

ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA DE  
ONDAS NO ESCOAMENTO ESTRATIFICADO ÓLEO-ÁGUA EM  
TUBULAÇÃO LEVEMENTE INCLINADA

Diego Oliveira de Mello

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço... 02./06./08

Ass.: ..... Carol

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia  
de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
como parte dos requisitos para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Mecânica.

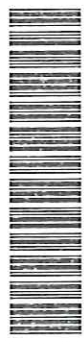
Orientador: Prof. Dr. Oscar Maurício Hernandez  
Rodriguez



São Carlos

2007

DEDALUS - Acervo - EESC



31100109136

Class.	TESE ✓
Cult.	6634
Tombo	T101108
Sysno	1668545

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA  
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,  
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M527e

Mello, Diego Oliveira de

Estudo experimental e modelagem matemática de ondas no escoamento estratificado óleo-água em tubulação levemente inclinada / Diego Oliveira de Mello ; orientador Oscar Mauricio Hernandez Rodriguez. -- São Carlos, 2007.


Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Térmica e Fluidos) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.


1. Escoamento bifásico.
2. Escoamento água-óleo.
3. Escoamento estratificado.
4. Estrutura ondulatória.
5. Tubulações levemente inclinadas. I. Título.

**FOLHA DE JULGAMENTO**


Candidato: Licenciado **DIEGO OLIVEIRA DE MELLO**


Dissertação defendida e julgada em 08/10/2007 perante a Comissão Julgadora:

  
Prof. Dr. **OSCAR MAURICIO HERNANDEZ RODRIGUEZ (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

  
Prof. Associado **PAULO SELEGHIM JUNIOR**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

  
Dr. **GERALDO AFONSO SPINELLI MARTINS RIBEIRO**  
(Petróleo Brasileiro S.A./PETROBRAS) APROVADO

  
Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica

  
Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**  
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

4  
1  
3

2  
4  
3

2  
1  
0

## *Dedicatória*

Dedico este trabalho aos meus avós Wenseslau Taváres de Mello e Air Luzia Carvalho de Mello.

Aos meus pais, Jonas Carvalho de Mello e Elisabete Barbosa de Oliveira.

Aos meus Tios Luiza e Isaac.

A Maria Vilma, atual companheira do meu Pai.

Aos meus irmãos, sejam esses por parte de Pai ou Mãe.

A toda a minha Família "Oliveira" e "Mello", que fizeram parte da minha ótima formação.

A minha namorada Eugenia Acácia Jorge pela compreensão, companheirismo e por existir na minha vida, tornando-a muito melhor a cada dia.

A todos os meus fieis amigos que me acompanham, não importando o tempo ou a presença corporal e sim a valiosa amizade.



## ***Agradecimentos***

A Deus, que vem me dando muitas graças ao longo da minha vida.

Ao Professor Dr. Oscar Maurício Hernandez Rodriguez por todo o conhecimento transmitido.

A Fapesp pelos equipamentos concedidos e pelo financiamento do Projeto Fapesp nº 04/13374-7 que permitiu a realização do trabalho de pesquisa.

Ao Núcleo de Engenharia Térmica e Fluídos – Escola de Engenharia de São Carlos por toda a infra-estrutura e acolhimento.

Aos Professores Dr. Sérgio Rodrigues Fontes, Dr. Paulo Seleglim Júnior e Dr. Fernando Eduardo Milioli.

A todos os meus professores e amigos da Universidade de São Paulo.

Aos Técnicos Roberto Lourenço, Roberto Prativiera, Theodomiro Fernando Luchesi, Hélio J. D. Trebi, Jorge Nicolau dos Santos, José F. Torres, José Bogni e Donizete Luchesi.

Aos companheiros (as) de trabalho Israel, Gustavo, Fabio, Marcelo, Analice, Grazielle, Francisco, Marcus, Sandro, Lúcio, Sérgio, Graziela, Érica, Rodrigo, Renato, Anderson e a mais nova Iara.





## **Resumo**

**MELLO, D.O. 2007.** *Estudo Experimental e Modelagem Matemática de Ondas no escoamento estratificado óleo-água em tubulação levemente inclinada.* 90. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos 2007.

Embora o escoamento estratificado óleo-água seja comum na Indústria do petróleo, existem poucos trabalhos na literatura sobre a estrutura ondulatória encontrada no escoamento em dutos ascendentes ou descendentes. O objetivo deste trabalho é entender e caracterizar as estruturas interfaciais ondulatórias em escoamentos estratificados óleo e água em dutos levemente inclinados e comparar com os resultados retirados da modelagem proposta. Uma primeira tentativa de modelar a onda interfacial óleo-água através da equação da energia bifásica unidimensional para regime permanente é apresentada e comparada aos resultados obtidos experimentalmente. Valores de comprimento de onda foram coletados para quatro ângulos de inclinação a partir da horizontal ( $-5^\circ$ ,  $-2^\circ$ ,  $2^\circ$  e  $5^\circ$ ) e diversos pares de vazão de óleo e água. Os dados foram extraídos de *frames* de vídeos de alta resolução através de uma técnica manual. Um software baseado em LabView<sup>®</sup> foi desenvolvido para possibilitar a automação da obtenção do comprimento de onda e amplitude. Os comprimentos de onda obtidos com a técnica automática foram comparados com os dados obtidos através da técnica manual. O mensuramento é bem satisfatório e sugere que a ferramenta experimental proposta possa ser aplicada para o estudo de qualquer padrão de escoamento óleo-água, onde uma estrutura ondulatória possa ser identificada. A validade da modelagem da onda interfacial proposta foi avaliada através da comparação entre os resultados teóricos e dados experimentais. A concordância observada é encorajadora.

**Palavras-chave:** Escoamento bifásico, Escoamento óleo-água, Escoamento estratificado, Estrutura ondulatória, Tubulações levemente inclinadas.



## *Abstract*

**MELLO, D.O.(2007).** *Experimental study and mathematical modeling of waves in slightly-inclined oil-water stratified pipe flow.* 90. *Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos 2007.*

*Even though the oil-water stratified flow pattern has a common occurrence in the upstream oil industry, quite often in directional wells, there are only a few works in the literature dealing with its interfacial wavy structure. This work has the main goal of comprehending and characterizing the interfacial wave structure in inclined water-oil stratified pipe flow, comparing it with the proposed model. A model, based on the steady-state one-dimensional two-phase flow energy equation is presented and compared to our experimental data. Wave lengths and amplitude data were collected at four inclinations from the horizontal ( $-5^\circ$ ,  $-2^\circ$ ,  $2^\circ$  and  $5^\circ$ ) and several oil and water flow rates. The data were extracted from high-resolution video images through a manual technique. A LabView® based software was developed in order to obtain the lengths and amplitude automatically. Wave length obtained from it were compared to the manual technique data. The satisfactory measurement suggests the applicability of the experimental tool to any water-oil pipe flow pattern, where a wave structure can be identified. The validity by the comparison between theoretical and experimental data. The agreement observed is promising.*

**Keywords:** *Wavy structure, Oil-water flow, Stratified flow, Interfacial wave, Slightly-inclined pipe.*



## Lista de Figuras

FIGURA 1. TIPOS DE ESCOAMENTO BIFÁSICO ÓLEO-ÁGUA. ....	6
FIGURA 2 - ESCOAMENTO BIFÁSICO ÓLEO-ÁGUA (ESTRATIFICADO) E RESPECTIVAS VELOCIDADES E ÁREAS DE SEÇÃO TRANSVERSAL <i>IN SITU</i> . ....	7
FIGURA 3 - ESCOAMENTO ESTRATIFICADO – ST (ALKAYA ET AL., 2000) .....	10
FIGURA 4 - ESCOAMENTO ESTRATIFICADO COM MISTURA NA INTERFACE – ST & MI (ALKAYA ET AL., 2000) .....	10
FIGURA 5 - DISPERSÃO DE ÓLEO EM ÁGUA JUNTAMENTE COM UMA CAMADA DE ÁGUA BEM DEFINIDA – Do/w & w (ALKAYA ET AL., 2000) .....	10
FIGURA 6 - EMULSÃO DE ÓLEO EM ÁGUA – Do/w (ALKAYA ET AL., 2000) .....	10
FIGURA 7 - DISPERSÃO DE ÁGUA EM ÓLEO E DE ÓLEO EM ÁGUA – Dw/o & Do/w (ALKAYA ET AL., 2000).....	11
FIGURA 8 - EMULSÃO DE ÁGUA EM ÓLEO – Dw/o (ALKAYA ET AL., 2000) .....	11
FIGURA 9 - ESTRATIFICADO LISO (ST). ESTRATIFICADO COM MISTURA NA INTERFACE (ST&MI). DISPERSÃO DE ÓLEO EM ÁGUA E ÁGUA (Do/w&w). DISPERSÃO HOMOGÊNEA DE ÓLEO EM ÁGUA (o/w).DISPERSÃO DE ÁGUA EM ÓLEO E ÓLEO EM ÁGUA (w/o OU Dw/o & Do/w) ESTRATIFICADO COM MISTURA NA INTERFACE (SW). .	16
FIGURA 10 VARIAÇÃO DE ONDAS EM ESCOAMENTO DESCENDENTE É MENOR PARA (A) DO QUE PARA (B).: (A)--- POSSÍVEL ESCOAMENTO PISTONADO; (B)—ESCOAMENTO ONDULADO. DYMENT, A., BOUDLAL, A., (2004).	19
FIGURA 11 - UMA ILUSTRAÇÃO DO MECANISMO SUGERIDO PARA O PROGRESSO DA DISPERSÃO KERLE, T. <i>ET AL</i> (2002).....	20
FIGURA 12. INSTALAÇÃO DE TESTE DINÂMICO.....	27
FIGURA 13. FOTO DAS INSTALAÇÕES DO NETEF NA UNIVERSIDADE SÃO PAULO EM SÃO CARLOS .....	28
FIGURA 14. COMPRESSOR DE ALIMENTAÇÃO DE AR.....	29
FIGURA 15. TORRES DE RESFRIAMENTO DE AR.....	30
FIGURA 16. TANQUE ACUMULADOR DE AR .....	30
FIGURA 17. VARIADORES DE FREQUÊNCIA PARA CONTROLE DE ÁGUA E DE ÓLEO.....	31
FIGURA 18. BOMBA DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA .....	32
FIGURA 19. BOMBA DE ALIMENTAÇÃO DE ÓLEO .....	33
FIGURA 20. TANQUE DE PVC PARA ARMAZENAMENTO.....	33
FIGURA 21. SEPARADOR DE ÁGUA E ÓLEO .....	34
FIGURA 22. ESQUEMA DO SEPARADOR DE ÁGUA E ÓLEO .....	35



FIGURA 23. MEDIDORES DE VAZÃO .....	36
FIGURA 24. PRESSOSTATO DE SEGURANÇA .....	37
FIGURA 25. VÁLVULA DE CONTROLE PNEUMÁTICO DA VAZÃO DE AR .....	38
FIGURA 26. ESTAÇÃO DE TRABALHO REMOTO.....	38
FIGURA 27. MEDIDOR DIFERENCIAL DE PRESSÃO .....	39
FIGURA 28. BY PASS DE SEGURANÇA.....	41
FIGURA 29 - (A) ONDAS INTERFACIAIS OBSERVADAS; (A) INCLINAÇÃO DE 5 GRAUS NEGATIVOS;.....	42
FIGURA 30- REPRESENTAÇÃO DAS MÉDIAS DE CADA <i>FRAME</i> ANALISADO E VALOR MÉDIO ( $\lambda_M$ ).....	42
FIGURA 31. $U_{OS}=0,072$ E $U_{WS}=0,099$ , INCLINAÇÃO $\theta = 5$ GRAUS NEGATIVOS. (A) 1 POL. E VISCOSIDADE DO ÓLEO DE 80 MPa.S. E (B) 3 POL. E VISCOSIDADE DO ÓLEO DE 7,5 MPa.S. ....	43
FIGURA 32. $U_{OS}=0,074$ E $U_{WS}=0,098$ , INCLINAÇÃO $\theta = 2$ GRAUS POSITIVOS. (A) 1 POL E VISCOSIDADE DO ÓLEO DE 80 MPa.S. E (B) 3 POL. E VISCOSIDADE DO ÓLEO DE 7,5 MPa.S. ....	43
FIGURA 33 $U_{OS}=0,072$ E $U_{WS}=0,296$ , INCLINAÇÃO $\theta = 5$ GRAUS POSITIVOS. (A) 1 POL E VISCOSIDADE DO ÓLEO DE 80 MPa.S. E (B) 3 POL. VISCOSIDADE DO ÓLEO DE 7.5 MPa.S. ....	44
FIGURA 34 REPRESENTAÇÃO DE TODOS OS COMPRIMENTOS DE ONDA REFERENTES AOS 25 <i>FRAMES</i> , COM O DESVIO PADRÃO .....	47
FIGURA 35 REPRESENTAÇÃO DE TODOS OS COMPRIMENTOS DE ONDA REFERENTES A MÉDIA DE CADA UM DOS 25 <i>FRAMES</i> , COM O DESVIO PADRÃO .....	47
FIGURA 36 ANÁLISE COMPORTAMENTAL DA DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL .....	48
FIGURA 37 EXEMPLO DE IMAGEM ANALISADA PELO SOFTWARE.....	49
FIGURA 38 ONDA OBTIDA (AZUL) SOBREPOSTA À IMAGEM ORIGINAL. ....	50
FIGURA 39 ONDA INTERMEDIÁRIA .....	51
FIGURA 40 ONDA CURTA.....	52
FIGURA 41 A SOMA DAS DUAS ONDAS CAPTURADAS SOBREPOSTAS À IMAGEM ORIGINAL.....	52
FIGURA 42 REPRESENTAÇÃO DO ESCOAMENTO LEVEMENTE INCLINADO.....	54
FIGURA 43 COMPRIMENTOS DE ONDA INTERFACIAL ( $\lambda_{MOD}$ ) PARA INCLINAÇÃO DE 5 GRAUS POSITIVOS.....	74
FIGURA 44 COMPRIMENTOS DE ONDA INTERFACIAL ( $\lambda$ ) PARA INCLINAÇÃO DE 5 GRAUS NEGATIVOS.....	75
FIGURA 45 COMPRIMENTOS DE ONDA INTERFACIAL ( $\lambda$ ) PARA INCLINAÇÃO DE 5 GRAUS NEGATIVOS.....	76
FIGURA 46 COMPRIMENTOS DE ONDA INTERFACIAL ( $\lambda$ ) PARA INCLINAÇÃO DE 2 GRAUS POSITIVOS .....	77





FIGURA 47 COMPRIMENTOS DE ONDA INTERFACIAL ( $\lambda$ ) PARA INCLINAÇÃO DE 2 GRAUS NEGATIVOS .....	78
FIGURA 48 COMPRIMENTO DE ONDA INTERFACIAL EXPERIMENTAL / MODELAGEM COM DADOS EXPERIMENTAIS .	79
FIGURA 49 COMPRIMENTO DE ONDA INTERFACIAL EXPERIMENTAL / MODELAGEM.....	80



## *Lista de Tabelas*

TABELA 1. RELAÇÃO DOS INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	27
TABELA 2. RESULTADOS OBTIDOS DAS DIFERENTES TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA .....	63
TABELA 3 COMPRIMENTOS DE ONDA INTERFACIAL CALCULADO PELA EQ (19), INSERIDOS DADOS EXPERIMENTAIS. .....	68
TABELA 4 COMPRIMENTOS DE ONDA INTERFACIAL CALCULADO PELA EQ (19), COM REDUÇÃO DE VARIÁVEIS. ....	71
TABELA 5 TODOS OS COMPRIMENTOS DE ONDA INTERFACIAL. ....	72
TABELA 6 RELAÇÕES DE DESLIZAMENTO .....	73



### *Lista de Símbolos*

- $A$  Seção transversal da área total.
- $A_o$  Seção transversal da área onde do óleo está, acima da interface ondulada.
- $A_{o1}$  Seção transversal da área do óleo acima da interface e acima do pico de onda.
- $A_{o2}$  Seção transversal da área do óleo acima da interface e dentro do vale formado pela onda.
- $A_w$  Seção transversal da área da água abaixo da interface.
- $A_{w1}$  Seção transversal da área da água abaixo da interface e abaixo do pico de onda.
- $A_{w2}$  Seção transversal da área da água abaixo da interface e abaixo do vale formado pela onda.
- $A_{onda}$  Seção transversal da área formada pelo pico e vale da onda.
- $C_o$  Fração volumétrica de injeção do óleo.
- $C_v$  Velocidade da onda formada na interface do fluido.
- $C_w$  Fração volumétrica de injeção da água.
- $D$  Diâmetro.
- $D_{hw}$  Diâmetro hidráulico da água.
- $D_{ho}$  Diâmetro hidráulico do óleo.
- $D_{hi}$  Diâmetro hidráulico da interface.
- $f_w$  Fator de atrito da água.
- $f_o$  Fator de atrito do óleo.
- $f_i$  Fator de atrito na interface do fluido.
- $f_{(ho)}$  Perda de carga acima da interface.
- $f_{(ho1)}$  Perda de carga acima da interface, acima do pico de onda.
- $f_{(ho2)}$  Perda de carga acima da interface, dentro do vale formado pela onda.



$f_{(hw)}$	Perda de carga abaixo da interface
$f_{(hw1)}$	Perda de carga abaixo da interface, abaixo do pico de onda..
$f_{(hw2)}$	Perda de carga abaixo da interface, abaixo do vale de onda..
$g$	Aceleração das forças gravitacionais.
$h_w$	Altura da água na seção transversal.
$K$	Curvatura.
$P$	Pressão acima da interface ondulada.
$P_{o1}$	Pressão acima da interface ondulada e acima do pico de onda.
$P_{o2}$	Pressão acima da interface ondulada e dentro do vale formado pela onda.
$P_{w1}$	Pressão abaixo da interface ondulada e abaixo do pico de onda.
$P_{w2}$	Pressão abaixo da interface ondulada e abaixo do vale formado pela onda.
$\dot{Q}_o$	Vazão volumétrica de injeção do óleo
$\dot{Q}_w$	Vazão volumétrica de injeção da água.
$R$	Raio de curvatura.
$R_1$	Raio de curvatura na direção do fluxo do escoamento.
$R_2$	Raio de curvatura na direção ortogonal ao fluxo do escoamento.
$Re$	Número de Reynolds.
$S$	Deslizamento entre as fases.
$S_w$	Perímetro molhado pela água.
$S_o$	Perímetro molhado pelo óleo.
$S_i$	Perímetro molhado pela interface.
$U_m$	Velocidade da mistura
$U_{sw}$	Velocidade superficial da água.
$U_{so}$	Velocidade superficial do óleo.





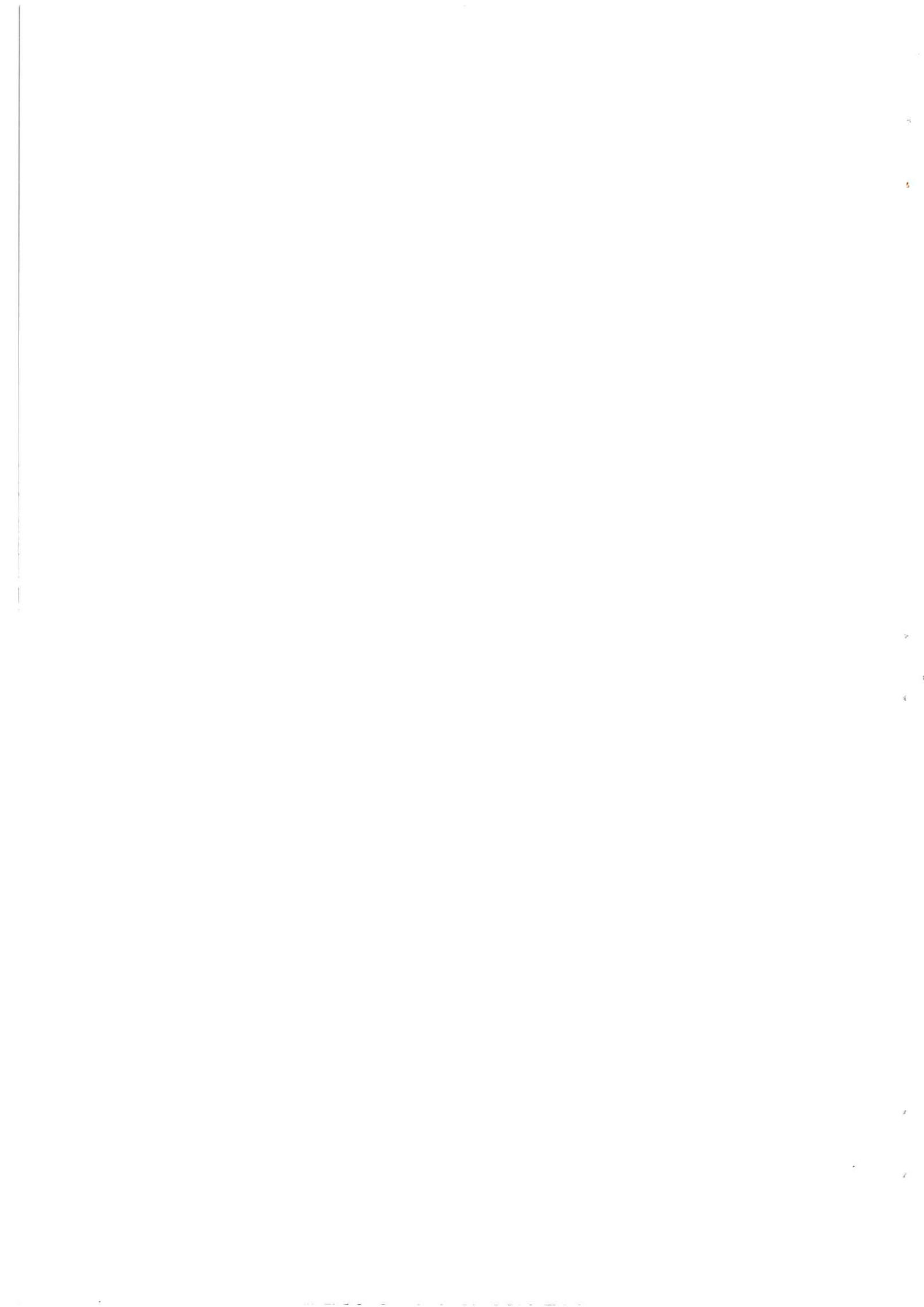
- $U_w$  Velocidade *in-situ* da água.
- $U_{w1}$  Velocidade *in-situ* da água e formado abaixo do pico formado pela onda
- $U_{w2}$  Velocidade *in-situ* da água e formado abaixo do vale formado pela onda.
- $U_o$  Velocidade *in-situ* do óleo acima da interface ondulada
- $U_{o1}$  Velocidade *in-situ* do óleo e formado acima do pico formado pela onda
- $U_{o2}$  Velocidade *in-situ* do óleo e formado dentro do vale formado pela onda,

### **Simbologia grega.**

- $\alpha$  Amplitude da onda.
- $e$  Rugosidade.
- $\varepsilon$  Fração volumétrica.
- $\rho$  Densidade.
- $\lambda$  Comprimento de onda.
- $\sigma$  Tensão interfacial óleo-água.
- $\phi$  Fator de ajuste empírico.

