeito do <i>hold-up</i> líquido de equilíbrio	80
4.2. Efeito do algoritmo de acoplamento velocidade - pressão	83
4.3. Influência da forma de discretização das grandezas	86
4.4. Influência do perfil da pressão na condição inicial	89
4.5. Influência da utilização da forma não conservativa	93
4.6. Comentários finais	94
5. Conclusão	96
6. Referências bibliográficas	99
7. Bibliografia recomendada	104

Lista de tabelas

Figura 1.1 - Interpolações do fluxo de massa, na face do volume de controle principal	59
Tabela 4.1 - Interpolações do fluxo de massa, na face do volume de controle principal	86

Lista de figuras

Figura 1.2 - Ilustração do padrão <i>slug</i> , obtido em laboratório	18
Figura 1.3 - Escoamento <i>slug</i> “areado”	19
Figura 1.4 - Tubulação inclinada submarina	20
Figura 2.1 - Esquema da tubulação	30
Figura 2.2 - Esquema da seção transversal da tubulação	30
Figura 2.3 - Condições de contorno	32
Figura 2.4 - Mapa do padrão de escoamento de Taitel & Dukler (1976)	32
Figura 2.5 - Mapa do padrão de escoamento de Taitel & Dukler (1976) junto com a curva de estabilidade obtida por Bonizzi (2003)	35
Figura 3.1 - Volume de controle escalar e vetorial	37
Figura 3.2 - Volume de controle para a fração volumétrica	38
Figura 3.3 - Volume de controle para as velocidades	41
Figura 3.4 - Volume de controle para a pressão	44
Figura 3.5 - Volume de controle próximo à entrada	50
Figura 3.6 - Volume de controle próximo à saída	51
Figura 3.7 - Malha genérica	56
Figura 3.8 - Diagrama de fluxo do procedimento numérico PRIMER. Modelo conservativo	60
Figura 3.9 - Diagrama de fluxo do procedimento numérico PRIMER. Modelo não conservativo	61
Figura 3.10 - Diagrama de fluxo do procedimento numérico PISO. Modelo conservativo	70
Figura 4.1 - Configuração utilizada	71
Figura 4.2 - Distribuição do <i>hold-up</i> líquido ao longo da tubulação para diferentes instantes de tempo (Issa & Kempt, 2003). $Us_g = 2,0$ m/s e $Us_l = 1,0$ m/s	73

Figura 4.3 - Distribuição do <i>hold-up</i> líquido ao longo da tubulação para diferentes instantes de tempo, presente trabalho. $U_{Sg}=2,0$ m/s e $U_{Sl}=1,0$ m/s	73
Figura 4.4 - Distribuição do <i>hold-up</i> líquido ao longo da tubulação para diferentes instantes de tempo (Bonizzi, 2003). $U_{Sg} = 6,532$ m/s e $U_{Sl}= 0,532$ m/s	74
Figura 4.5 - Distribuição do <i>hold-up</i> líquido ao longo da tubulação para diferentes instantes de tempo, presente trabalho. $U_{Sg}= 6,532$ m/s e $U_{Sl}= 0,532$ m/s	74
Figura 4.6 - Distribuição do <i>hold-up</i> líquido ao longo da tubulação para diferentes instantes de tempo, (Bonizzi, 2003). $U_{Sg} = 3,0$ m/s e $U_{Sl}= 0,55$ m/s	75
Figura 4.7 - Distribuição do <i>hold-up</i> líquido ao longo da tubulação para diferentes instantes de tempo, presente trabalho. $U_{Sg} = 3,0$ m/s e $U_{Sl}= 0,55$ m/s	76
Figura 4.8 - Localização dos casos testados no mapa do padrão de escoamento de Taitel & Dukler (1976)	77
Figura 4.9 - Análise de estabilidade de Kelvin Helmholtz $U_{Sg}= 6,0$ m/s e $U_{Sl}= 0,3$ m/s	79
Figura 4.10 - Evolução do <i>hold-up</i> líquido no espaço e tempo, $U_{Sg} = 6,0$ m/s e $U_{Sl}= 0,3$ m/s; $k = 0,25$; algoritmo PRIMER	80
Figura 4.11 - Análise de estabilidade de Kelvin Helmholtz $U_{Sg}= 6,0$ m/s e $U_{Sl}= 0,4$ m/s	81
Figura 4.12 - Evolução do <i>hold-up</i> líquido no espaço e tempo, $U_{Sg} = 6,0$ m/s e $U_{Sl}= 0,4$ m/s; $k = 0,25$; $\alpha_l^{eq} = 0,566$; algoritmo PRIMER	82
Figura 4.13 - Evolução do <i>hold-up</i> líquido no espaço e tempo, $U_{Sg} = 6,0$ m/s e $U_{Sl}= 0,4$ m/s; $k = 0,25$; algoritmo PRIMER	83
Figura 4.14 - Evolução do <i>hold-up</i> líquido no espaço e tempo, $U_{Sg} = 6,0$ m/s e $U_{Sl}= 0,4$; $k = 0,25$; algoritmo PISO	84
Figura 4.15 - <i>Hold-up</i> líquido ao longo da tubulação em $t = 12,55$ s	85
Figura 4.16 - Distribuição de pressão ao longo da tubulação em $t = 12,55$ s	85