### **Subscritos.**

- a** Automático.
- int** Intermediário.
- m** Modelagem.
- o** Fase do óleo.
- teo.** Teórico.
- teórico1** Adquirido via modelagem com a inserção de todas variáveis.
- teórico2** Adquirido via modelagem com a inserção apenas das velocidades superficiais e inclinações.



w Fase da água.

x Indicador de fase.



## Sumário

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS.....	II
RESUMO .....	III
LISTA DE FIGURAS.....	V
1 – INTRODUÇÃO .....	1
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Escoamento bifásico. ....	5
2.2. Padrões de escoamento líquido-líquido e gás-líquido em tubulações horizontais e levemente inclinadas. ....	9
2.3. Interface e Estrutura Ondulatória em Escoamento bifásico. ....	16
3 - TRABALHO EXPERIMENTAL.....	23
3.1. Facilidades multifásicas da Shell Exploration and Production B.V., Rijswijk, Holanda.....	23
3.2.1. "Loop" multifásico do NETeF-EESC-USP.....	25
3.2.2. Sistema de suprimento de ar .....	29
3.2.3. Sistema de suprimento de água.....	31
3.2.4. Sistema de suprimento de óleo.....	32
3.2.5. Separador de água e óleo.....	33
3.2.6. Instrumentos de medida comercial.....	35
3.2.7. Dispositivo de inclinação da tubulação .....	39
3.2.8. Tubulação de <i>By Pass</i> e Sistema de Aprisionamento de Fluido .....	39
3.3. Técnicas experimentais.....	41
3.3.1. Coleta manual de dados.....	41
3.3.2. Análise estatística dos dados.....	46
3.3.3. Coleta automática de dados.....	48
4 - MODELAGEM MATEMÁTICA .....	53
4.1. Modelagem da onda interfacial.....	53
4.2. Modelagem para o cálculo da fração volumétrica <i>in situ</i> e velocidade da onda cinemática .....	60
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1. Resultados Experimentais .....	63
5.2. Resultados da Modelagem.....	66
5.2.1. Resultados da Modelagem com inserção de dados experimentais.....	67
5.2.2. Resultados da Modelagem com redução de variáveis.....	70
5.3. Comparações entre resultados do modelo e dados experimentais.....	71
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
7 – LISTA DE REFERÊNCIAS.....	87



## 1 – INTRODUÇÃO

Na literatura há diversos tipos identificados de padrões de escoamento multifásico em dutos, entre eles: estratificado, pistonado, anular, dispersão óleo-água e água-óleo (BANNWART *et al.*, 2004), porém a maior parte dos estudos realizados nessa área foram em escoamento gás-líquido. O padrão estratificado ondulado pode ser observado para velocidades relativas suficientemente altas e a estrutura geométrica da onda interfacial para o escoamento gás-líquido foi levantada por Li *et al.* (1997). Dentre os padrões citados acima, estaremos discutindo os diversos tipos de estruturas ondulatórias observadas no padrão estratificado óleo-água. A importância do estudo do padrão estratificado líquido-líquido consiste no fato de que frequentemente misturas de água em óleo ou óleo em água são de difícil separação no final da linha de transporte ou produção. A preservação do padrão de escoamento estratificado para uma ampla faixa de condições de escoamento facilitaria o processo de separação das fases. De fato, a estratificação dos líquidos tem sido sugerida como meio de separação de água do óleo em oleodutos (HAHEIM, 2001). Além disso, uma redução da perda de carga é também esperada.

No presente trabalho, busca-se a compreensão das estruturas ondulatórias que ainda possuem uma forma média não conhecida, visto que grande parte dos escoamentos estratificados possui um padrão ondulatório não identificado. Por exemplo, suspeitamos que com uma variação, mesmo que pequena, das inclinações de uma tubulação, haveria mudanças significativas em seus comprimentos de onda. Faremos então uma bateria de análises comportamentais da mesma a fim de definir uma estrutura genérica. Wahaibi e Angeli (2006)

apresentam um equacionamento baseado na teoria invíscida de Kelvin-Helmholtz para a previsão das características geométricas da onda interfacial. Entretanto, aqueles autores utilizam a velocidade da onda cinemática como referência e propõe o modelo deduzido por Wallis (1969) para sua determinação, o que esta em desacordo com a teoria invíscida.

Apresentamos o desenvolvimento de uma equação para a previsão das propriedades geométricas da onda interfacial baseada na equação da energia bifásica unidimensional em regime permanente. Além dos termos de energia mecânica, a dissipação viscosa é modelada segundo uma abordagem fenomenológica. . O estudo dos efeitos da inclinação no padrão de escoamento líquido-líquido está em ordem (ULLMANN *et al.*, 2003). Estes são investigados experimentalmente e teoricamente neste trabalho. Através da aquisição dos comprimentos de onda nas respectivas inclinações (-2°), (-5°), (5°) e (2°) graus para diferentes pares de vazão ou mantendo a vazão fixa com mudanças na inclinação, foi notado que tais alterações influenciavam diretamente no comportamento da estrutura ondulatória, alterando, por exemplo, o comprimento de onda. A transição de padrão de escoamento de estratificado-liso para estratificado-ondulado é normalmente identificada através de uma condição de estabilidade baseada no crescimento exponencial de uma onda interfacial (BRAUNER, *et al.*, 1994, TRALLERO, 1995, Rodriguez *et al.*, 2006). Dessa forma, observamos do estudo das transições de padrão de escoamento (Pf) que as variáveis preponderantes são: velocidades *in-situ* da água ( $U_w$ ), do Óleo ( $U_o$ ), propriedades físicas dos fluidos e a inclinação, medida em graus ( $\theta$ ), devido ao fato de que a velocidade *in-situ* de um escoamento depende da inclinação dos dutos, logo  $Pf = f(U_w, U_o, \theta)$ . É sabido que o padrão de escoamento estratificado ondulado é influenciado significativamente pelo ângulo de inclinação (Rodriguez e Oliemans, 2006). Portanto, suspeitamos que a estrutura ondulatória interfacial também seja fortemente influenciada pelo ângulo de inclinação da tubulação, podendo, inclusive, ser parâmetro de indicação do início da transição de padrão de escoamento. Conseqüentemente, a região



estratificada das cartas de fluxo seria identificada não somente pelos pares de velocidades superficiais, mas também pelo ângulo de inclinação. Uma das características relevantes que temos observado é a de que não existe somente uma espécie de onda a ser analisada em um único escoamento; o mesmo pode possuir ondas curtas, intermediárias e longas. Para a obtenção dos comprimentos de onda de arquivos de imagens foram usadas duas técnicas. Em uma primeira aquisição, a coleta de comprimentos de onda foi feita de forma manual, sendo essa responsável pela determinação segura e bem definida de dados, servindo como base de informações e para validações de outras técnicas. Porém, trata-se de um processo limitado, que requer muito tempo para a aquisição de dados. Fomos então motivados a desenvolver um software baseado em LabView<sup>®</sup> para coletar, de forma segura e automática, os comprimentos de onda. Propomos que propriedades geométricas da onda interfacial (comprimento, amplitude e velocidade de propagação) possam ser vistas como sinalizadoras do nível de estabilidade hidrodinâmica em um escoamento estratificado líquido-líquido. Pois através delas poderíamos determinar, por exemplo, se no escoamento está havendo um deslizamento significativo entre as fases ou uma alta velocidade relativa, fatores responsáveis pelo início da transição de padrão de escoamento.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por metas:

1. Realizar um estudo experimental referente à estrutura ondulatória encontrada no escoamento bifásico estratificado óleo-água em dutos com ligeiras inclinações a partir da horizontal.
  - Identificar os comprimentos e amplitudes da estrutura ondulatória interfacial através da análise de imagens capturadas de filmes.
  - Desenvolver e utilizar técnicas de captura das propriedades geométricas da onda interfacial.
  - Validar as técnicas experimentais e interpretar os dados obtidos.

2. Realizar um estudo teórico da estrutura ondulatória do escoamento estratificado óleo-água ondulado.

- Desenvolver um modelo matemático para a descrição da estrutura ondulatória.
- Implementar à modelagem matemática fatores que influenciem na perda de carga, através da equação da energia.
- Comparar os resultados do modelo teórico com os dados experimentais.

Esta dissertação foi organizada nos seguintes capítulos:

Capítulo 2: revisão bibliográfica dos trabalhos relacionados ao escoamento estratificado bifásico líquido-líquido, contendo os seguintes tópicos: escoamento bifásico óleo-água, padrões de escoamento e estrutura ondulatória interfacial.

Capítulo 3: trabalho experimental; são apresentadas duas técnicas de aquisição dos comprimentos e amplitudes das ondas interfaciais, e incertezas experimentais.

Capítulo 4: modelagem matemática para o padrão de escoamento bifásico óleo-água estratificado ondulado em dutos levemente inclinados.

Capítulo 5: resultados; são apresentados e discutidos os dados experimentais e realizadas comparações entre os dados e resultados teóricos.

Capítulo 6: conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em seguida, mostraremos os estudos realizados para fundamentar o presente trabalho. Primeiramente, buscamos por trabalhos relacionados com o escoamento bifásico óleo-água, em seguida por estudos que classificassem os padrões de escoamento, dando ênfase ao padrão estratificado óleo-água, incluindo dados sobre fração volumétrica *in situ* e gradiente de pressão bifásico. E para finalizar este capítulo, buscamos trabalhos que possuísem como foco classificar e entender estruturas ondulatórias interfaciais encontradas nos padrões estratificados.

### 2.1. Escoamento bifásico.

Escoamentos bifásicos são importantes em numerosos processos naturais e industriais, sendo compostos de duas ou mais fases arranjadas em diversas configurações geométricas ou padrões de escoamento. Eles são comumente encontrados na forma de misturas: (i) gás ou líquido-sólido (alguns exemplos: leitos fluidizados borbulhantes ou circulantes, bioreatores e transporte pneumático), com aplicações comuns na indústria farmacêutica, metalúrgica e petroquímica (reações de síntese, craqueamento catalítico, reações de oxidação e redução de minérios, processos de combustão e gaseificação, transporte de material particulado e recuperação de calor); (ii) gás-líquido (colunas de bolhas, torres de resfriamento, escoamentos condensado-vapor, óleo-gás e água-gás em tubulações), com aplicações comuns na indústria nuclear, petroquímica e de refrigeração (microbiologia, refrigeração e ventilação industrial e

produção e transporte de petróleo e gás natural); (iii) líquido-líquido (escoamento óleo leve/pesado e água em tubulações), com aplicações comuns na indústria de petróleo (produção e transporte de petróleo). Esse, em particular, é o objeto de estudo deste trabalho. Na Fig. 1 são mostrados esquematicamente os padrões de escoamento líquido-líquido, com exceção do padrão estratificado ondulado. Uma boa introdução aos escoamentos multifásicos é encontrado em Wallis (1969).

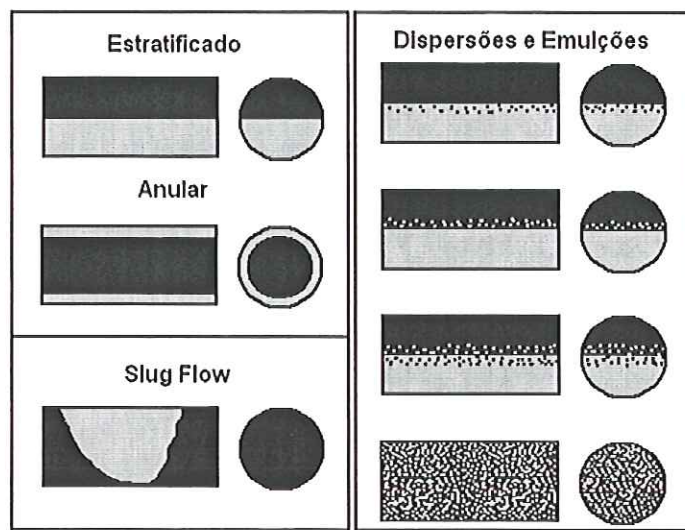


Figura 1. Tipos de escoamento bifásico óleo-água.

Veremos agora alguns dos termos básicos do escoamento bifásico, mais especificamente, escoamento líquido-líquido, que serão definidos. Considerando óleo e água escoando simultaneamente em uma tubulação com área de seção transversal  $A$  (Fig. 2). As vazões volumétricas de injeção do óleo e da água são  $\dot{Q}_o$  e  $\dot{Q}_w$ , respectivamente. As frações volumétricas de injeção do óleo e da água são respectivamente:

$$C_o = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{Q}_o + \dot{Q}_w} \quad , \quad C_w = \frac{\dot{Q}_w}{\dot{Q}_w + \dot{Q}_o} \quad (2.1)$$

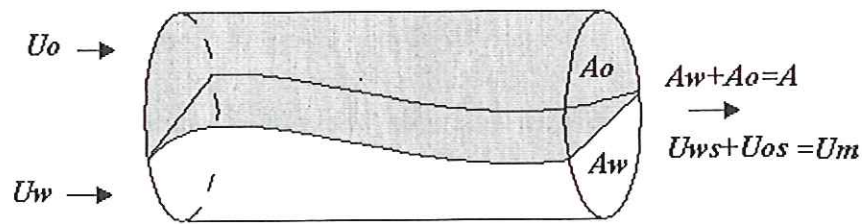


Figura 2 - Escoamento bifásico óleo-água (estratificado) e respectivas velocidades e áreas de seção transversal *in situ*.

As velocidades superficiais do óleo e da água são calculadas com base nas vazões volumétricas de injeção e na área de seção transversal do tubo e são definidas como:

$$U_{os} = \frac{\dot{Q}_o}{A}, \quad U_{ws} = \frac{\dot{Q}_w}{A} \quad (2.2)$$

Combinado as Equações 2.1 e 2.2 é obtida a relação entre as velocidades superficiais e as frações volumétricas de injeção:

$$\frac{U_{os}}{U_{ws}} = \frac{C_o}{C_w} \quad (2.3)$$

Em escoamento bifásico de fases separadas, como é o caso do estratificado, assume-se que cada fase ocupa diferentes partes da seção transversal do tubo. A velocidade média real de cada fase ou velocidade *in situ* é diferente da velocidade superficial, pois é calculada da vazão volumétrica passando por uma área menor do que a área transversal do tubo. Chamando-se  $A_o$  e  $A_w$  as áreas de seção transversal ocupadas pelo óleo e pela água, respectivamente, as velocidades *in situ* são dadas por:

$$U_o = \frac{\dot{Q}_o}{A_o}, \quad U_w = \frac{\dot{Q}_w}{A_w} \quad (2.4)$$

Das Equações 2.2 e 2.4 segue-se que a velocidade *in situ* sempre excede a velocidade superficial para cada fase.

O *holdup* ou fração volumétrica *in situ* da fase  $\varepsilon$  (média no tempo e no espaço em certo trecho de tubo) freqüentemente é considerada como uma grandeza local, isto é, num comprimento diferencial de tubo. Portanto, a fração volumétrica *in situ* do óleo e da água é definida da seguinte forma:

$$\varepsilon_o = \frac{A_o \delta L}{A \delta L} = \frac{A_o}{A}, \text{ e de maneira análoga } \varepsilon_w = \frac{A_w}{A} \quad (2.5)$$

A velocidade *in situ* e a velocidade superficial de cada fase são relacionadas à fração volumétrica *in situ* da seguinte forma:

$$U_o = \frac{U_{os}}{\varepsilon_o}, \quad U_w = \frac{U_{ws}}{\varepsilon_w} \quad (2.6)$$

A velocidade da mistura é definida dividindo a vazão volumétrica total pela seção transversal do tubo:

$$U_m = \frac{\dot{Q}_o + \dot{Q}_w}{A} \quad (2.7)$$

que também é igual à soma das velocidades superficiais ( $U_{ms} = U_{os} + U_{ws}$ ).

Quando dois fluidos escoam juntos em uma tubulação, a fração volumétrica *in situ* é geralmente diferente da fração volumétrica de injeção. Diferenças na densidade e/ou viscosidade causam uma importante característica dos escoamentos bifásicos: o deslizamento *s*. Como descrito em Oliemans (1986), o *holdup ratio* ou deslizamento pode ser definido como a razão das frações volumétricas *in situ* ( $\varepsilon_w/\varepsilon_o$ ) sobre a razão das frações volumétricas de injeção ( $C_w/C_o$ ), o que é equivalente à razão das velocidades das fases *in situ*, ou seja:

$$S = \frac{\frac{\varepsilon_w}{C_w}}{\frac{\varepsilon_o}{C_o}} = \frac{U_o}{U_w} \quad (2.8)$$

Quando o deslizamento,  $s$ , é maior do que a unidade a água esta se acumulando no tubo e o óleo esta escoando mais rapidamente. Quando o deslizamento é menor do que a unidade o óleo está se acumulando no tubo e a água está escoando mais rapidamente.

## 2.2. Padrões de escoamento líquido-líquido e gás-líquido em tubulações horizontais e levemente inclinadas.

Na literatura existem diversos tipos de padrões de escoamento em dutos identificados, são eles: estratificado, pistonado, anular, dispersão óleo-água e água-óleo, Bannwart *et al.*, (2004). Veremos então alguns trabalhos que envolvem o estudo dos diferentes padrões de escoamento óleo-água e das transições de padrões de escoamento. Foram identificados por Trallero; *et al* (1997) seis padrões de escoamento e classificados em duas categorias: escoamento estratificado e escoamento disperso. Quanto aos escoamentos de fases separadas, escoamento estratificado (ST) e estratificado com mistura na interface (ST&MI). São modeladas as transições de padrão de escoamento bifásico óleo-água para óleos leves usando o modelo de dois fluidos e um equilíbrio entre gravidade e flutuações turbulentas. Alkaia *et al.* (2000) deram continuidade ao trabalho de Trallero *et al.* (1997)<sup>1</sup>, incluindo no estudo efeitos de inclinação. As Figs. 3, 4, 5, 6, 7 e 8 descrevem os padrões de escoamento observados por Alkaia *et al.* (2000).

---

<sup>1</sup> Trallero, JL; Sarica, C; Brill, JP (1997)., A study of oil/water flow patterns in horizontal pipes. SPE Production & Facilities, Vol..12, 165-172.

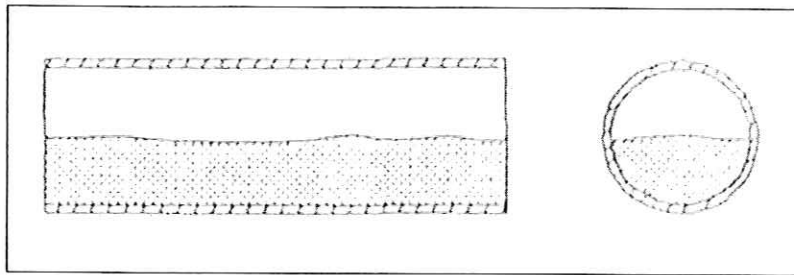


Figura 3 - Escoamento Estratificado – ST (Alkaya et al., 2000)

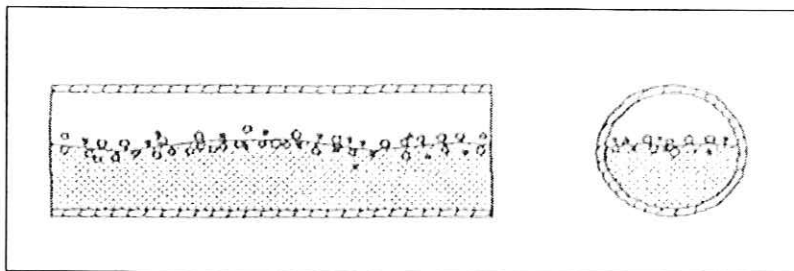


Figura 4 - Escoamento Estratificado com Mistura na Interface – ST & MI (Alkaya et al., 2000)

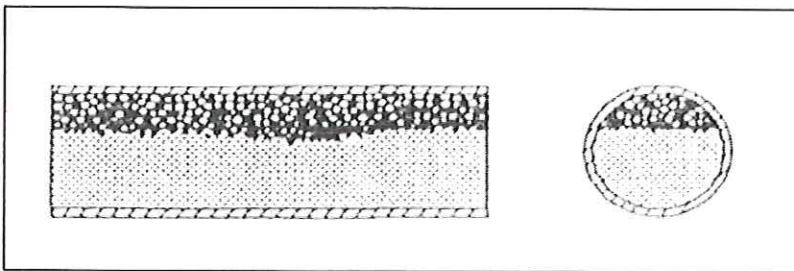


Figura 5 - Dispersão de Óleo em Água Juntamente com uma Camada de Água bem Definida – Do/w & w (Alkaya et al., 2000)

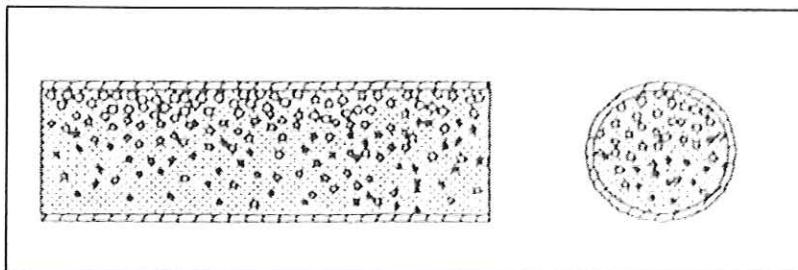


Figura 6 - Emulsão de Óleo em Água – Do/w (Alkaya et al., 2000)



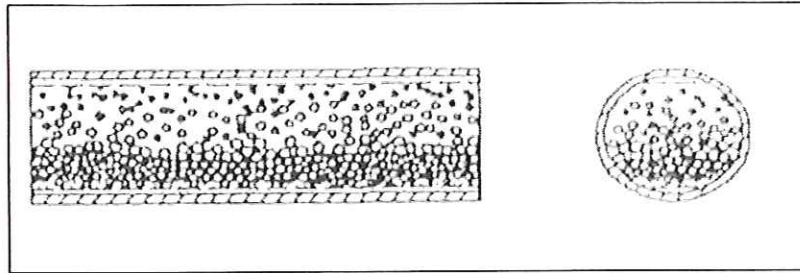


Figura 7 - Dispersão de Água em Óleo e de Óleo em Água – Dw/o & Do/w (Alkaya et al., 2000)

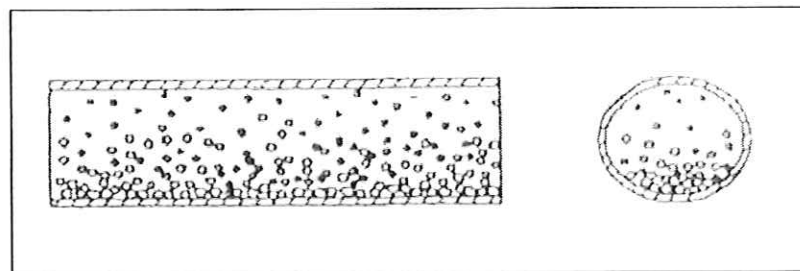


Figura 8 - Emulsão de Água em Óleo – Dw/o (Alkaya et al., 2000)

Na Fig. 4, a dispersão na interface pode ser água dispersa em óleo ou óleo disperso em água. A dinâmica do escoamento água e óleo têm vários fatores que influenciam sua configuração. Poucos estudos envolvendo tubulações ligeiramente inclinadas (até  $\pm 5^\circ$ ) são encontrados na literatura sobre o assunto.

A inversão de fase e fenômenos associados são experimentalmente investigados por Hu e Angeli (2006), em escoamento bifásico óleo-água com óleo com  $\rho_o = 828 \text{ kg/m}^3$  e  $\mu_o = 5.5 \text{ m.Pas}$  e água de torneira, com inclinação ascendente e descendente. Estão sendo estudados duas inversões de fase, dispersão de água em óleo(w/o) p/ óleo em água(o/w) e dispersão de óleo em água(o/w) p/ água em óleo(w/o). Nessa primeira, se mantém a velocidade superficial do óleo constante e há um aumento na vazão da água. No segundo caso, mantém-se constante a velocidade da fase contínua, água, e há um aumento na velocidade da fase dispersa, óleo. Monitorando a queda de pressão do escoamento, percebeu-se que a inversão de fase não ocorreu na mesma região do mapa de fluxo para as duas situações testadas.

Em misturas de água e óleo não há um número considerável de estudos de caráter elucidativo, em contraste com o escoamento bifásico gás-liquido. Brauner e Maron. (1992a e 1992b) propõe uma metodologia geral para a previsão dos padrões de escoamento de fases separadas em escoamento bifásico liquido-liquido. Foram propostos dois critérios de transição, (ZNC) *zero-neutral-stability* e (ZRC) *zero-real-characteristics*, baseadas na análise da estabilidade linear e numa análise algébrica do sistema de equações hiperbólicas do modelo de dois fluidos para escoamento estratificado, chegando a um problema bem posto. Vários padrões de escoamento foram identificados e discutidos para diferentes viscosidades e densidades. Mostrou-se que há também sub-padrões dos padrões básicos, como no padrão estratificado com dispersão na interface, porem, é esperado pelo critério de estabilidade, que o sub-padrão se mantenha **estável no tempo** como acontece em escoamentos com mistura de ar e água, por exemplo.

O fenômeno de redução de arrasto e a influência da injeção de redutores de atrito nos padrões de escoamento, para escoamento ar-água em dutos 0.0127 m diâmetro com inclinação, foram investigados experimentalmente por Al-Sarkhi, *et al* (2006). Os fluidos partiam de uma configuração anular com o duto inclinado positivamente em relação a horizontal. A injeção do polímero de redução de arrasto causou reduções na queda de pressão tão altas quanto 71% com concentração de 100 ppm. Um máximo de redução de arrasto foi verificado quando houve transição para o padrão estratificado induzida pela injeção da substância redutora de atrito.

Augier; *et al* (2003) apresentam resultados experimentais e numéricos relacionados ao comportamento dinâmico de um escoamento bifásico induzido por um gradiente de fase no início do escoamento. Anemometria por imagem de partículas (PIV) foi usada juntamente com um método que compara o índice refrativo para medir a fração volumétrica e a velocidade das fases num escoamento bidimensional. A análise dos resultados experimentais

revelou uma forte característica instável do escoamento e o desenvolvimento de amplas estruturas. Foram comparados os dados experimentais com os resultados de simulações numéricas obtidas usando um modelo de dois fluidos e um modelo de mistura tipo fluido único (onde só a diferença de densidade é considerada). As discrepâncias entre resultados numéricos e experimentais sugerem a necessidade de uma melhor compreensão da importância relativa de efeitos de densidades variáveis, transferências interfaciais e de quantidade de movimento e transporte turbulento.

Alguns resultados significativos do ponto de vista da modelagem fenomenológica têm sido apresentados para os escoamentos gás-líquido, mas esta aplicação não pode ser frequentemente estendida para um sistema água e óleo. Ullmann *et al.* (2003) mostraram que impondo uma leve inclinação à tubulação em relação a horizontal, favorece-se a separação das fases, *i.e.*, o padrão estratificado. Além disso, para dadas condições existem dois tipos de padrão estratificado, dependendo das frações volumétricas, velocidades superficiais e pressões, são eles: estratificado liso e ondulado.

No trabalho de Angeli e Hewitt (1998) os gradientes de pressão foram medidos durante o escoamento bifásico de um óleo com baixa viscosidade (1.6 mPa viscosidade de  $s$  e  $801 \text{ kg/m}^3$  densidade) e água, em tubulações de uma (1) polegada e seções de teste horizontais de aço inoxidável e de resina acrílica. Foram feitas medidas para velocidades de mistura de 0.3 a 3.9 m/s e para frações volumétricas da água de 0 a 100%. O principal fato observado é a grande diferença entre os resultados obtidos para os diferentes materiais da tubulação, e que não pode ser explicada somente em termos da diferença de rugosidade dos tubos. É postulado que as características de molhabilidade dos diferentes materiais dos tubos também são responsáveis por esta disparidade.

Para Raj *et al.* (2005) a configuração estratificada é uma distribuição básica e muito importante das fases em uma tubulação horizontal. Há um grande número de estudos

envolvendo escoamento bifásico gás-líquido em tubulações. Entretanto, não existem muitos estudos envolvendo escoamentos bifásicos com dois líquidos imiscíveis e não podemos estender com segurança para os escoamentos líquido-líquido o ferramental teórico desenvolvido para os escoamentos gás-líquido.

O escoamento bifásico de gás úmido em oleodutos é uma ocorrência comum no transporte de gás cru. Os parâmetros mais importantes que governam o escoamento são a geometria do tubo (ângulo de inclinação e diâmetro), condições operacionais (taxa de fluxo, pressão e temperatura), assim como propriedades físicas do gás e líquido (densidade, viscosidade, e tensão superficial), (Meng; *et al* 2001).

Lum; *et al.* (2006) estudaram os efeitos da inclinação em um escoamento bifásico água-óleo em tubulação de aço de 38 mm de diâmetro interno, para 5° e 10° graus ascendente e 5° graus descendente. Foi destacado pelos autores o padrão “*oil plug flow*”, uma espécie de padrão pistonado com bolhas pouco alongadas de óleo. Com o aumento da inclinação a fronteira desse regime se desloca para regiões de altas frações do óleo e velocidades da mistura.

Foram feitas por Angeli e Hewitt (2000) medidas em escoamento água-óleo leve para velocidades de mistura que variavam de 0,2 a 3,9 m/s e com frações volumétricas da água indo de 6% a 86%. Nessas condições foram observados variados padrões de escoamento, indo do padrão estratificado para completamente disperso. Escoamento anular não foi observado. Eles demonstraram o efeito do material da tubulação na carta de fluxo.

Hu e Angeli (2006) estudaram a inversão de fase, dispersão de água em óleo (w/o) p/ óleo em água (o/w) e dispersão de óleo em água (o/w) p/ água em óleo (w/o). Monitorando o escoamento contínuo no centro do tubo e nas paredes percebeu-se que a inversão de fase sofre um processo de histerese e que não ocorre ao mesmo tempo nas diferentes secções do tubo.

Ao considerar o escoamento de uma mistura bifásica, Arosio e Guilizzoni (2006) notaram que a caracterização de seu comportamento não é função apenas de variações de temperatura e pressão, mas também de uma descrição da distribuição das fases e sua estrutura. Isto é de grande importância em problemas relacionados à análise de dutos. Foram apresentadas algumas metodologias que provaram ser muito úteis na descrição e visualização quantitativa da estrutura de um escoamento bifásico gás-líquido. Elas estão baseadas em aquisições relativamente simples de uma única quantidade dados e permitem um detalhamento da estrutura do escoamento sem requerer observação visual do mesmo.

Lovick e Angeli; (2004) estudaram experimentalmente o tamanho e distribuição de gotículas em escoamento líquido-líquido disperso em tubulação. As investigações foram feitas em uma seção de teste de aço inoxidável com 38 mm de diâmetro interno, com água e óleo (densidade  $828 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade  $6 \text{ mPa s}$ ). As velocidades da mistura variaram de 1.5 a 2.5 m/s e as frações volumétricas do óleo de 20% a 80%, onde havia dispersões de água em óleo e de óleo em água. Foram detectadas pequenas diferenças no tamanho das gotas de óleo nas mais baixas camadas da água e das gotas de água nas camadas superiores de óleo. A velocidade da mistura não afetara significativamente o tamanho das gotículas em ambas as fases. Velocidades maiores da fase contínua resultaram em gotas menores.

Rodriguez e Oliemans (2006) estudaram experimentalmente um escoamento bifásico óleo-água em tubulação grande de aço inclinável de 15m de comprimento e 8.28 cm de diâmetro, usando óleo mineral e salmoura. Os autores estudaram padrões de escoamento, gradiente de pressão bifásico e frações volumétricas *in situ* para inclinações de  $-5^\circ$ ,  $-2^\circ$ ,  $-1.5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $2^\circ$  e  $5^\circ$ . A caracterização do padrão de escoamento e identificação de seus limites foram concebidas via observação de filmes. As medidas de frações volumétricas *in situ* e as divergências relativas ao comportamento homogêneo foram verificadas através de dupla densimetria por raios-gama. Dados precisos são apresentados em função das vazões e

inclinações na tubulação e para todos os padrões de escoamento observados. Na Fig 9 estão em destaque os padrões de escoamento observados por aqueles autores.

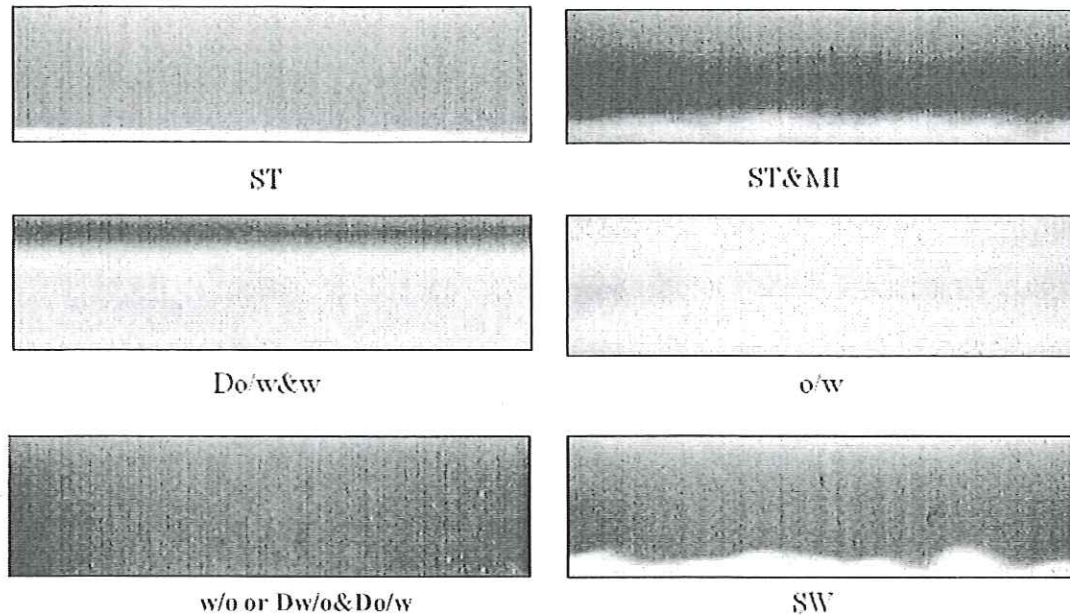


Figura 9 - Estratificado liso (ST). Estratificado com mistura na interface (ST&MI). Dispersão de óleo em água e água (Do/w&w). Dispersão homogênea de óleo em água (o/w). Dispersão de água em óleo e óleo em água (w/o ou Dw/o & Do/w) Estratificado com mistura na interface (SW).

### 2.3. Interface e Estrutura Ondulatória em Escoamento bifásico.

São bastante escassos os trabalhos publicados sobre ondas em escoamento bifásico líquido-líquido. Um dos primeiros trabalhos experimentais onde foram observadas ondas interfaciais em escoamento estratificado óleo-água foi o de Alkaya *et al.* (2000). Eles construíram uma tubulação para teste com duas polegadas de diâmetro em acrílico e observaram vários padrões de escoamento líquido-líquido. Foram testadas várias condições de escoamento, com ângulos de inclinação que variam de 0,  $\pm 5$ ,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 0,5$  graus, para identificar os efeitos da temperatura e da inclinação nos limites que dividem cada padrão de escoamento. Aqueles autores observaram o aparecimento de ondas interfaciais no padrão estratificado com o aumento da inclinação em relação a horizontal, principalmente no escoamento descendente.

Foram realizados por Berthelsene Ytrehus (2005) estudos numéricos e experimentais sobre escoamento estratificado ondulado gás-líquido completamente desenvolvido em dutos. A interface ondulada é representada por uma rugosidade interfacial equivalente, em conformidade com dados experimentais obtidos por esses autores. A equação da quantidade de movimento na direção axial em regime permanente é resolvida junto com um modelo de turbulência de duas fases, que é modificado para responder pela rugosidade interfacial equivalente. As equações governantes são discretizadas usando o método de diferença finitas, com refinamento de malha na interface e parede.

Bontozoglou e Hanratty (1989) estudaram um escoamento estratificado bifásico gás-líquido em dutos horizontais. Eles mostram que o arrasto interfacial é chave fundamental no estudo do gradiente de pressão. Eles relacionaram a amplitude da onda com alguns parâmetros de escoamento para estabelecer um critério de estabilidade. Assume-se que a amplitude da onda interfacial está correlacionada ao limite geométrico da tubulação. Quando esse limite é alcançado; a interface deixa de possuir uma estrutura ondulatória estável.

De acordo com Bontozoglou (1991), a força da gravidade na interface ondulada entre dois fluidos com movimento relativos é considerada não linear e fraca. O limite dinâmico para ondas progressivas de forma permanente (na extensão de uma amplitude finita da instabilidade de Kelvin-Helmholtz) é estudado como uma função das profundidades do fluido.

Um modelo físico para estrutura interfacial ondulatória em escoamento bifásico anular gás-líquido foi estudado em micro gravidade e gravidade normal por Wang; *et al* (2004a). Uma sonda capacitiva foi utilizada para a medição da estrutura da onda interfacial, espessura local do filme e velocidade. Foi detectado que a amplitude da onda, e não sua largura, é fortemente afetada mudando o nível de gravidade. Na realidade, a amplitude da onda em gravidade normal é duas vezes maior que na micro gravidade. Usando uma aproximação análoga para um escoamento turbulento monofásico em duto áspero, um modelo matemático

preliminar foi proposto para calcular a amplitude da onda. Os ajustes no modelo, bem como os dados experimentais, mostraram que a amplitude da onda em gravidade normal é aproximadamente 1,7 vezes maior do que a espessura da subcamada viscosa e a transição divide-se em zonas no fluxo de gás turbulento. A amplitude da onda em micro gravidade foi calculada aproximadamente 80% da espessura total.

No trabalho de Li; *et al.* (1997) foram retratados dois padrões encontrados em escoamentos estratificados gás - líquido em dutos horizontais ou inclinados, que são: estratificado liso, para velocidades superficiais do gás relativamente baixas, e o estratificado ondulado, para velocidades superficiais do gás suficientemente altas. No caso do padrão de escoamento ondulado, notou-se uma grande influência das ondas na transferência de calor e na estabilidade do sistema. Foram estudadas as ondas formadas em um escoamento estratificado ar-água, e a transição do padrão liso para o padrão ondulado. Foi mostrada também a existência de sub-padrões dentro do estratificado ondulado: ondas bidimensionais e ondas de larga amplitude.

No trabalho Wang; *et al.*, (2004b) procurou-se o fator de fricção interfacial e rugosidade interfacial relativa em escoamento gás-líquido no padrão ar-água anular, em um tubo de diâmetro interno pequeno (9,525 mm i.d.). A amplitude da onda e a rugosidade interfacial se alteram com o aumento do número de Reynolds do gás, assim indicando que a rugosidade interfacial do escoamento bifásico anular é uma propriedade dinâmica do escoamento. A amplitude da onda e a rugosidade interfacial em micro-gravidade são menores que a metade dos valores correspondentes em gravidade normal. Outra conclusão importante é que a rugosidade interfacial relativa em gravidade normal é normalmente maior que a rugosidade da parede.

Segundo Al-Wahaibi e Angeli (2006), durante um escoamento de dois fluidos vários padrões podem ser distinguidos. Quando vazões volumétricas são baixas é comum notar o



padrão estratificado e com o aumento da vazão aparecem ondas interfaciais inicialmente longas se comparadas ao diâmetro da tubulação. Esses autores propuseram a análise invíscida de Kelvin-Helmholtz para o desenvolvimento de uma equação para a amplitude e comprimento de onda. Assumindo que a onda interfacial é monótona na direção do raio de curvatura, o movimento relativo entre as fases provocaria uma diferença de pressão na interface em um plano normal esta, fazendo com que a amplitude da onda aumentasse. Em outras palavras, a equação de Bernoulli é aplicada separadamente para ambas as fases ao longo de meio comprimento de onda e a condição de salto, i.e., o acoplamento das equações, é feito pela pressão na interface.

No estudo de Dymant e Boudlal (2004), que obteve soluções analíticas para escoamento em tubos com inclinação negativa, uma teoria é proposta para a transição de escoamento estratificado com ondas arredondadas (Fig. 10) para o escoamento pistonado gás-líquido em tubos circulares. As equações de conservação da massa e de quantidade de movimento são utilizadas para o desenvolvimento de um critério de estabilidade. O modelo proposto é válido para uma certa gama de inclinações, o gradiente de pressão é pequeno ao longo do tubo e a tensão superficial desprezível. O domínio de ocorrência do escoamento pistonado em inclinações negativas é satisfatoriamente predito.

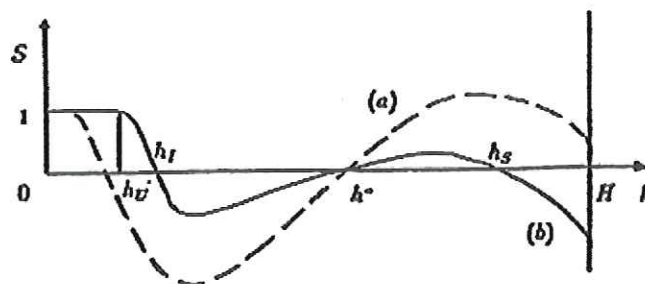


Figura 10 Variação de ondas em escoamento descendente é menor para (a) do que para (b).: (a)---possível escoamento pistonado; (b)—escoamento ondulado. Dymant e Boudlal (2004)

A investigação detalhada da dissipação de energia interfacial em escoamento bifásico líquido-líquido foi observada por Kerle; *et al* (2002). Usando análise de vídeo em tempo real, eles monitoraram a formação e coexistência de dois filmes líquidos provenientes de uma mistura e, em particular, a geração de uma formação nebulosa subsequente de uma das fases. Uma frente de dissipação se propaga da extremidade da amostra e é sugerido que o efeito de Marangoni seria responsável pelo início e propagação subsequente, por um mecanismo que envolve ruptura rápida de buracos à frente da estrutura, como mostra a Fig.10 abaixo. O movimento da camada líquida conduz o filme líquido que se desprende da camada superior; com isso a camada começa a mover-se, seu escoamento torce o filme mais baixo, enquanto conduz à formação de uma onda no líquido mais baixo, vide (Fig.11).