Figura 4.17 - Distribuição da velocidade do gás ao longo da tubulação em $t = 12,55$ s	86
Figura 4.18 - Influência no <i>hold-up</i> líquido da aproximação do fluxo de massa nas faces do volume de controle, para $t = 3,5$ s	87
Figura 4.19 - Influência na velocidade do gás da aproximação do fluxo de massa nas faces do volume de controle, para $t = 3,5$ s	88
Figura 4.20 - Influência na pressão da aproximação do fluxo de massa nas faces do volume de controle, para $t = 3,5$ s	88
Figura 4.21 - Influência no <i>hold-up</i> líquido da aproximação do fluxo de massa nas faces do volume de controle	89
Figura 4.22 - Influência do perfil inicial de pressão no <i>hold-up</i> líquido, $t = 0,5$ s	90
Figura 4.23 - Influência do perfil inicial de pressão na velocidade do gás, $t = 0,5$ s	91
Figura 4.24 - Influência do perfil inicial de pressão na pressão, $t=0,5$ s	91
Figura 4.25 - Influência do perfil inicial de pressão no <i>hold-up</i> líquido, $t = 12,55$ s	92
Figura 4.26 - Influência do perfil inicial de pressão na velocidade do gás, $t = 12,55$ s	92
Figura 4.27 - Influência do perfil inicial de pressão na pressão, $t = 12,55$ s	93
Figura 4.28 - Evolução do <i>hold-up</i> líquido no espaço e tempo, $Us_g = 6,0$ m/s e $Us_l = 0,4$ m/s; $k = 0,25$; algoritmo PRIMER não conservativo	94

Lista de símbolos

a	Coeficiente da equação do sistema algébrico
A	Área da secção transversal da tubulação
b	Termo fonte da equação do sistema algébrico
B	Variável usada no cálculo recursivo do método TDMA
D	Diâmetro da tubulação
F	Fluxo convectivo
\tilde{F}	Pseudo fluxos convectivos
\hat{F}	Força de fricção ou cisalhamento por unidade de volume
f	Fator de fricção
g	Aceleração da gravidade
h	Altura da superfície do líquido
\hat{h}	Altura da superfície do líquido adimensional
\dot{m}	Transferência de massa por unidade de volume entre as fases
P	Pressão interfacial e da fase gasosa
Q	Variável usada no cálculo recursivo do método TDMA
R	Constante do gás
Re	Número de Reynolds
S	Perímetro molhado
t	Tempo
T	Temperatura de referência
u	Velocidade da fase
\hat{u}	Pseudo velocidade da fase
U_s	Velocidade superficial da fase
VC	Volume de controle
x	Coordenada axial

Símbolos gregos

α	Fração volumétrica da fase
$\hat{\alpha}$	Fração volumétrica da fase aplicando o esquema <u>Upwind</u>
β	Ângulo de inclinação da tubulação com respeito ao horizontal
ρ	Densidade / massa específica
τ	Tensão de cisalhamento
μ	Viscosidade dinâmica
∇	Volume
Δ	Variação da grandeza
γ	Fator de subrelaxação
ϕ	Grandeza a ser calculada

Subscritos

e, w	Face este e oeste do VC
E	Referente ao centro do VC vizinho a este
g	Fase gasosa
i	Interface
$inlet$	Entrada da tubulação
I	Nó I
l	Fase líquida
max	Referente ao major valor
N	Número total de nós em todo o domínio
$outlet$	Saída da tubulação
P	Referente ao centro do VC
r	Relativa
ref	Referência
w	Parede da tubulação
W	Referente ao centro do VC vizinho a oeste

Superscript

- o Referente ao passo de tempo anterior
- $*$ Referente à iteração anterior
- $+$ Referente a uma grandeza ainda não corrigida ou um processo intermediário
- \wedge Referente a uma grandeza aproximada mediante o esquema Upwind
- \sim Referente a uma grandeza que deve ser aproximada
- s Referente à velocidade superficial

“El valor, la habilidad y la constancia corrigen la mala fortuna”.

Simón Bolívar