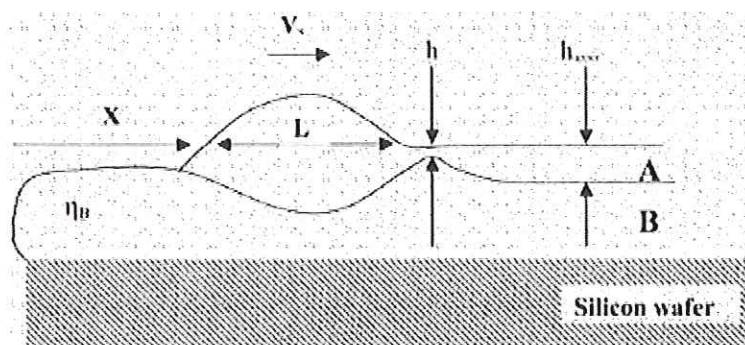


Figura 11 - Uma ilustração do mecanismo sugerido para o progresso da dispersão Kerle; *et al* (2002)

Historicamente, pouco foi feito com o objetivo de se obter dados que sirvam para prever com segurança o padrão de escoamento e a perda de pressão num escoamento contendo água e óleo. Inclinando uma tubulação contendo um escoamento de óleo e água, as forças de equilíbrio, às quais os fluidos estão expostos, se modificam. A força da gravidade pode agora ser separada em suas componentes (normal e paralela ao eixo da tubulação). A componente normal da gravidade promove a segregação do fluido, semelhante para os casos de linhas horizontais. A componente axial por sua vez num escoamento ascendente faz com

que a fase mais densa desacelere, enquanto que o contrário acontece num escoamento descendente. Foi estudado experimentalmente por Lum e Angeli (2004) um escoamento bifásico água e óleo com inclinação de 5 graus positivos em um tubo de aço de 38-mm ID. Os resultados foram comparados com o modelo de dois fluidos. As duas fases do fluido possuem uma dispersão na interface. À baixas velocidades de mistura, a fração volumétrica de uma das fases crescia em relação à outra. Comparando esses resultados com o escoamento horizontal, os autores notaram que com o aumento de água na secção o gradiente de pressão caía.

Quanto à estrutura da interface na seção transversal, Brauner; *et al* (1996) propõe que a configuração de uma interface plana entre duas camadas estratificadas é apropriada para sistemas bifásicos que são dominados pela gravidade, como é o caso de sistemas de ar-água que sofrem a ação da gravidade. Porém, para um sistema bifásico geral, o básico de uma configuração *in-situ* é o estratificado com uma interface curvilínea. A prescrição da curvatura na interface é uma característica exigida para o entendimento da transição para uma dispersão de óleo em água e fenômenos de transporte associados. São empregadas considerações de energia para prever a configuração da interface. A curvatura da interface é função das propriedades físicas dos fluidos *in-situ*, dimensão de tubo, adesão na parede e gravidade. A predição genérica da curvatura da interface requer uma relação de fechamento para uma solução completa do escoamento estratificado com interfaces curvilíneas.

Brauner *et al.* (1998) estudaram a curvatura da interface na seção transversal do tubo, motivados pela necessidade de uma ferramenta prática para realizar um prognóstico sobre a forma da interface no escoamento estratificado. O modelo de dois fluidos foi utilizado para solucionar a equação de quantidade de movimento para uma curvatura interfacial variável. A grande maioria dos modelos de dois fluidos estratificados assume uma interface plana como configuração básica. Esse estudo mostrou que, na prática, a interface possui ou uma forma convexa ou côncava.



### **3 - TRABALHO EXPERIMENTAL**

Visando uma boa compreensão dos aspectos fundamentais para a pesquisa aqui realizada, nos reportamos ao estudo experimental, realizado com o intuito de adquirir dados que pudessem ser validados a modelagem matemática que será apresentada mais adiante. A coleta da maior parte dos dados foi feita a priori nas instalações experimentais multifásicas da Shell Exploration and Production B.V., Rijswijk, Holanda, mas o tratamento das imagens foi feito no Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, (EESC-USP). Parte dos dados foi coletada no próprio NETeF.

#### **3.1. Facilidades multifásicas da Shell Exploration and Production B.V., Rijswijk, Holanda.**

Os experimentos reportados neste trabalho foram conduzidos nas instalações experimentais multifásicas da Shell Exploration and Production B.V., Rijswijk, Holanda. Escoamento óleo (Shell Vitrea 10, densidade média  $830 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade  $7.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )-água (salgada, densidade média  $1060 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade  $0.8 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) foi investigado em uma tubulação de aço inoxidável de 8,28 cm d.i. e 15,5 m de comprimento. Na linha havia uma seção de teste transparente de 1,15 m em acrílico para visualizações. Entre a seção de mistura e a seção de teste um comprimento de 250 d.i. foi deixado para o desenvolvimento do escoamento bifásico. A linha estava fixada a uma mesa inclinável que podia ser desviada

pneumaticamente da horizontal. Para a identificação dos padrões de escoamento foram utilizadas imagens digitais obtidas via câmera filmadora digital (Sony digital video recorder DSR-20P) em conjunto com informações de frações volumétricas *in-situ* obtidas via densímetro de raios gama (Berthold LB 444). O leitor pode se referir a Rodriguez e Oliemans (2006) para uma descrição detalhada da montagem experimental e técnicas experimentais empregadas.

Ondas interfaciais estáveis foram detectadas em escoamento ascendente e descendente. Uma seção de filmagem consistindo de uma caixa retangular de acrílico cheia d'água foi montada em torno do tubo de acrílico. Efeitos de lente e paralaxe foram corrigidos através de calibração. Uma escala calibrada foi inserida no tubo de acrílico cheio d'água. O comprimento da escala foi então comparado com uma outra escala montada do lado de fora sobre a caixa de acrílico. Os comprimentos de onda foram determinados da análise das imagens digitais capturadas dos filmes gravados. Este trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos - NETeF - da Escola de Engenharia de São Carlos -EESC-USP. Para as análises pretendidas, foram feitas capturas de 25 (vinte e cinco) *frames* aleatoriamente, dentro de aproximadamente 1 (um) minuto de intervalo de filmagem. Para a captura dessas imagens foi utilizado o software Adobe Premiere® 6.0.

### **3.2. Facilidades experimentais multifásicas do Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos, NETeF-EESC-USP.**

Parte das imagens das ondas interfaciais que serão apresentadas nesta dissertação, e que serviram para comparações qualitativas com os dados de Rijswijk, foram coletadas nas

instalações do NETeF-EESC-USP. Portanto, essas instalações serão apresentadas em detalhes a seguir.

### **3.2.1. "Loop" multifásico do NETeF-EESC-USP**

Nesta seção apresentaremos detalhadamente a descrição dos equipamentos, software e instalações utilizados. Alguns equipamentos foram desenvolvidos, comprados, projetados, calibrados e construídos durante a pesquisa. Cada um deles será apresentado neste capítulo para poder melhor caracterizar as instalações de laboratório que foram utilizadas.

Os testes experimentais de comparação foram executados na Universidade São Paulo, unidade localizada na cidade de São Carlos (EESC - USP). Os recursos físicos do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF) do departamento de Engenharia Mecânica serviram de suporte para execução dos testes necessários à pesquisa.

O NETeF dispõe em suas instalações de três tubulações horizontais em acrílico com três diâmetros diferentes, o comprimento total das linhas é de 12 metros, projetadas para gerarem diversos tipos de padrões de escoamento do tipo gás-líquido, líquido-líquido ou gás-líquido-líquido. Além dessas tubulações em acrílico foi montada uma tubulação em vidro borossilicato que posteriormente será utilizada para escoamentos do tipo líquido-líquido e líquido-líquido-gás, contendo água, ar e óleo. Para realização dos testes outros equipamentos foram utilizados para monitorar e gerar os padrões de escoamento necessários. Dentre eles podemos citar:

- Separador de água e óleo com capacidade de 2200 litros;
- Estrutura para elevação da tubulação de teste;
- Instrumentação para medir inclinação da tubulação de teste;

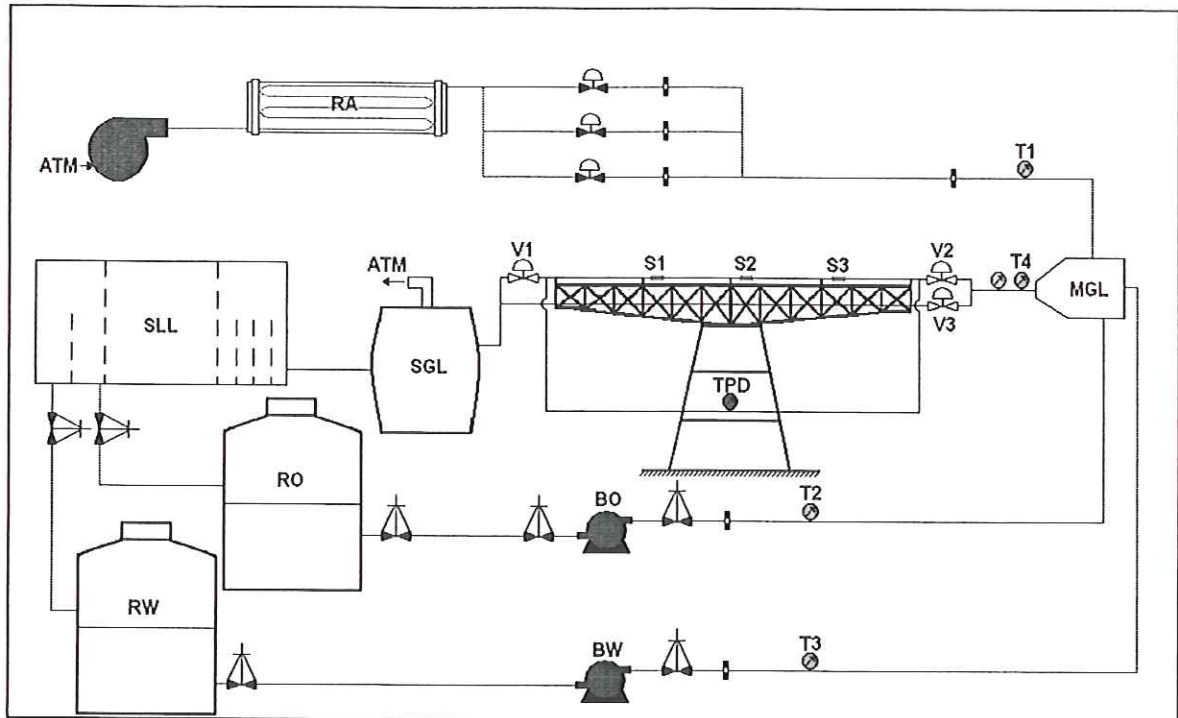
- Dispositivos de segurança para calibração e controle dos instrumentos de medida (válvulas, pressostato, sensores, etc.);
- Linha adicional em vidro com diâmetro interno de 26 mm;
- Linha auxiliar de *by pass*;
- Válvulas solenóides para corte rápido de fluxo;
- Dimensionamento e instalação de uma bomba com cavidades progressivas para óleo e água;
- Instalação de termopares;
- Calibração dos medidores de vazão (placas de orifício).

A tubulação de teste foi projetada para gerar diversos padrões de escoamentos, com velocidades máximas de mistura ar-água da ordem de 11 m/s. A tubulação de vidro, com 26 milímetros de diâmetro interno, foi testada a uma pressão interna constante de 400 KPa. Água foi utilizada para os testes de escoamento a temperatura ambiente de aproximadamente 27° C. Os valores de densidade e viscosidade adotados são  $\rho_w=1000 \text{ Kg/m}^3$  e  $\mu_w=0,001 \text{ Pa.s}$  respectivamente. O ar atmosférico foi utilizado para geração de padrões bifásicos com água e ar.

As linhas de teste tiveram que ser elevadas três metros acima do solo, pois na montagem anterior esta ficaria abaixo do nível do separador impedindo que o escoamento chegasse ao mesmo por gravidade. Com a elevação das linhas de teste se tornou possível realizar escoamentos ascendentes e descendentes numa inclinação máxima de 30° para ambos os casos. A Figura 12 mostra esquematicamente como funciona nossa instalação para teste dinâmico.















A Tabela 12 serve como legenda do esquema de teste utilizado durante a calibração



dinâmica dos instrumentos.

Figura 12. Instalação de Teste Dinâmico

Tabela 1. Relação dos Instrumentos e Equipamentos Utilizados

Equipamentos e Instrumentos de Teste			
	Válvula de Esfera		Pressostato
	Compressor de Ar		Termopar
	Bomba de Óleo		Medidor Diferencial de Pressão
	Bomba de Água		Placa de Orifício
	Válvula Solenóide		Sensor Capacitivo
	Válvula Pneumática		Misturador de Gás-Líquido

Ainda, para a Figura 12, temos que:

RO – Reservatório de Óleo

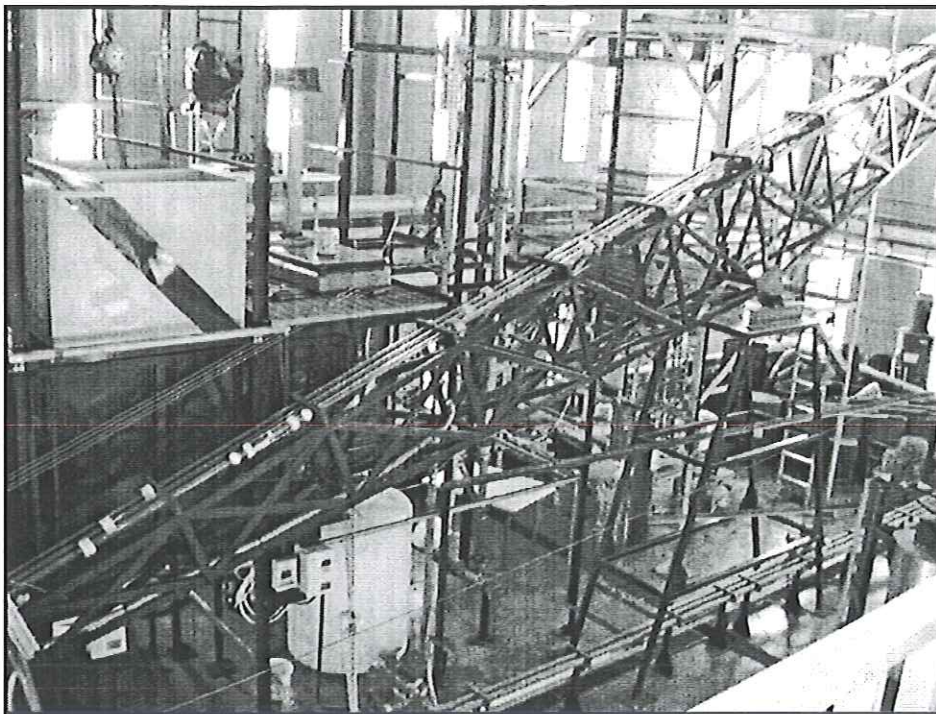
RW – Reservatório de Água

SGL – Separador de Gás-Líquido

SLL – Separador de Líquido-Líquido

RA – Resfriador de Ar (Torre de Resfriamento)

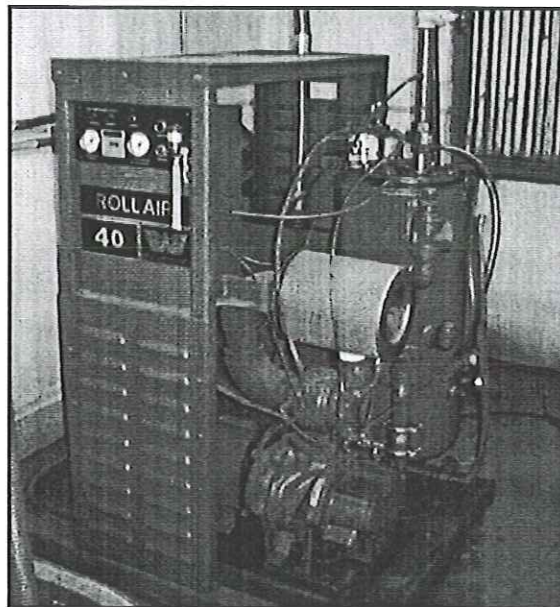
Para uma melhor visualização do sistema, a Figura 13 mostra as instalações do Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos da Escola de Engenharia de São Carlos (NETeF-EESC-USP).



**Figura 13.**Foto das Instalações do NETeF na Universidade São Paulo em São Carlos

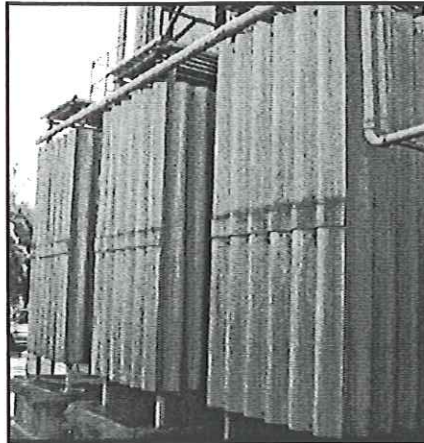
### 3.2.2. Sistema de suprimento de ar

Um compressor Worthington de 60 CV centrífugo é responsável pelo suprimento de ar para o sistema, como mostra a Figura 14. Operando com uma velocidade de até 40 m/s e pressão de saída de 700 KPa, o compressor alimenta um reservatório de ar que equaliza a variação de pressão do sistema, evitando assim variações de pressão inconvenientes para testes em regime permanente.



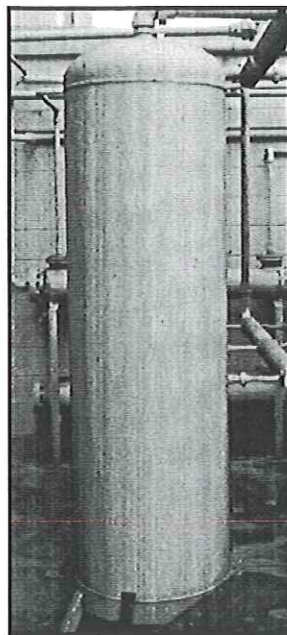
**Figura 14. Compressor de Alimentação de Ar**

O ar ao sair do compressor é refrigerado por três torres de resfriamento (Figura 15), seguindo por uma ramificação de três vias contendo uma válvula de controle pneumático em cada. Esse sistema de válvulas é responsável pelo controle pneumático da vazão de ar que chega às linhas de teste.



**Figura 15. Torres de Resfriamento de Ar**

O tanque acumulador mostrado na Figura 16 serve como “pulmão” do sistema, evitando uma eventual pulsação de ar, mantendo constante a pressão da linha.



**Figura 16. Tanque Acumulador de Ar**

Conforme pode ser visto na Figura 12, as linhas de ar possuem três ramificações com uma válvula de acionamento pneumático em cada uma delas. A principal função dessas válvulas é controlar a vazão de ar que sai para linha de teste. A quantidade de ar é medida através de medidores de vazão tipo placas de orifício, que estão localizados a jusante. As três

ramificações possuem vazões nominais de 14 m<sup>3</sup>/h, 40 m<sup>3</sup>/h e 100 m<sup>3</sup>/h, sendo possível através delas o ajuste fino da vazão do ar que entra no sistema.

### 3.2.3. Sistema de suprimento de água

A água será bombeada por uma bomba centrífuga, modelo NDS10 (fabricante EBERLE) com 10 CV de potência, de um tanque de PVC, passando por uma tubulação em PVC até atingir a linha de teste em vidro. O sistema possui ainda um variador de frequência de 7,5 kW para o controle da rotação da vazão de água e outro de 15 kW para o controle da vazão de óleo. A Fig.17 (a) e (b) mostra respectivamente os variadores de 7,5 kW e 15 kW. Estes controladores são acionados remotamente via sistema CAN que libera um sinal de corrente de 4 a 20 mA, utilizando um programa em plataforma LabView ®.

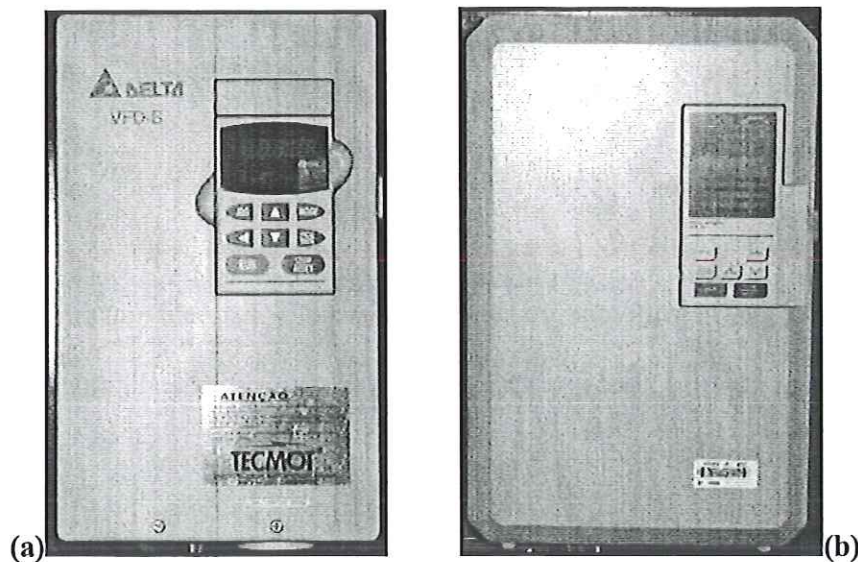
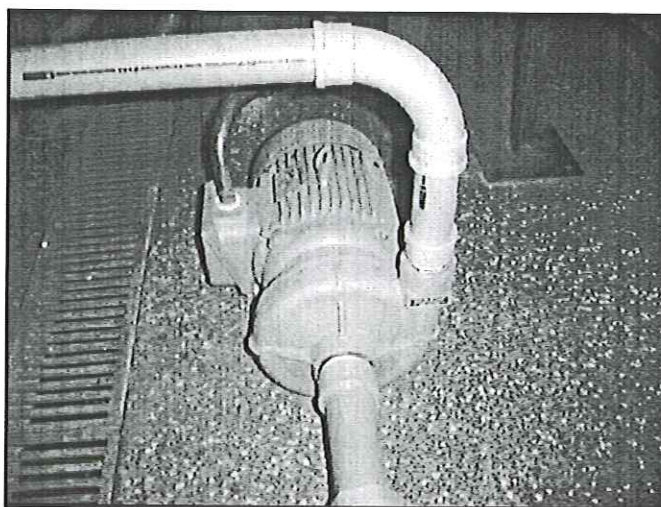


Figura 17. Variadores de Frequência para Controle de Água e de Óleo

A água que sai do tanque segue para linha de teste, após a linha passa por um tanque para separação de gás e, então, entra no separador de líquidos. Por fim, entra novamente no tanque de PVC que está ligado a seção de teste. A Figura 18 mostra a bomba centrífuga usada para a movimentação de água.

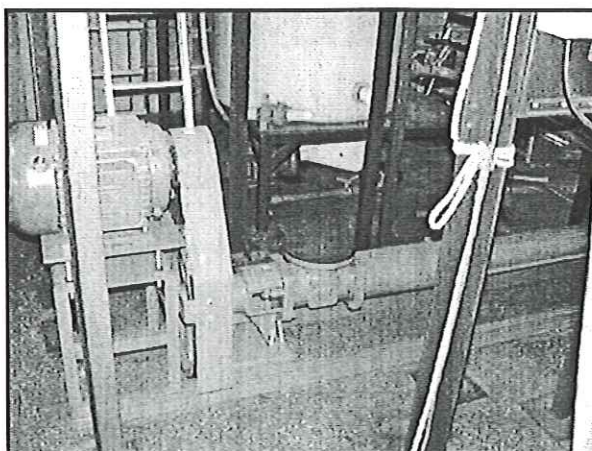


**Figura 18. Bomba de Alimentação de Água**

#### **3.2.4. Sistema de suprimento de óleo**

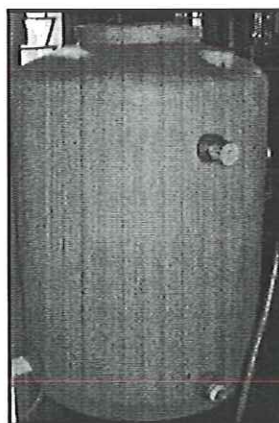
Uma moto bomba de cavidades progressivas modelo 2WHT 53/F, fabricante Weatherford com potência de 10 CV, foi instalada para o bombeamento de óleo (Fig.19). As bombas instaladas no sistema foram projetadas para atender uma perda máxima de pressão da ordem de 10 bar e uma vazão máxima de 12,6 m<sup>3</sup>/h, sempre trabalhando afogadas em relação aos seus respectivos reservatórios.

O sistema de suprimento de óleo é bastante semelhante ao de água e simetricamente colocado ao lado do mesmo. O óleo escolhido, do fabricante Shell, tem propriedades similares às do petróleo brasileiro (viscosidade 100 mPa.s e densidade 860 kg/m<sup>3</sup>). Essa característica se torna importante para a simulação do transporte de líquido numa situação real.



**Figura 19. Bomba de Alimentação de Óleo**

O óleo segue um circuito fechado similar ao da água, retornando no final do processo para um tanque próprio de PVC. A Figura 20 mostra um dos tanques de armazenamento.

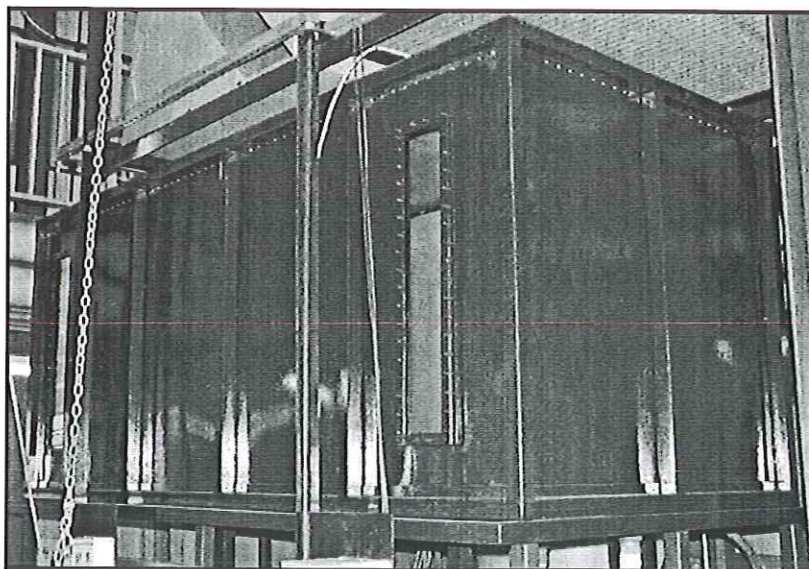


**Figura 20. Tanque de PVC para Armazenamento**

### **3.2.5. Separador de água e óleo**

Um separador de água e óleo de placas coalescentes foi projetado para otimizar o funcionamento do sistema no que diz respeito à separação de líquidos. A capacidade do mesmo é de 2200 litros, onde metade do conteúdo será preenchido por água e o restante por

óleo. O sistema de separação encontra-se posicionado de forma a garantir o fluxo transversal através das placas e suas dimensões foram especificadas para se encaixar no espaço físico disponível do laboratório. Testes com material oleofílico e hidrofílico foram realizados a fim de garantir o melhor desempenho possível do equipamento. Dessa forma, esperamos ter um equipamento que separe em linha a água do óleo e vice versa. O revestimento interno das placas foi feito com uma resina especial a base de poliéster para melhorar sua afinidade com a água e repulsão ao óleo em uma das faces. Fenômeno recíproco deve ocorrer na face oposta da mesma. O separador está dividido em três câmaras; a primeira, na entrada, possui quatro chicanas para regularizar o escoamento da mistura antes deste chegar até as placas separadoras. Na segunda câmara, onde ocorre efetivamente a separação, encontram-se as placas corrugadas que realizam a separação dos fluidos. A terceira câmara serve apenas para armazenar os volumes de água e óleo, que retornam por gravidade para os tanques de armazenamento. A Fig.21 mostra o separador de óleo que foi projetado.

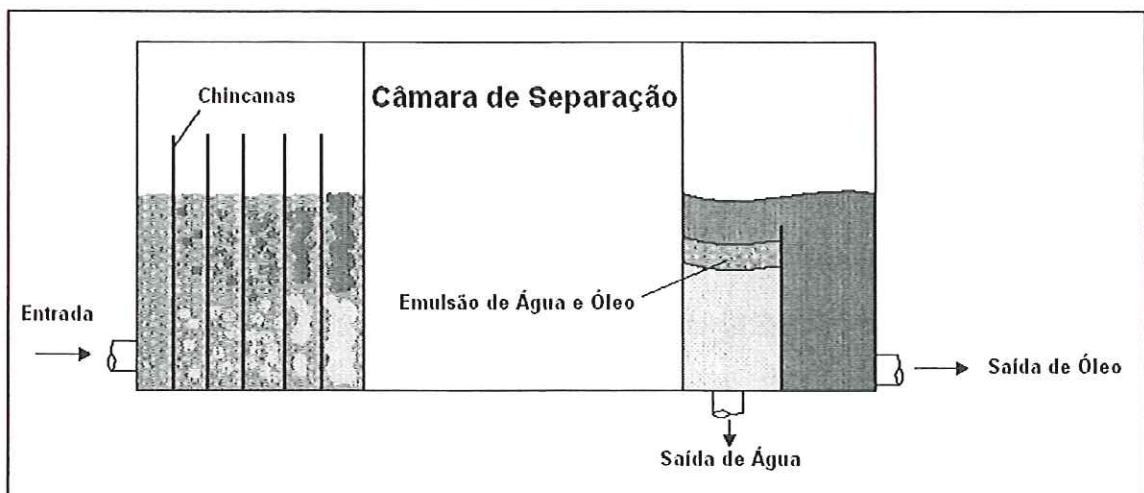


**Figura 21. Separador de Água e Óleo**

A separação dos fluidos água e óleo acontece principalmente na câmara que contém as placas de separação coalescentes. O princípio de separação consiste em facilitar a aglutinação



(coalescência) das bolhas de água e óleo que se encontram misturadas numa dispersão homogênea, formando bolhas cada vez maiores e aumentando assim sua velocidade de ascensão ou descenso. Estas bolhas se separam naturalmente devido à diferença de densidade entre os fluidos. Na última câmara a mistura já estratificada em duas fases bem definidas, com o óleo sobre a água, é direcionada, cada fase movimentada para seu respectivo reservatório por duas saídas próprias; conforme mostra a Fig.22, a seguir.



**Figura 22.**Esquema do Separador de Água e Óleo

### **3.2.6. Instrumentos de medida comercial**

Alguns periféricos encontram-se instalados na estrutura montada para os testes dinâmicos (sensores de pressão diferencial, pressostato, medidores de vazão, válvulas solenóides, etc.), que servem para auxiliar o monitoramento do escoamento.

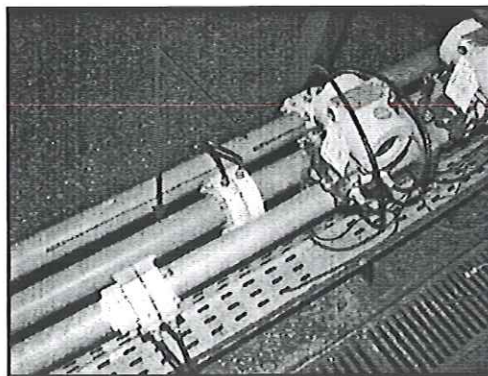
#### **1) Medidores de Vazão**

Os medidores de vazão de ar são do tipo placas de orifício. Estes geram um diferencial de pressão mensurável entre a placa e através dele pode-se estimar a vazão na seção, pela

determinação da velocidade superficial. Este dispositivo oferece alta confiabilidade, porém agrega algumas desvantagens, como aumento da perda de carga, restrita faixa de medição (3x), desgaste dos componentes da placa, etc. A medida do diferencial de pressão é indicada num transmissor digital SMAR com pressão nominal 2300 psi com variação máxima de 12,5 a 500 milibar que, além de registrar, manda um sinal de 4 a 20 mA para uma estação de trabalho. Outro medidor similar foi utilizado na linha de 40 m<sup>3</sup>/h para a aferição da placa de orifício, com uma variação máxima de pressão de 1,25 a 50 milibar e pressão nominal máxima é de 1050 psi. Estes medidores medem a queda de pressão na placa, que serve como referência para regular a abertura das válvulas de passagem de ar. Na Fig.23 está indicado o local de instalação das placas de orifício de água e ar. Maiores detalhes sobre sua aferição serão dados no capítulo três desta dissertação.

## 2) Transdutores de Pressão

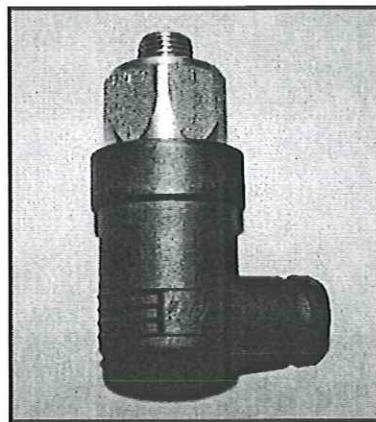
Alguns medidores de pressão foram instalados na linha de suprimento de ar e na tubulação de teste.



**Figura 23. Medidores de Vazão**

Os transdutores são do fabricante Danfoss, tem escala de 1 a 12 bar e servem para auxiliar principalmente na aferição das placas de orifício do ar. Na linha que sai do misturador

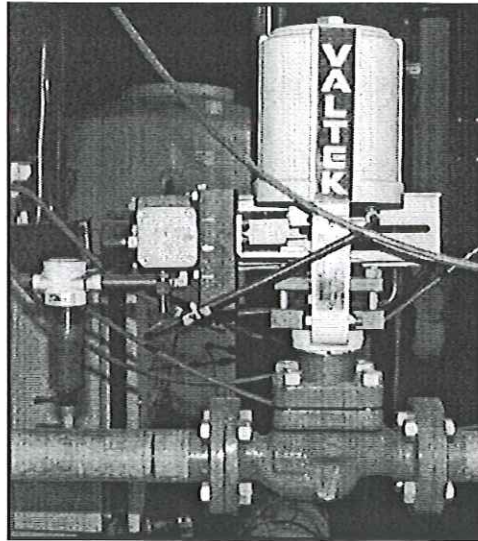
de fluidos foi instalado, além de transdutores, um pressostato para garantir que a pressão da tubulação de teste não ultrapasse 200 KPa (Fig.24). Os transdutores desta linha têm escala que varia de 0 a 1 bar. Ainda na mesma estrutura de teste encontra-se instalado um transdutor diferencial de pressão da Novus que serve para auxiliar na determinação da inclinação. Maiores detalhes sobre o mesmo serão dados posteriormente.



**Figura 24. Pressostato de Segurança**

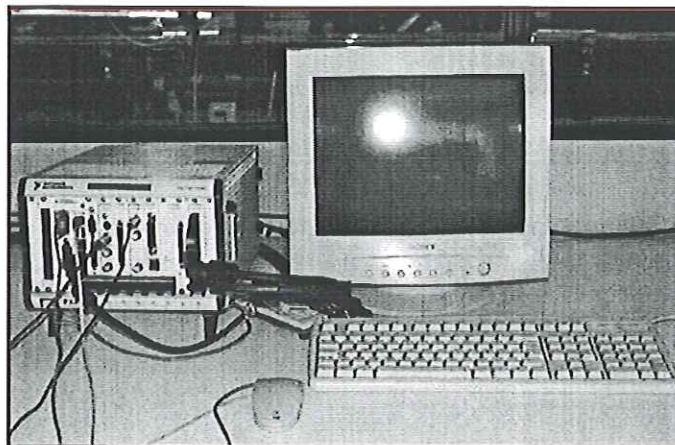
### 3) Controladores de Vazão de Ar

Três válvulas pneumáticas Valtek (Fig.25) controlam a injeção de ar no sistema, cada uma instalada em uma ramificação diferente de ar. O controle das válvulas é feito remotamente por uma estação de trabalho PXI-1042 (Fig.26) da *National Instruments®*, ou manualmente através de controladores da SMAR (AM01P). As três válvulas instaladas mandam um sinal padronizado de 4 a 20 mA para a placa de aquisição de sinais para o controle remoto. Elas têm diferentes valores nominais de vazão de ar (14, 40 e 100 m<sup>3</sup>/h) dependendo da ramificação.



**Figura 25.**Válvula de Controle Pneumático da Vazão de Ar

Todos os dados coletados durante os testes dinâmicos chegam a uma placa de aquisição modelo SCB-100 da *National Instruments®*. A mesma tem uma velocidade de 200 KHz e uma resolução de medida de 4096 pontos ou 12 bits, podendo ser amplificada em até 50 vezes. Possui 24 portas digitais e 8 entradas diferenciais e 2 saídas analógicas. As portas digitais foram utilizadas somente para o acionamento das válvulas de corte rápido e as entradas diferenciais analógicas foram utilizadas para ligar toda instrumentação. Os atuadores que controlam as vazões de água, ar e óleo são acionados via sistema CAN de baixa frequência.



**Figura 26.**Estação de Trabalho Remoto

### 3.2.7. Dispositivo de inclinação da tubulação

Para determinar a inclinação, alguns dispositivos tiveram que ser adaptados para executar medidas precisas e confiáveis. A medida da inclinação da tubulação de testes foi feita utilizando um transdutor de pressão diferencial da Novus. Este instrumento nos garante uma precisão aproximada de 0,5°. Este medidor é capaz de medir inclinações de -30° a +30°, através do sinal de tensão enviado por um transdutor de pressão diferencial mostrado na Fig.27. A calibração foi feita com a ajuda de um medidor de nível de precisão, colocado na linha de teste a partir da posição 0°. A partir do marco inicial zero da linha, registramos a cada grau de inclinação o valor de tensão, levantando assim uma curva de calibração para o sensor. O mesmo funciona registrando a pressão diferencial entre as extremidades da linha de teste. Para isso, em seus pontos de tomada de pressão conectamos uma tubulação cheia de água, medindo a coluna de líquido e relacionando-a ao desnível da estrutura.



Figura 27. Medidor Diferencial de Pressão

### 3.2.8. Tubulação de *By Pass* e Sistema de Aprisionamento de Fluido

Para executar a calibração dinâmica dos sensores capacitivos, um sistema de *by pass* foi construído. O *by pass* viabilizou a aplicação das válvulas de fechamento rápido. Estes testes serviram principalmente para comparar, avaliar e determinar a precisão da medida de fração volumétrica. Na verdade, esse procedimento serviu principalmente para parametrizar as medidas de fundo de escala de nosso instrumento.

Durante a medição, nenhum líquido deveria penetrar na seção de teste, logo, um conjunto de válvulas de acionamento rápido foi montado no circuito. Estas válvulas devem ser estanques, de acionamento rápido e garantir pouca influência no desenvolvimento do escoamento. A montagem de três sondas capacitivas ao longo do trecho de teste tem como objetivo a obtenção de valores de frações volumétricas *in situ* em posições distintas da tubulação. Desta forma podemos calcular uma média global se necessário ou avaliar o comprimento de desenvolvimento do escoamento bifásico.

A Fig.28 mostra o esquema montado para utilização do *by pass*. Num escoamento em regime permanente as válvulas solenóides número V1 e V2 encontram-se abertas permitindo a passagem livre de fluido pela seção de teste. Este aspecto é peculiar, pois garante certo nível de segurança ao circuito. A válvula na linha auxiliar de *by pass* (V3) deve manter-se totalmente fechada, impedindo o desvio de fluido. Para isso esta deve se manter energizada juntamente com a V2 que é normal fechada. Energizando V1 e desenergizando V2 e V3 simultaneamente fechamos a linha de teste e abrimos a passagem para o *by pass*, fazendo com que todo o escoamento se desloque pela válvula V3. Caso alguma falha ocorra na abertura das válvulas, uma sobre pressão será imposta à linha de suprimento. Este aumento de pressão aciona o pressostato mostrado na Fig.24. O mesmo está instalado na saída da tubulação do misturador e manda um sinal para o sistema de aquisição que desarma o funcionamento das bombas. No momento da abertura da válvula solenóide V3, as válvulas V1 e V2 devem permanecer fechadas, evitando o retorno do fluido para linha principal.

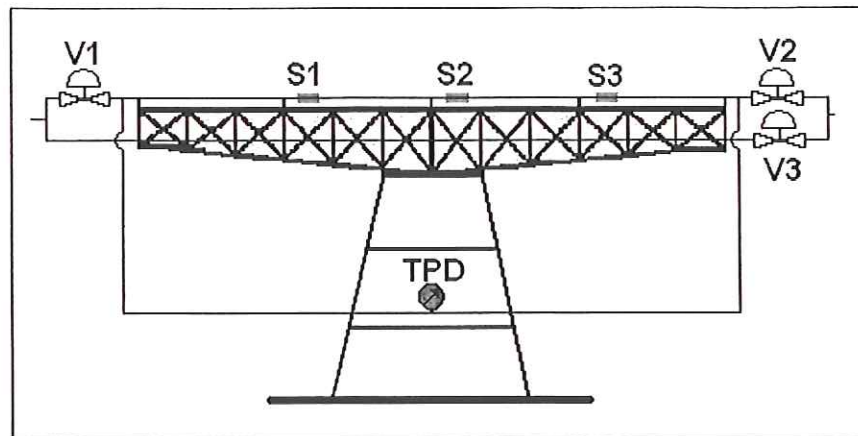


Figura 28. By Pass de Segurança

### 3.3. Técnicas experimentais.

#### 3.3.1. Coleta manual de dados.

Para obter as propriedades geométricas das ondas interfaciais (comprimento, amplitude e velocidade), foi desenvolvido um software de aquisição de coordenadas. Dada uma imagem e esta possuindo um quadro de referência previamente calibrado, o mesmo é capaz de fornecer as ordenadas e abscissas de pontos distintos, dentro da mesma figura. Em cada *frame* analisado havia uma estrutura ondulatória formada entre as fases, com a parte de baixo da tubulação contendo água e a parte de cima contendo óleo, como observado na Fig.29.

A Fig.29 foi extraída dos filmes via software de captura de imagens Adobe Premiere® 6.0. Observamos diferentes estruturas ondulatórias dependendo dos parâmetros do escoamento, cada uma com sua particularidade. Utilizando o software de aquisição de coordenadas, foi possível determinar o comprimento de onda ( $\lambda$ ), definido como a distância entre duas cristas ou vales. Para identificar duas cristas de onda consecutivas utilizamos o fato

de que deve existir uma inversão do valor da derivada; teríamos duas cristas consecutivas somente quando a derivada em uma posição determinada no espaço possuir valor igual a 0 (zero), passar a resultados negativos, em seguida positivos e voltar a 0 (zero) novamente.

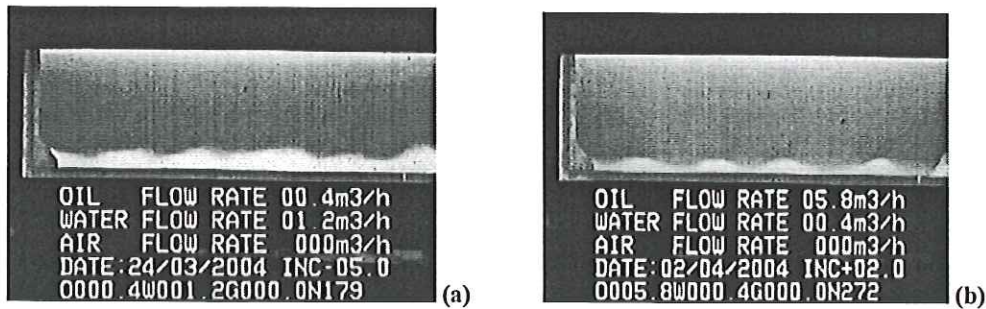


Figura 29 - (a) Ondas interfaciais observadas; (a) inclinação de 5 graus negativos; (b) 2 graus positivos.

Com a coleta de dados, relativa a cada *frame*, foi possível extrair a média do comprimento de onda interfacial para um único *frame*. Posteriormente, foi feito o cálculo do comprimento de onda médio de todos *frames* com a mesma inclinação e mesmo par de vazões. Finalmente, foi possível agrupar os resultados obtidos e calcular o comprimento médio global para cada par de vazões e sua respectiva inclinação. Na Fig.30, o comprimento médio global ( $\lambda_m$ ) está representado nessa distribuição provavelmente gaussiana.

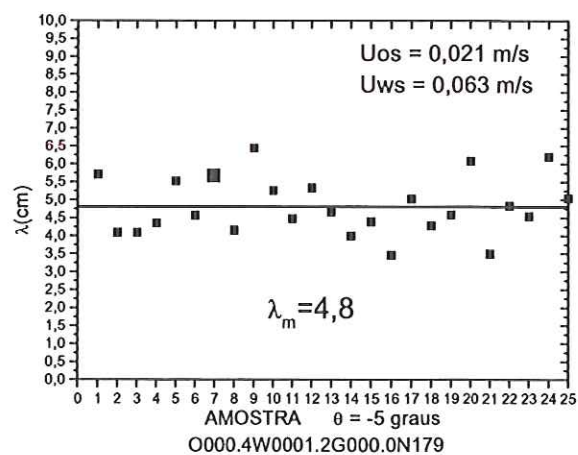


Figura 30- Representação das médias de cada *frame* analisado e valor médio ( $\lambda_m$ ).



A média do *frame* da Fig. 29(a) está representada pelo ponto de cor vermelha na Fig. 30 e  $\lambda_m = 4,8$  cm representa a média global de todos os comprimentos de onda médios extraídos de cada *frame* que possuía a inclinação ( $-5^\circ$ ) e os mesmos pares de vazão explicitados na legenda da Fig.29(a).

As Figs. 31, 32 e 33 apresentam condições de escoamento semelhantes, i.e., mesmos pares de vazão e mesma inclinação. Entretanto, as Fig. 31 (a), 32(a) e 33(a) foram adquiridas via câmera filmadora digital (*Sony DSC-F717. 5.0 mega pixels*) no Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), enquanto que as Fig. 31(b), 32(b) e 33(b) foram obtidas com o uso de uma câmera filmadora digital (*Sony digital video recorder DSR-20P*) nas instalações experimentais multifásicas da Shell Exploration and Production B.V., Rijswijk, Holanda.

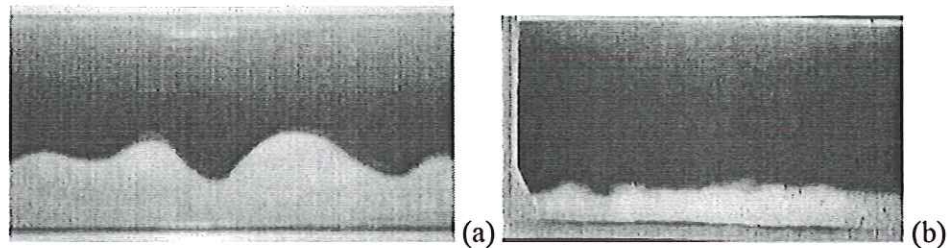


Figura 31.  $U_{os}=0,072$  e  $U_{ws}=0,099$ , inclinação  $\theta = 5$  graus negativos. (a) 1 pol. e viscosidade do óleo de 80 mPa.s. e (b) 3 pol. e viscosidade do óleo de 7,5 mPa.s.

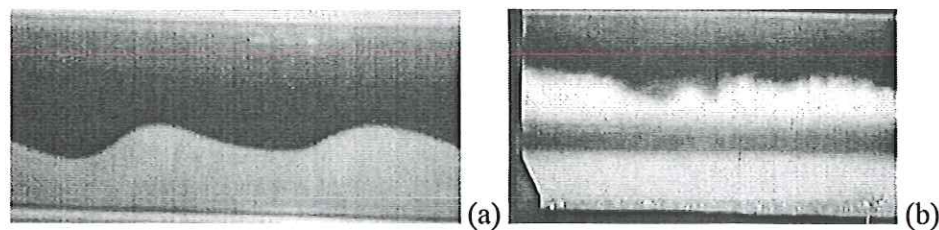


Figura 32.  $U_{os}=0,074$  e  $U_{ws}=0,098$ , inclinação  $\theta = 2$  graus positivos. (a) 1 pol e viscosidade do óleo de 80 mPa.s. e (b) 3 pol. e viscosidade do óleo de 7,5 mPa.s.

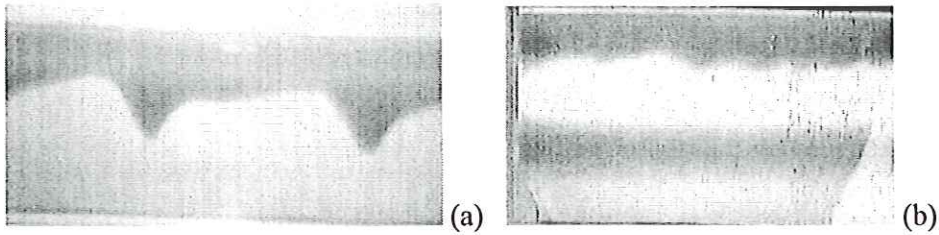


Figura 33  $U_{os}=0,072$  e  $U_{ws}=0,296$ , inclinação  $\theta = 5$  graus positivos. (a) 1 pol e viscosidade do óleo de 80 mPa.s. e (b) 3 pol. viscosidade do óleo de 7.5 mPa.s.

Percebem-se efeitos do diâmetro da tubulação, material da parede e diferença de viscosidades dos fluidos. As ondas interfaciais observadas no NETeF, em tubo menor de vidro (hidrofílico) e com óleo de 80 mPa.s, são mais estáveis hidrodinamicamente. Não se percebe, por exemplo, qualquer indício de formação de dispersão na interface. As ondas são consideradas intermediárias e possuem um comportamento claramente linear. As ondas observadas em condições de escoamento semelhantes em Rijswijk, em tubo maior de aço (oleofílico) e com óleo de 10 mPa.s, também se mostraram estáveis no tempo, entretanto não raro foram detectados focos de dispersão na interface. Tal comportamento era esperado, considerando que para o tubo maior a tensão interfacial desempenha um papel menos relevante para a preservação da interface ondulada. Além disso, quanto menor a viscosidade do óleo, menor a dissipação da energia proveniente das flutuações turbulentas da fase aquosa na interface. Apesar disso, as estruturas das ondas interfaciais observada no NETeF e em Rijswijk possuem uma notável semelhança, lembrando ondas gravitacionais em água rasas, como ondas do mar que se aproximam da praia.

Aproveitamos para definir agora o que são, em nosso entendimento, ondas intermediárias, longas e curtas:

- Ondas longas,  $\lambda > 10D$  (comprimento de onda é maior que 10 vezes o diâmetro interno da tubulação), a interface é quase plana, a amplitude da onda é pequena em relação à altura da camada de água.

- Ondas curtas,  $\lambda < D/2$ , a interface é fortemente ondulada e a declividade da onda indica iminência de quebra.

- Ondas intermediárias,  $D/2 \leq \lambda \leq 10D$ , a interface é claramente ondulada, mas apresenta comportamento linear, i.e., longe da quebra.

A coleta manual da velocidade de propagação da onda interfacial, ( $C_v$ ), foi realizada da seguinte forma: depois de fixado um ponto na interface ondulada do escoamento, fora observado o deslocamento do ponto em relação ao tempo médio da trajetória do mesmo. O tempo foi adquirido através da quantidade de frames corridos para cobrir essa trajetória, visto que para cada 1 segundo de filmagem temos 25 frames (Sony digital video recorder DSR-20P). Fazendo uma média dos 10 pontos observados para cada par de velocidades superficiais ( $U_{os}$ ) e ( $U_{ws}$ ) e sua respectiva inclinação ( $\theta$ ) se obteve a velocidade de propagação da onda interfacial ( $C_v$ ), veja Fig. 34 (a) á (d) abaixo:

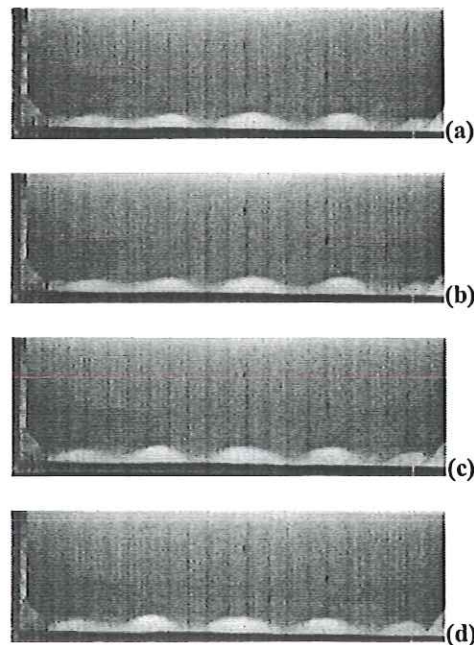


Figura 34 Sequência de frames (a), (b), (c) e (d), deslocamento da direita para esquerda.

### 3.3.2. Análise estatística dos dados

Em processos de coleta de dados, estamos sujeitos a cometer erros sistemáticos e/ou aleatórios, seja a técnica manual ou automática. É de caráter relativo a consideração de que um experimento está livre de imperfeições experimentais. Atendo-nos a esse fato, promovemos essa análise estatística a fim de validar os dados obtidos neste trabalho.

Os gráficos abaixo, foram adquiridos via software livre EstatcampExel, representam a densidade de probabilidade dos comprimentos de onda interfacial adquiridos em nossos experimentos, e o quanto os dados aproximam-se da média dos comprimentos de onda interfacial. Apresentamos apenas um dos 9 (nove) comprimentos de onda adquiridos, visto que o comportamento estatístico é semelhante para todos os comprimentos de onda interfacial.

Na Fig. 35 estão representados todos os 97 comprimentos de onda interfacial retirados de todos os 25 *frames* que possuem velocidades superficiais da água ( $U_{ws}$ ) e do óleo ( $U_{os}$ ), respectivamente, iguais a 0,072m/s e 0,099m/s e inclinação ( $\theta$ ) igual 5 graus negativos.

Esses dados estão compreendidos no teste 6 da Tab.2. Como podemos observar, o gráfico da Fig.35 apresenta uma curva muito próxima a gaussiana. Um fato interessante a ser notado, é que, além do patamar principal, aparecem mais dois patamares em meio à curva. Isso pode representar a existência de mais de um tipo de amostra ou onda interfacial. Esse resultado vem confirmar uma observação experimental: a presença de mais de um tipo de onda interfacial.

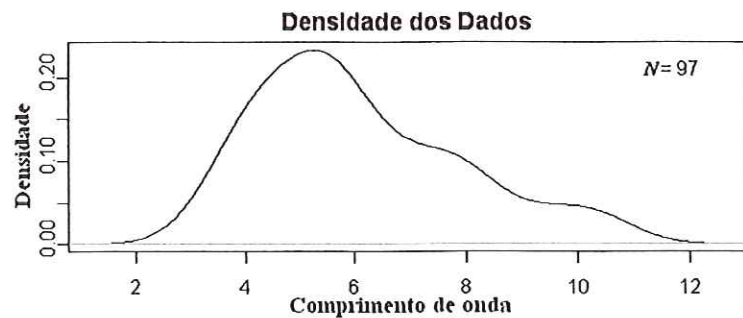


Figura 35 Representação de todos os comprimentos de onda referentes aos 25 frames, com o desvio padrão

Na Fig.36 estão representados os 25 os comprimentos médios de onda interfacial (média de cada frame), retirados de cada um dos frames analisados, isso faz com que a curva fique ainda mais próxima de uma distribuição normal. Esses resultados validam a técnica de coleta dos os comprimentos de onda interfacial médios, como os resultados são bem próximos, isso pode significar que a amostra é representativa da população.

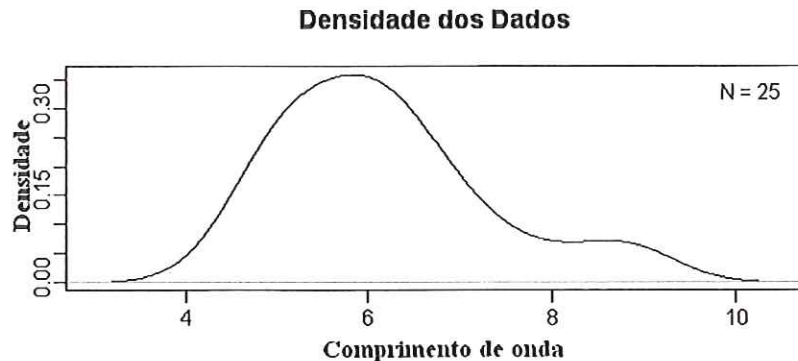


Figura 36 Representação de todos os comprimentos de onda referentes a média de cada um dos 25 frames, com o desvio padrão

Ambas as representações geram um único comprimento de onda médio, porém a representação da Fig.35 mostra com mais clareza que estamos trabalhando com médias não apenas de uma amostra, mas sim de duas ou mais, isso significa que o nosso espaço amostral pode ter um grau de liberdade mais maleável.

A Fig. 37 relaciona os comprimentos de onda com a melhor distribuição representativa dessa amostra. Primeiramente, notemos que a distribuição que melhor se aproxima da média é a distribuição da Fig. 37, essa denominada de distribuição LOG-NORMAL.

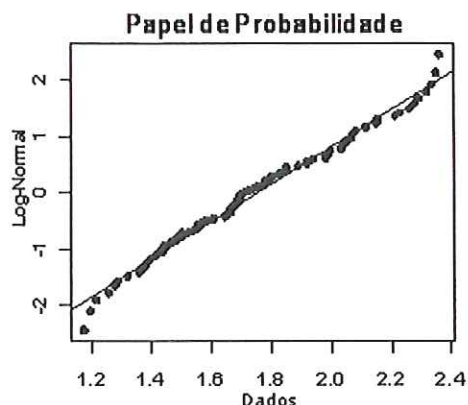


Figura 37 Análise comportamental da distribuição Log-Normal

O Pape de Probabilidade Log-Normal (PPLN) tem por objetivo verificar se os valores de uma determinada variável seguem a distribuição Log-Normal.

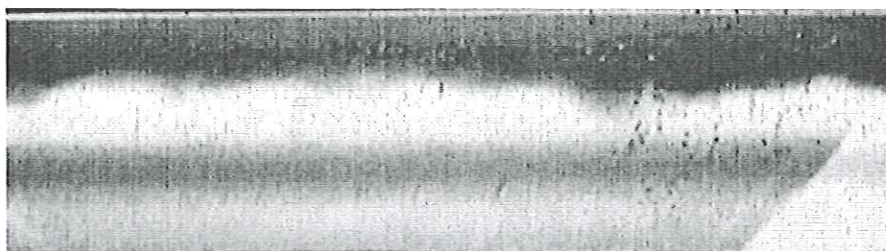
Através da análise comportamental da distribuição contida na Fig. 37 notamos uma forte concentração próxima de  $\mu$ , caracterizando assim uma distribuição próxima da distribuição NORMAL, como havia sido especulado.

Procedimentos análogos foram adotados para a coleta manual da velocidade de propagação da onda interfacial ( $C_v$ ).

### 3.3.3. Coleta automática de dados.

Para a obtenção de dados através dos *frames* dos filmes verificou-se a necessidade do desenvolvimento de um software que tratasse esses *frames* automaticamente, de uma maneira rápida e repetitiva. Buscou-se, assim, implementar esse software em plataforma LabView<sup>®</sup>, que processa as imagens automaticamente, identificando nelas a onda correspondente à

interface água-óleo e fornece os dados desejados, tal como o comprimento e amplitude de onda. A coleta automática de dados foi realizada com o software desenvolvido. Um exemplo de uma imagem analisada está na Fig.38, onde na parte superior pode ser visto o óleo e na parte inferior água, bem como a onda resultante da interação entre as duas fases.



**Figura 38 Exemplo de imagem analisada pelo software**

Para o processamento dessas imagens (*frames* do vídeo) o algoritmo seguiu os seguintes passos:

- Segmentação da imagem (binarização e operações morfológicas).
- Detecção da onda através do gradiente
- Identificação de picos e vales.
- Filtragem dos picos e vales obtidos.

O objetivo da segmentação da imagem é diferenciar o objeto de interesse do plano de fundo da imagem, sendo este o óleo e aquele a água. Verifica-se que a região correspondente ao óleo apresenta tons de cinza com uma intensidade bem menor que a região correspondente à água. Sendo assim, utilizou-se a binarização para a segmentação da água, o que consiste em calcular o histograma dos tons de cinza da imagem. A partir do histograma, determinar-se um valor limiar para o qual *pixels* da imagem que apresentarem um valor menor serão classificados como plano de fundo e os que possuem um valor maior como objeto. Feitas a binarizações, são realizadas operações morfológicas na imagem, sendo estas três dilatações seguidas de três erosões, buscando assim eliminar

regiões pequenas de uma classe (objeto ou plano de fundo) que estão isoladas na outra, denominadas partículas. Na dilatação o objeto é expandido, fazendo assim com que partículas pequenas de plano de fundo imersas no objeto sejam encobertas. Analogamente, a erosão expande o plano de fundo eliminando partículas de objeto imersas no plano de fundo. Como o objeto é primeiramente expandido e depois contraído ele não muda sua área na imagem, não alterando, assim, significativamente a forma da onda. Na imagem segmentada, onde o objeto corresponde à fase de água, obter a onda interfacial entre a água e o óleo corresponde a localizar a borda de cima do objeto. Para isso foi utilizado o gradiente. Nesse método, é analisado o gradiente de cada pixel da imagem, assim, para *pixels* na fronteira de regiões o gradiente será alto, pois há uma variação grande dos tons de cinza em um pequeno espaço. Logo, obtido o gradiente da imagem inteira, é realizada uma limiarização, onde aos *pixels* com gradiente baixo é atribuída a classe plano de fundo, enquanto que para *pixels* com intensidade alta é atribuída a classe objeto. Com isso, é capturada a onda presente na interface água-óleo. A onda capturada referente à Fig. 38 pode ser vista na Fig.39, juntamente com os picos e vales obtidos.

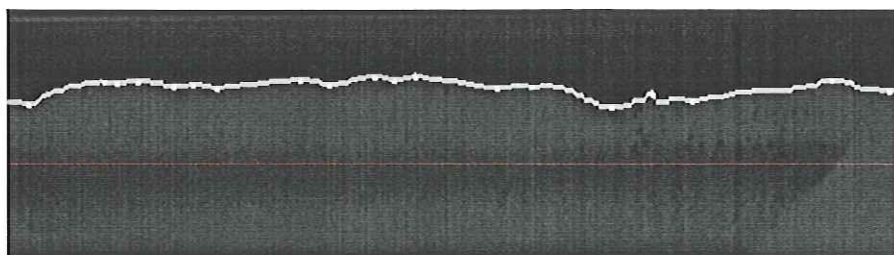


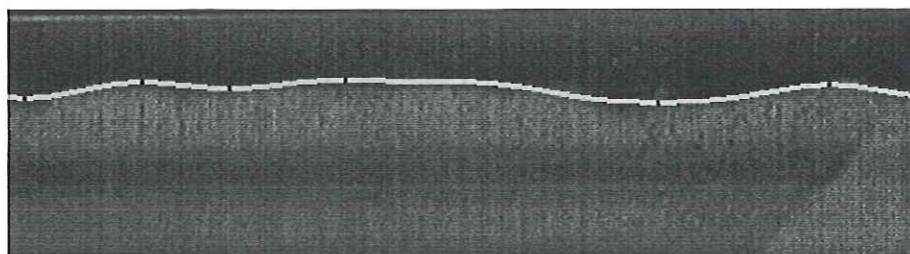
Figura 39 onda obtida (azul) sobreposta à imagem original.

Para a identificação dos picos e vales da onda foi utilizado o critério da primeira e da segunda derivada. Assim, foi calculada a derivada espacial de cada ponto da onda através de uma discretização descentrada de primeira ordem, localizando os pontos onde há uma variação no sinal dessa derivada, o que corresponde a um extremo local. Da mesma

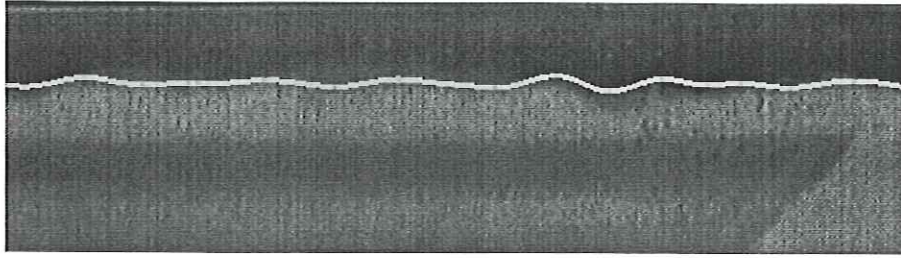


maneira, calculando-se a segunda derivada para os pontos de extremos locais é possível saber se esse ponto corresponde a um pico ou um vale. Após a localização dos picos e vales da onda, é feita uma filtragem baseada nos comprimentos de onda, visando eliminar ruídos no processamento da imagem que interferem na determinação do comprimento de onda.

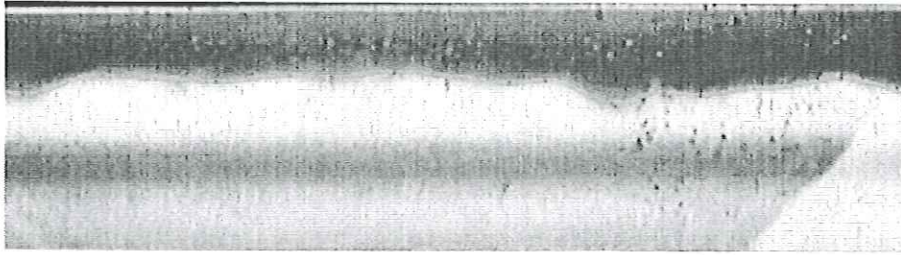
Verificou-se que na imagem existiam três tipos de ondas superpostas com comprimentos de ondas longos, intermediários e curtos. Devido ao tamanho da janela de visualização não há como medir as ondas longas. Com o intuito de separar as ondas intermediárias das curtas foi realizada uma análise no domínio da frequência através da transformada de Fourier. Utilizando o algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT) obtém-se o espectro de frequência da onda. Com isso é possível estabelecer dois valores de corte, um para as frequências baixas (ondas intermediárias) e outro para frequências médias (ondas curtas). As frequências altas correspondem a ruído e são eliminadas. A partir dos valores de corte, é possível separar o espectro em frequência em duas faixas, como anteriormente descrito, e considerando-se apenas essa faixa, fazer a transformada inversa, obtendo assim a onda apenas com a faixa de comprimentos de onda desejados. Um exemplo do resultado obtido pode ser visto nas Fig.40, 41 e 42. A Fig.40 mostra as ondas intermediárias, a Fig.41 mostra as ondas curtas e a Fig.42 mostra a soma das duas ondas, ambas obtidas para a onda mostrada na Fig.38.



**Figura 40 Onda intermediária**



**Figura 41 Onda curta**



**Figura 42 a soma das duas ondas capturadas sobrepostas à imagem original**

Percebe-se, através de uma análise qualitativa das Fig.40, 41 e 42, que a soma das ondas curtas e ondas intermediárias Fig.39, determinadas através da análise no domínio da frequência, recupera a forma original da onda observada experimentalmente; para maiores detalhes consulte (Amaral, 2006).

Metodologia semelhante foi adotada para a medida automática da amplitude das ondas interfaciais.

## 4 - MODELAGEM MATEMÁTICA

### 4.1. Modelagem da onda interfacial

Apresenta-se o desenvolvimento de uma equação para a descrição da onda interfacial em escoamento estratificado ondulado óleo-água, onde as amplitudes ( $\alpha$ ) e comprimentos de onda ( $\lambda$ ) são funções da geometria da tubulação, propriedades físicas dos fluidos, das velocidades *in-situ* do óleo e da água e do ângulo de inclinação da tubulação. Quando há um aumento considerável das velocidades *in-situ*, em especial da velocidade relativa entre as fases, é normalmente visível o aparecimento de estruturas ondulatórias na interface do escoamento. As observações experimentais sugerem instabilidades invíscidas possivelmente do tipo Kelvin-Helmholtz; entretanto termos viscosos são incluídos para a modelagem da perda de carga. Quando as frações volumétricas do óleo e da água variam localmente e periodicamente, aparecem na interface do fluido estruturas ondulatórias mal definidas. Essas podem apresentar amplitudes que por ventura podem interromper o escoamento de uma das fases no duto. O escoamento está sendo analisado unidimensionalmente, na direção  $x$ , ou seja, num plano cartesiano a variável  $x$  representa os termos que atuam na direção axial; ambos os fluidos são incompressíveis.

Nosso objetivo está focado na construção de uma função, onde dadas a inclinação, as vazões das fases e a fração volumétrica *in situ* teremos como calcular os comprimentos de onda médios da onda interfacial desse escoamento, lembrando que em um escoamento dado temos mais de um tipo de onda interfacial. A Fig. 43 representa os parâmetros geométricos médios e volume de controle adotado:

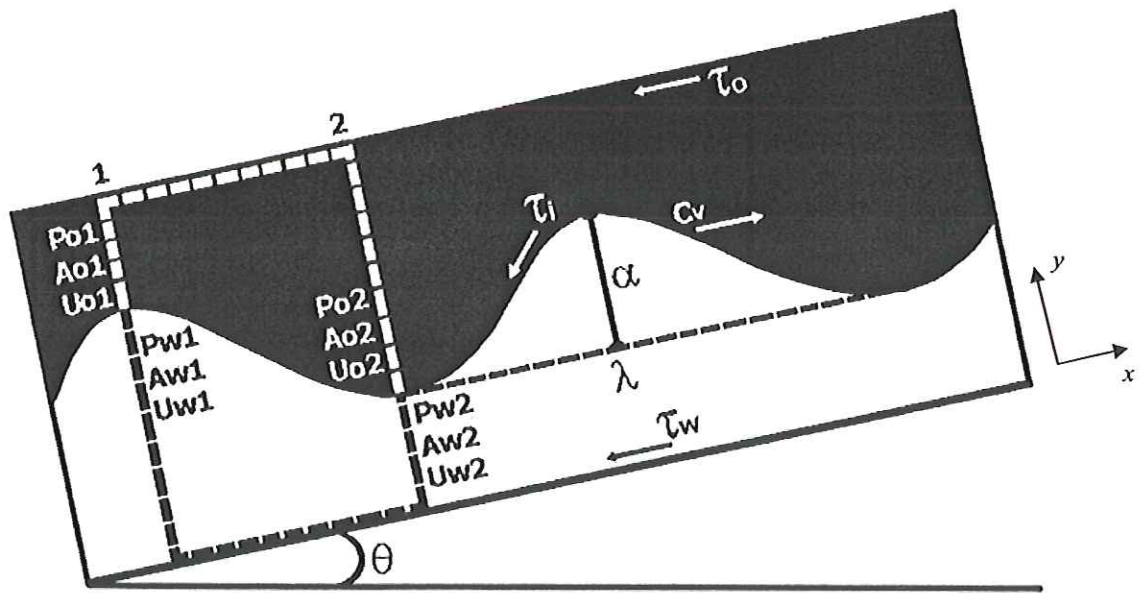


Figura 43 Representação do escoamento levemente inclinado.

Da Equação da Continuidade temos:

$$U_w \cdot A_w = U_{w1} \cdot A_{w1} = U_{w2} \cdot A_{w2} \quad , \quad U_o \cdot A_o = U_{o1} \cdot A_{o1} = U_{o2} \cdot A_{o2} \quad (4.1)$$

$$U_w = U_{w1} \cdot \frac{A_{w1}}{A_w} \quad , \quad U_w = U_{w2} \cdot \frac{A_{w2}}{A_w} \quad (4.2)$$

$$U_o = U_{o1} \cdot \frac{A_{o1}}{A_o} \quad , \quad U_o = U_{o2} \cdot \frac{A_{o2}}{A_o} \quad (4.3)$$

onde:

$$A_{o1} = A_o - A_{onda} \quad , \quad A_{o2} = A_o + A_{onda} \quad (4.4)$$

$$A_{w1} = A_w + A_{onda} \quad , \quad A_{w2} = A_o - A_{onda} \quad (4.5)$$

Os termos das equações acima estão descritos da seguinte forma: Seção transversal da área total (A), seção transversal da área onde do óleo está e acima da interface ondulada ( $A_o$ ), seção transversal da área do óleo acima da interface e acima do pico de onda interfacial ( $A_{o1}$ ). Seção transversal da área do óleo acima da interface e dentro do vale formado pela onda interfacial ( $A_{o2}$ ), seção transversal da área da água abaixo da interface ( $A_w$ ), seção transversal

da área da água abaixo da interface e abaixo do pico de onda interfacial. ( $A_{w1}$ ), seção transversal da área da água abaixo da interface e abaixo do vale formado pela onda interfacial. ( $A_{w2}$ ), seção transversal da área formada pelo pico e vale da onda interfacial ( $A_{onda}$ ). Velocidade *in-situ* da água e formado abaixo do pico da onda ( $U_{w1}$ ), velocidade *in-situ* da água e formado abaixo do vale da onda interfacial ( $U_{w2}$ ), Velocidade *in-situ* do óleo e formado acima do pico formado pela onda ( $U_{o1}$ ), velocidade *in-situ* do óleo e formado acima do vale da onda interfacial ( $U_{o2}$ )

A equação de onda senoidal está escrita em função dos termos como amplitude ( $\alpha$ ) e comprimento de onda interfacial ( $\lambda$ ), as velocidades *in-situ* do óleo ( $U_o$ ) e da água ( $U_w$ ) estarão sendo analisadas sempre na direção axial  $x$ . Os termos ondulatórios são inseridos através da seguinte equação, supondo uma estrutura senoidal por simplicidade:

$$y = \alpha \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (4.6)$$

Aplicamos a equação da energia acima e abaixo da interface óleo-água para a modelagem da diferença de pressão encontrada no óleo e na água; notemos que esta aplicação está sendo realizada entre picos e vales consecutivos, vide Fig. 8, temos, então, para o óleo e para a água, respectivamente:

$$\frac{P_o}{\rho_o} = -\frac{1}{2}(U_o)^2 - yg \cos(\theta) + f(h_o) \quad , \quad \frac{P_w}{\rho_w} = -\frac{1}{2}(U_w)^2 - yg \cos(\theta) + f(h_w) \quad (4.7)$$

Procuramos agora a diferença de pressão que existe entre o pico da onda e o vale, formado pela mesma, na parte onde contém apenas óleo,  $P_{o1}$  é a pressão no pico da onda e  $P_{o2}$  no vale:

$$P_{o1} - P_{o2} = \frac{1}{2} \rho_o \left[ (U_{o2} - C_v)^2 - (U_{o1} - C_v)^2 \right] - 2g \cos(\theta) \alpha \rho_o + f(h_o) \rho_o. \quad (4.8)$$

O mesmo será feito com a parte inferior do duto, onde existe somente água, porém  $P_{w1}$  está abaixo do Pico e  $P_{w2}$  está situado abaixo do vale.

$$P_{w1} - P_{w2} = \frac{1}{2} \rho_w \left[ (U_{w2} - C_v)^2 - (U_{w1} - C_v)^2 \right] - 2g \cos(\theta) \alpha \rho_w + f(h_w) \rho_w. \quad (4.9)$$

Note que para duas fases, os  $f(h_o)$  e  $f(h_w)$  foram mantidos sem variações, pois uma das variáveis que compõem a perda de carga, variação de energia por transferência de calor  $\left( -\frac{\delta q_e}{dm} \right)$ , depende exclusivamente do caminho percorrido pela função. E essa é calculada através de uma integral de linha, diferentemente dos outros termos que são variações que independem do caminho percorrido e podem ser obtidos simplesmente através de uma integral de Riemann. Utilizando a equação de Laplace-Young, para acoplamento das equações das fases, dada a condição de salto, temos no pico da onda:

$$P_{o1} - P_{w1} = -\sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.10)$$

E no vale é descrita dessa forma:

$$P_{o2} - P_{w2} = +\sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (4.11)$$

Onde  $R_1$  e  $R_2$  são os raios de curvatura médios principais; porém supõe-se que  $R_2$  é muito grande e isso faz com que o seu inverso torne-se igual a zero.

$$\frac{1}{R_1} = \frac{\left| \frac{d^2 y}{dx^2} \right|}{\left( 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right)^{3/2}}, \quad \frac{1}{R^2} = 0 \quad (4.12)$$

K é a Curvatura, assim temos:

$$K = \frac{\left| -\frac{4\pi^2 \alpha}{\lambda^2} \cdot \text{sen} \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right|}{\left( 1 + \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \cos \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right)^2 \right)^{3/2}}, \quad (4.13)$$

Fazendo  $x = \frac{\lambda}{4}$ , obtemos  $K_{\max}$ :

$$K_{\max} = \frac{4\pi^2 \alpha}{\lambda^2} \quad (4.14)$$

Subtraindo a equação (11) na equação (10), obtemos:

$$(P_{o1} - P_{o2}) - (P_{w1} - P_{w2}) = -\frac{2\sigma}{R_1}, \quad (4.15)$$

Agora se substituirmos as equações (8) e (9) na equação (15), obtemos:

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{1}{2} \rho_o [(U_{o2} - C_v)^2 - (U_{o1} - C_v)^2] - 2g \cos \theta \alpha \rho_o \right] - \left[ \frac{1}{2} \rho_w [(U_{w2} - C_v)^2 - (U_{w1} - C_v)^2] - 2g \cos \theta \alpha \rho_w \right] = \\ & = [F(h)](\rho_o - \rho_w) - 2 \frac{\sigma}{R} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Onde  $F(h) = [f(h_w) + f(h_o)]$  corresponde à dissipação viscosa total, i.e., parietal e interfacial, incluindo ambas as fases, onde  $(\phi)$  corresponde ao fator de ajuste empírico.

Propomos sua modelagem da seguinte forma:

$$F(h) = \frac{\phi\lambda}{4} \left[ \frac{f_w U_w |U_w|}{D_{hw}} + \frac{f_o U_o |U_o|}{D_{ho}} + \frac{f_i (U_w - U_o)^2}{D_{hi}} \right] \quad (4.17)$$

Rearranjando a Eq. (4.16), temos:

$$F(h) = \frac{\left\{ \frac{1}{2} \rho_w [(U_{w2} - C_v)^2 - (U_{w1} - C_v)^2] + \frac{1}{2} \rho_o [(U_{o1} - C_v)^2 - (U_{o2} - C_v)^2] + 2g \cos \theta \alpha (\rho_w - \rho_o) - 2 \frac{c}{l} \right\}}{(\rho_o - \rho_w)} \quad (4.18)$$

Substituindo as Eqs. (4.2) e (4.3) na Eq. (4.18) obtemos a Eq. (4.19), onde se conhecendo as velocidades *in-situ* (ou vazões e fração volumétrica *in situ*), a inclinação, e a perda de carga obtemos uma relação entre comprimento de onda e amplitude.

$$\frac{\left\{ \frac{1}{2} \rho_w [(U_{w2} - C_v)^2 - (U_{w1} - C_v)^2] + \frac{1}{2} \rho_o [(U_{o1} - C_v)^2 - (U_{o2} - C_v)^2] \right\}}{(\rho_o - \rho_w)} + \frac{2g \cos(\theta) \alpha (\rho_w - \rho_o) - \frac{8\pi^2}{\lambda^2} \sigma}{(\rho_o - \rho_w)} = F(h) \quad (4.19)$$

Para a modelagem da dissipação viscosa de energia, temos na Eq. (4.17) os fatores de atrito ( $f$ ). Aplicamos a correlação de Churchill (Lopes Roma, 2003), válida para toda gama de números de Reynolds ( $Re y_D$ ), inclusive a região de transição, onde:

$$f_k = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re_x} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (4.20)$$

e:



$$A = \left\{ 2,457 \ln \left[ \frac{1}{\left( \frac{7}{\text{Re}_k} \right)^{0,9} + 0,27 \left( \frac{\varepsilon}{D_{hk}} \right)} \right] \right\}^{16} \quad (4.21)$$

$$B = \left[ \frac{37530}{\text{Re}_k} \right]^{16} \quad (4.22)$$

e o número de Reynolds da fase é dado por:

$$\text{Re}_k = \rho_k D_{hk} U_k / \mu_k$$

sendo que o subscrito  $k$  denota a fase, água (w) ou óleo (o).

Para  $U_w > U_o$ , temos que  $f_i = \chi f_w$  e:

$$D_{hi} = D_{hw} = \frac{4A_w}{(S_w + S_i)} \quad \text{e} \quad D_{ho} = \frac{4A_o}{S_o}; \quad (4.23)$$

Para  $U_w < U_o$  temos que  $f_i = \chi f_o$  e:

$$D_{hw} = \frac{4A_w}{S_w} \quad \text{e} \quad D_{hi} = D_{ho} = \frac{4A_o}{(S_w + S_i)}; \quad (4.24)$$

As Eqs. (4.23) e (4.24) implicam que a tensão de cisalhamento interfacial é avaliada de forma semelhante ao que é feito para a fase que escoar mais rápido, incrementada por um fator  $\chi$  relativo à estrutura ondulatória. A Eq. 4.20 (correlação de Churchill) não tem restrições, funcionando bem para escoamentos laminares, turbulentos, inclusive na região de transição, e diferentes rugosidades. Finalmente, o termo  $C_v$  é a velocidade da onda cinemática, podendo

ser estimada através da teoria da onda cinemática (Wallis, 1969), como será discutido na próxima seção.

#### 4.2. Modelagem para o cálculo da fração volumétrica *in situ* e velocidade da onda cinemática

Através do modelo de dois fluidos unidimensional em regime permanente para escoamento estratificado, temos a equação bifásica da conservação da quantidade de movimento:

$$F = -\frac{\tau_w S_w}{A_w} + \frac{\tau_o S_o}{A_o} \pm \tau_i S_i \left( \frac{1}{A_w} + \frac{1}{A_o} \right) - (\rho_w - \rho_o)g \cdot \text{sen} \beta = 0 \quad , \quad (4.25)$$

onde  $F$  representam o somatório das forças gravitacional e viscosas atuando em ambas as fases e interface.  $\tau_w, \tau_o$  e  $\tau_i$  são as tensões cisalhantes parietais da água e do óleo e interfacial, atuando nos perímetros representados por  $S_w, S_o$  e  $S_i$ , respectivamente. Equações de fechamento são necessárias para as tensões cisalhantes e perímetros e essas podem ser vistas em Rodriguez e Oliemans (2006). As áreas  $A_w$  e  $A_o$  representam, respectivamente, a seção transversal *in situ* ocupada pela água e pelo óleo,  $\rho_w$  e  $\rho_o$  são as densidades da água e do óleo,  $g$  representa o termo de aceleração gravitacional e  $\beta$  a inclinação da tubulação. A equação (4.25) pode ser resolvida numericamente e a solução oferece a perda de pressão bifásica e a fração volumétrica *in situ* das fases. Maiores detalhes podem ser encontrados em Rodriguez e Oliemans (2006).

Neste trabalho, supomos que a estrutura interfacial ondulatória observada experimentalmente possui uma natureza cinemática, analogamente ao escoamento anular de óleo ultra-viscoso e água (padrão de escoamento core-annular flow, Rodriguez e Bannwart, 2006a and 2006b). Segundo a teoria da onda cinemática de Wallis (1969), temos que a velocidade da onda cinemática pode ser calculada através da seguinte equação:

$$C_v = \frac{\frac{A}{A_w'} \frac{\partial F}{\partial \bar{h}_w} \Big|_{\bar{U}_w, \bar{U}_o} - \frac{\bar{U}_w}{\varepsilon_w} \frac{\partial F}{\partial \bar{U}_w} \Big|_{\bar{U}_o, \bar{h}_w} + \frac{\bar{U}_o}{\varepsilon_o} \frac{\partial F}{\partial \bar{U}_o} \Big|_{\bar{U}_w, \bar{h}_w}}{\frac{1}{\varepsilon_o} \frac{\partial F}{\partial \bar{U}_o} \Big|_{\bar{U}_w, \bar{h}_w} + \frac{1}{\varepsilon_w} \frac{\partial F}{\partial \bar{U}_w} \Big|_{\bar{U}_o, \bar{h}_w}}, \quad (4.26)$$

onde  $A$  é a área da seção transversal do tubo,  $h_w$  representa a altura na qual a água se encontra na tubulação,  $A_w' = \frac{\partial A_w}{\partial h_w}$  e  $A_w$  é a área da seção transversal do tubo ocupada pela água.  $U_w$  e  $U_o$  representam as velocidade *in-situ*,  $\varepsilon_w$  e  $\varepsilon_o$  representam as frações volumétricas *in situ* da água e do óleo, respectivamente, calculadas através da solução numérica da Eq. (4.25). O sobrescrito “-” representa condição de equilíbrio dinâmico.



## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Resultados Experimentais

Uma das características relevantes observada nos experimentos é a de que não existe somente um tipo de onda em um único escoamento. O mesmo pode possuir ondas curtas, intermediárias e longas. As ondas curtas possuem comprimentos menores que  $D/2$ , as intermediárias de  $D/2$  a  $10D$  e as longas maiores que  $10D$ , onde  $D$  é o diâmetro interno da tubulação.

A influência do deslizamento no comprimento de onda pode ser verificada na Tabela 2. Segundo a teoria invíscida de Kelvin-Helmholtz (Drazin e Reid, 1981), instabilidades ocorrem quando há uma velocidade relativa alta entre as fases, i.e., uma razão de deslizamento alta. Essas instabilidades podem ser detectadas pelo surgimento de ondas interfaciais de alta amplitude e curto comprimento de onda.

Tabela 2. Resultados obtidos das diferentes técnicas de obtenção de comprimentos de onda

$\theta$ (graus)	Teste	$U_{os}$ (m/s)	$U_{ws}$ (m/s)	$U_o$ (m/s)	$U_w$ (m/s)	$S=U_o/U_w$ (experimental)	$\alpha$ (cm)	$\lambda_m$ (cm)	$\lambda_a$ (cm)	Erro= $\frac{ \lambda_a - \lambda_m }{\lambda_m} 100$ (%)
+5	1	0,072	0,021	0,25	0,03	8,33	0,12	5,4	5,1	5,6
	2	0,072	0,098	0,27	0,13	2,07	0,15	4,9	4,5	8,1
	3	0,072	0,296	0,33	0,38	0,86	0,17	4,7	4,5	4,3
-5	4	0,021	0,041	0,02	0,46	0,043	0,12	4,0	4,2	5,0
	5	0,022	0,062	0,03	0,52	0,057	0,14	5,0	4,5	10,0
	6	0,072	0,099	0,08	0,66	0,12	0,15	6,6	5,3	19,7
+2	7	0,078	0,022	0,22	0,03	7,3	0,16	4,8	4,7	2,0
	8	0,074	0,098	0,26	0,14	1,8	0,18	6,7	5,7	14,9
-2	9	0,022	0,202	0,04	0,45	0,08	--	7,9	--	--

A Tabela 2 apresenta os comprimentos de onda médios medidos através da técnica manual ( $\lambda_m$ ) e automática ( $\lambda_a$ ), para nove pares (9) diferentes de vazões e quatro inclinações da horizontal (-5, -2, +2 e +5 graus), onde  $U_{os}$  e  $U_{ws}$  são as velocidades superficiais e  $U_o$  e  $U_w$  são as velocidades *in-situ* ou locais de óleo e água, respectivamente. O deslizamento entre as fases (S) é representada pela razão entre velocidades *in-situ*  $U_o$  e  $U_w$  e um valor igual à unidade indica que não há deslizamento entre as fases, i.e., as fases viajam à mesma velocidade *in situ* conforme definido na Seção 2.1. (no teste 9 da Tab.1 não foi fornecido valores para o comprimento de onda interfacial( $\lambda_a$ ) e amplitude ( $\alpha$ ) devido a limitações da técnica automática em um regime de dispersão entre as fases.

Para escoamento ascendente (+2 graus) (testes 7 e 8), com o distanciamento da razão de deslizamento (S) da unidade (de 1,8 para 7,3) percebemos uma queda significativa do comprimento de onda médio (de 6,7 cm para 4,8 cm), o que denota um aumento da instabilidade com o aumento do deslizamento interfacial, como esperado. Para escoamento descendente (-5 graus) (testes 4, 5 e 6), notamos novamente uma diminuição significativa do comprimento de onda (de 6,6 cm para 4 cm) com o distanciamento da razão de deslizamento da unidade (de 0,12 para 0,043). Para o escoamento ascendente (+5 graus) não percebemos variação significativa no comprimento de onda entre os testes 2 e 3. Tal resultado não é surpreendente, pois ambos os casos possuem razão de deslizamento próxima da unidade. Entretanto, os testes 1 e 2 apresentam um resultado aparentemente contraditório: com o distanciamento da razão de deslizamento da unidade (de 2,07 para 8,33) percebemos um aumento do comprimento de onda (de 4,9 para 5,4). Entretanto, no caso específico do teste 1, o escoamento bifásico se encontrava numa situação hidrodinâmica particular. Havia uma recirculação intensa de água próxima à interface, onde foram detectados vórtices de grande

intensidade. Suspeitamos que efeitos viscosos foram significativos nessa região e assim sendo a análise do problema invíscido seria incompleta nesse caso.

Quanto à influência do ângulo de inclinação, de forma global percebemos da análise da Tab.2 que há uma diminuição do comprimento de onda com o aumento do ângulo de inclinação, tanto para escoamento descendente, quanto ascendente. Essa tendência fica clara quando comparamos, por exemplo, os testes 8 e 2 (de 6,7 cm para 4,9 cm). Esse resultado está de acordo com o esperado. Tenhamos em mente que a diferença de densidades das fases é significativa, portanto com o aumento da inclinação esperamos, obviamente, um aumento do deslizamento. E ainda na Tab.1 notamos que o erro global entre a técnica manual e a automática é da ordem de 10 %. Porém, notamos que existem dois valores bem acima da média (testes 6 e 8). Nesses testes a interface possuía uma dispersão significativa de água em óleo e/ou óleo em água. Nesses casos a técnica automática apresentou limitações, pois o software não conseguia definir corretamente onde estava situada a interface, ou seja, a identificação da estrutura ondulatória ficou comprometida. Notem que para a inclinação (-2) apresentamos somente comprimento de onda ( $\lambda_m$ ), pois a interface possuía muita dispersão.

Por outro lado, excluindo os testes 6 e 8, o erro global é da ordem de 5%, o que consideramos suficiente para a validação da técnica automática proposta para a análise de estruturas ondulatórias em escoamento estratificado ondulado óleo-água.

A partir de agora, as propriedades geométricas adotadas para as análises subsequentes serão aquelas coletadas via técnica automática. Através da técnica automática, temos como separar as ondas curtas das ondas intermediárias (seção 3.3.3). Vemos novamente na Tab. 2 o comprimento de onda coletado via técnica automática ( $\lambda_a$ ) para todos os pares de vazão e inclinações testados. Além disso, temos também os comprimentos das ondas curtas ( $\lambda_{curto}$ ) e intermediária ( $\lambda_{int}$ ) correspondentes e que compõe o comprimento de onda coletado.

A Tabela 2 também apresenta dados de amplitude de onda obtidos via técnica automática para as ondas intermediárias.

Tabela 2 Comprimentos de onda interfacial via técnica automática

$\theta$ (graus)	testes	$U_{os}$ (m/s)	$U_{ws}$ (m/s)	$S=U_o/U_w$ (experimental)	$\lambda_{curto}$ (cm)	$\lambda_a$ (cm)	$\lambda_{int}$ (cm)	$\alpha_{exp}$ (cm)
+5	1	0,072	0,021	8,33	3,8	5,1	7,6	0,0012
	2	0,072	0,098	2,07	3,6	4,5	7,6	0,0015
	3	0,072	0,296	0,86	3,7	4,5	7,2	0,0017
-5	4	0,021	0,041	0,043	3,8	4,2	6,8	0,0012
	5	0,022	0,062	0,057	3,7	4,5	8,5	0,0014
	6	0,072	0,099	0,12	3,8	5,3	7,7	0,0015
2	7	0,078	0,022	7,3	3,9	4,7	7,5	0,0016
	8	0,074	0,098	1,8	4,0	5,7	7,4	0,0018
-2	9	0,022	0,202	0,08	--	--	--	--

Para nossas próximas avaliações serão utilizadas as propriedades geométricas das ondas intermediárias, pois essas, em tese, apresentam um comportamento linear. Além disso, supomos que a velocidade de propagação das ondas intermediárias possa ser estimada pela teoria da onda cinemática (seção 4.2).

## 5.2. Resultados da Modelagem.

Nesta etapa, nosso foco ficou voltado a dois tipos de análises.

- Na primeira, temos a inserção de dados experimentais obtidos nas instalações experimentais multifásicas da Shell Exploration and Production B.V., Rijswijk, Holanda, diretamente na Eq. (4.19), que possui entrada para as seguintes variáveis:  $\varepsilon$ ,  $\theta$ ,  $\alpha_{exp}$ ,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ ,  $U_{os}$ ,  $U_{ws}$ ,  $A_{w1}$ ,  $A_{w2}$ ,  $A_{o1}$ ,  $A_{o2}$  (vide Fig. 42). Todas as variáveis aqui descritas estão devidamente nomeadas na lista de símbolos.



- Na segunda análise, reduzimos as variáveis de nossa equação (Eq.4.19) inserindo apenas  $\theta$ ,  $U_{os}$ ,  $U_{ws}$ . Para essa análise, foram utilizados valores médios das variáveis  $\alpha_{exp.}$ ,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ ,  $\mu_o$ ,  $\mu_w$ . Já as variáveis geométricas  $\varepsilon_x$ ,  $A_{w1}$ ,  $A_{w2}$ ,  $A_{o1}$ ,  $A_{o2}$  foram obtidas via modelagem. Todas as variáveis geométricas estão em função das constantes  $U_{os}$ ,  $U_{ws}$  e a fração volumétrica in situ  $\varepsilon_x$  é obtida pela solução numérica da Eq. (4.26).

Para a solução da Eq. (4.19) foi utilizado o programa Mathematica®, onde foram implementadas as equações apresentadas no Capítulo 4.

### 5.2.1. Resultados da Modelagem com inserção de dados experimentais.

Inserimos na Eq. (4.19), para cada par de vazões e inclinações analisadas (Tab. 2), os valores de  $\varepsilon$ ,  $\theta$ ,  $\alpha_{exp.}$ ,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ ,  $U_{os}$ ,  $U_{ws}$ ,  $A_{w1}$ ,  $A_{w2}$ ,  $A_{o1}$ ,  $A_{o2}$ , para o cálculo do comprimento de onda interfacial ( $\lambda_{teorico1}$ ). Na Tab.3 vemos o comprimento de onda obtido da solução da Eq. (4.19). A Tab.3 também apresenta o deslizamento,  $S$ , conforme definido na seção 2.1 (Eq. 2.8) e a velocidade de propagação da onda interfacial conforme previsto pela Eq.( 4.27).

Tabela 3 Comprimentos de onda interfacial calculado pela Eq (19), inseridos dados experimentais.

$\theta$ (graus)	Teste	$U_{os}$ (m/s)	$U_{ws}$ (m/s)	$U_o$ (m/s)	$U_w$ (m/s)	$S=U_o/U_w$ (experimental)	$Cv$ Experimental (m/s)	$\lambda_{teorico1}$ (Eq. 4.19) (cm)
+5	1	0,072	0,021	0,25	0,03	8,33	0,21	10,7
	2	0,072	0,098	0,27	0,13	2,07	0,31	5,1
	3	0,072	0,296	0,33	0,38	0,86	0,49	3,3
-5	4	0,021	0,041	0,02	0,46	0,043	0,29	7,4
	5	0,022	0,062	0,03	0,52	0,057	0,29	7,4
	6	0,072	0,099	0,08	0,66	0,12	0,39	4,2
+2	7	0,078	0,022	0,22	0,03	7,3	0,16	7,0
	8	0,074	0,098	0,26	0,14	1,8	0,24	5,9
-2	9	0,022	0,202	0,04	0,45	0,08	0,27	--

Da análise da Tab. 3, percebemos que na inclinação de 5 graus positivos possuímos apenas uma (1) velocidade superficial para o óleo ( $U_{os}$ ) e três (3) velocidades superficiais diferentes para a água ( $U_{ws}$ ). Primeiramente, vamos analisar como ambos os fluidos se comportam para tais velocidades e dada inclinação. Quando as tubulações estão com uma inclinação positiva os dois fluidos que possuem densidades diferentes têm comportamentos distintos. O óleo que tem a menor densidade tende a acelerar em relação à água, que possui uma densidade maior; essa tende a sofrer uma retenção bem maior que o óleo, que é menos denso. Note, nos testes 1, 2 e 3, que conforme aumentamos as velocidades superficiais da água o comprimento de onda diminui bruscamente. Porém, o deslizamento entre as fases, que dependem exclusivamente das velocidades *in situ*,  $U_o$  e  $U_w$ , está se aproximando da unidade (1), o que significa que há uma diminuição significativa no deslizamento entre as fases. Isso deveria fazer com que o comprimento de onda interfacial crescesse ao invés de diminuir. Uma explicação para esse resultado aparentemente contraditório pode estar na natureza da perturbação hidrodinâmica atuante na interface do escoamento estratificado. Instabilidades de natureza viscosa podem ser preponderantes em comparação às invíscidas de Kelvin-Helmholtz. Do teste 1 ao teste 3, o número de Reynolds da fase aquosa aumentou de 2500

para 35000, o que indica uma intensidade turbulenta significativamente maior no escoamento com deslizamento menor. A inserção dos dados experimentais na Eq. (4.19) e o termo de dissipação de energia (Eq. 4.20) podem estar implicitamente introduzindo os efeitos da intensidade da turbulência sobre as propriedades geométricas da interface.

Na inclinação de 5 graus negativos, possuímos três (3) velocidades superficiais para o óleo ( $U_{os}$ ), onde 0,021 e 0,022 m/s podem facilmente representar apenas uma vazão, e três (3) velocidades superficiais diferentes para a água ( $U_{ws}$ ). Com uma inclinação negativa possuímos a força gravitacional a favor dos dois fluidos, porem agora o líquido que possui maior densidade tende a acelerar mais que o outro, fazendo com que sua velocidade *in situ* seja bem mais alta que a da outra fase. Nos testes 4 e 5 possuímos velocidades superficiais do óleo ( $U_{os}$ ) quase que idênticas e um aumento bem pequeno da velocidade superficial da água ( $U_{ws}$ ). Dessa forma, era esperado que o comprimento de onda interfacial não se alterasse muito. O resultado foi bem coerente com o que havia sido previsto. No teste 6, onde a velocidade superficial do óleo ( $U_{os}$ ) é de 0,072 e a velocidade superficial da água ( $U_{ws}$ ) é aproximadamente 0,1, encontramos um comprimento menor que nos testes 4 e 5, o que está em desacordo com o esperado pela teoria invíscida, já que o deslizamento diminuiu. Entretanto, comparando os testes 4 e 5 com o teste 6, temos que o número de Reynolds da água aumentou, aproximadamente, de 30000 para 40000. Novamente, informações referentes a instabilidades viscosas podem ter sido implicitamente embutidas na Eq. (19).

Na inclinação de 2 graus positivos, possuímos duas (2) velocidades superficiais para o óleo ( $U_{os}$ ), onde 0,078 e 0,074 m/s podem facilmente representar apenas uma vazão, e duas (2) velocidades superficiais diferentes para a água ( $U_{ws}$ ), essas com uma boa diferença. Os efeitos da gravidade são análogos aos dos testes 1,2 e 3, porem com menos intensidade devido a inclinação ser bem menor. Podemos observar que os comprimentos de onda interfacial se

diferenciam bastante nos testes 7 e 8. A Eq. (4.19) continua apresentando resultados contraditórios se analisada sob a óptica da teoria invíscida. Contudo, mais uma vez, instabilidades de natureza viscosa podem explicar a previsão de uma onda interfacial mais instável para um deslizamento menor.

De modo geral, a Eq. (4.19) prevê razoavelmente bem os comprimentos das ondas interfaciais intermediárias coletados via técnica automática. Vale ressaltar que, apesar da simplicidade do equacionamento unidimensional, a Eq. (4.19) nos fornece um comprimento de onda da mesma ordem de grandeza em comparação com os experimentos (Tab. 3). Entretanto, ao compararmos em detalhes os resultados experimentais (Tab. 2,  $\lambda_{int}$ ) com as previsões da Eq. (4.19) (Tab. 3,  $\lambda_{teórico1}$ ), percebemos uma concordância apenas razoável. Apontamos como fatores de incerteza o número relativamente grande de variáveis envolvido na solução da Eq. (4.19). É provável que uma propagação de erro significativa tenha ocorrido, visto que trabalhamos tanto com dados experimentais como com dados provenientes de modelagem. Sugerimos que um estudo voltado à identificação e manipulação do erro possa reforçar e fornecer uma maior confiabilidade ao modelo proposto. Nesta pesquisa, não foi realizado um estudo de sensibilidade ou mesmo uma avaliação mais profunda do efeito da turbulência na estrutura ondulatória interfacial.

### **5.2.2. Resultados da Modelagem com redução de variáveis.**

Depois de reduzir o número de variáveis da modelagem, inserimos apenas  $U_{0s}$ ,  $U_{ws}$  e inclinação em graus, representada por  $(\theta)$ , para obter o comprimento da onda interfacial ( $\lambda_{teórico2}$ ), apresentados a seguir na Tab.4.

Tabela 4 Comprimentos de onda interfacial calculado pela Eq (19), com redução de variáveis.

$\theta$ (graus)	Teste	$U_{os}$ (m/s)	$U_{ws}$ (m/s)	$U_o$ (m/s)	$U_w$ (m/s)	$S_m=U_o/U_w$ (modelagem)	$Cv$ Eq. (4.27) (m/s)	$\lambda_{teorico2}$ (Eq. 4.19) (cm)
+5	1	0,072	0,021	0,25	0,03	15,87	0,46	14,8
	2	0,072	0,098	0,27	0,13	3,91	0,50	13,1
	3	0,072	0,296	0,33	0,38	1,47	0,58	3,1
-5	4	0,021	0,041	0,02	0,46	0,045	0,24	8,4
	5	0,022	0,062	0,03	0,52	0,04	0,26	8,0
	6	0,072	0,099	0,08	0,66	0,12	0,50	6,8
+2	7	0,078	0,022	0,22	0,03	9,74	0,48	26,7
	8	0,074	0,098	0,26	0,14	2,38	0,51	20,3
-2	9	0,022	0,202	0,04	0,45	0,13	0,30	20,2

Para a inclinação de 5 graus positivos e atendo-nos aos comprimentos de onda interfacial previstos ( $\lambda_{teorico2}$ ) e respectivos deslizamentos (S), notamos que novamente os resultados são incoerentes segundo a teoria invíscida de Kelvin-Helmholtz. Contudo, instabilidades viscosas podem explicar os resultados. A modelagem fornece um comprimento de onda interfacial satisfatório do ponto de vista quantitativo. Para a inclinação de 5 graus obtivemos resultados análogos. Entretanto, na inclinação de 2 graus positivos o comprimento de onda interfacial previsto apresenta discrepâncias significativas do ponto de vista quantitativo, sendo aproximadamente duas (2) vezes maior do que o observado experimentalmente. Na inclinação de 2 graus negativos a modelagem também forneceu um comprimento de onda interfacial pouco satisfatório. Novamente, acreditamos que o número excessivo de graus de liberdade e, em decorrência, a propagação de incertezas possa ter levado ao erro observado.

### 5.3. Comparações entre resultados do modelo e dados experimentais.

A Tab. 5 abaixo apresenta comparação entre comprimento de onda interfacial experimental ( $\lambda_{int}$ ), comprimento de onda com entrada para todas as variáveis ( $\lambda_{teorico1}$ ) e

comprimento de onda com redução de dados de entrada ( $\lambda_{teorico2}$ ).

Tabela 5 Todos os comprimentos de onda interfacial.

$\theta$ (graus)	Teste	$U_{os}$ (m/s)	$U_{ws}$ (m/s)	$U_o$ (m/s)	$U_w$ (m/s)	$Cv$ Eq. (4.27) (m/s)	$Cv$ Experimental (m/s)	$\lambda_{int}$ (cm)	$\lambda_{teorico1}$ (Eq. 4.19) (cm)	$\lambda_{teorico2}$ (Eq. 4.19) (cm)
+5	1	0,072	0,021	0,25	0,03	0,46	0,21	7,62	10,7	14,8
	2	0,072	0,098	0,27	0,13	0,50	0,31	7,18	5,1	13,1
	3	0,072	0,296	0,33	0,38	0,58	0,49	7,59	3,3	3,1
-5	4	0,021	0,041	0,02	0,46	0,24	0,29	6,8	7,4	8,4
	5	0,022	0,062	0,03	0,52	0,26	0,29	8,5	7,4	8,0
	6	0,072	0,099	0,08	0,66	0,50	0,39	7,76	4,2	6,8
+2	7	0,078	0,022	0,22	0,03	0,48	0,16	7,49	7,0	26,7
	8	0,074	0,098	0,26	0,14	0,51	0,24	7,41	5,9	20,3
-2	9	0,022	0,202	0,04	0,45	0,30	0,27	--	--	20,2

Primeiramente vamos observar ( $\lambda_{int}$ ) versus ( $\lambda_{teorico1}$ ). O primeiro aspecto a ser observado é que, em geral, há uma concordância satisfatória entre o comprimento de onda previsto e medido. A variação do ( $\lambda_{teorico1}$ ), nos testes 1, 2 e 3, com a velocidade superficial da água ( $U_{ws}$ ) não foi observada experimentalmente ( $\lambda_{int}$ ). O mesmo pode ser dito comparando ( $\lambda_{int}$ ) versus ( $\lambda_{teorico2}$ ). Nos testes 1 e 2, ( $\lambda_{int}$ ) é aproximadamente duas (2) vezes menor que ( $\lambda_{teorico2}$ ). Quando a comparação é feita entre ( $\lambda_{teorico1}$ ) e ( $\lambda_{teorico2}$ ), ainda nos testes 1,2 e 3, notamos que para ambos há um decréscimo do comprimentos de onda com o aumento da velocidade superficial da água e que os valores são muito próximos no teste 3.

Comparado ( $\lambda_{int}$ ) versus ( $\lambda_{teorico1}$ ) e ( $\lambda_{int}$ ) versus ( $\lambda_{teorico2}$ ) nos testes 4, 5 e 6, nota-se uma melhor concordância. Entre ( $\lambda_{teorico1}$ ) e ( $\lambda_{teorico2}$ ) também observamos uma boa concordância.

Comparado ( $\lambda_{int}$ ) versus ( $\lambda_{teorico1}$ ), nos testes 7 e 8, notamos novamente uma boa concordância. Entretanto, entre ( $\lambda_{int}$ ) e ( $\lambda_{teorico2}$ ) ou ( $\lambda_{teorico1}$ ) e ( $\lambda_{teorico2}$ ) notamos uma forte divergência. Suspeitamos que ( $\lambda_{teorico2}$ ), nesses testes, tenha sido prejudicado pela propagação de erros na modelagem. O teste 9, em específico, ficou prejudicado devido a falta de dados.

A Tabela 6 apresenta dados referentes ao deslizamento entre as fases (S) representa o deslizamento experimentalmente obtido e (Sm) é o deslizamento concebido via modelagem, onde ( $\varepsilon_w$ ) é a fração volumétrica *in-situ* da água via modelagem:

$$S_m = \frac{\frac{U_{os}}{1 - \varepsilon_w(U_{ws}, U_{os})}}{U_{ws}} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_w(U_{ws}, U_{os})$$

Tabela 6 Relações de deslizamento

Inclinação (graus)	Teste	$U_{os}$ (m/s)	$U_{ws}$ (m/s)	$U_o$ (m/s)	$U_w$ (m/s)	S= $U_o/U_w$ (experimental)	$S_m = U_o/U_w$ (modelagem)
+5	1	0,072	0,021	0,25	0,03	8,33	15,87
	2	0,072	0,098	0,27	0,13	2,07	3,91
	3	0,072	0,296	0,33	0,38	0,86	1,47
-5	4	0,021	0,041	0,02	0,46	0,043	0,045
	5	0,022	0,062	0,03	0,52	0,057	0,04
	6	0,072	0,099	0,08	0,66	0,12	0,12
+2	7	0,078	0,022	0,22	0,03	7,3	9,74
	8	0,074	0,098	0,26	0,14	1,8	2,38
-2	9	0,022	0,202	0,04	0,45	0,08	0,13

Podemos observar que, partindo do teste 1 em direção ao teste 3, tanto (S) quanto (Sm) aproximam-se da unidade (1), caracterizando uma diminuição da velocidade relativa entre as fases. Nos testes 4, 5 e 6, o mesmo foi observado, porem nota-se que a diferença entre (S) e (Sm) é muito pequena.

Partido do teste 7 em direção ao teste 8 observa-se que há uma tendência de aproximação da unidade (1). Lembrando que quando o deslizamento, (S) ou (Sm), é igual a unidade (1) não há deslizamento entre as fases.

No teste 9 se observa uma boa concordância entre (S) e (Sm).

Pelos nove testes e seus respectivos resultados, sejam eles de ordem quantitativa ou referindo-se as tendências observadas, notou-se que o deslizamento via modelagem (Sm) apresentou dados coerentes em comparação com os dados experimentais.

Curvas de deslizamento e comprimento de onda interfacial geradas pela modelagem proposta podem ser vistas nas Figs. 43, 44, 45, 46 e 47 referem-se, respectivamente, aos testes (1, 2), (4 e 5), (6), (7 e 8) e (9).

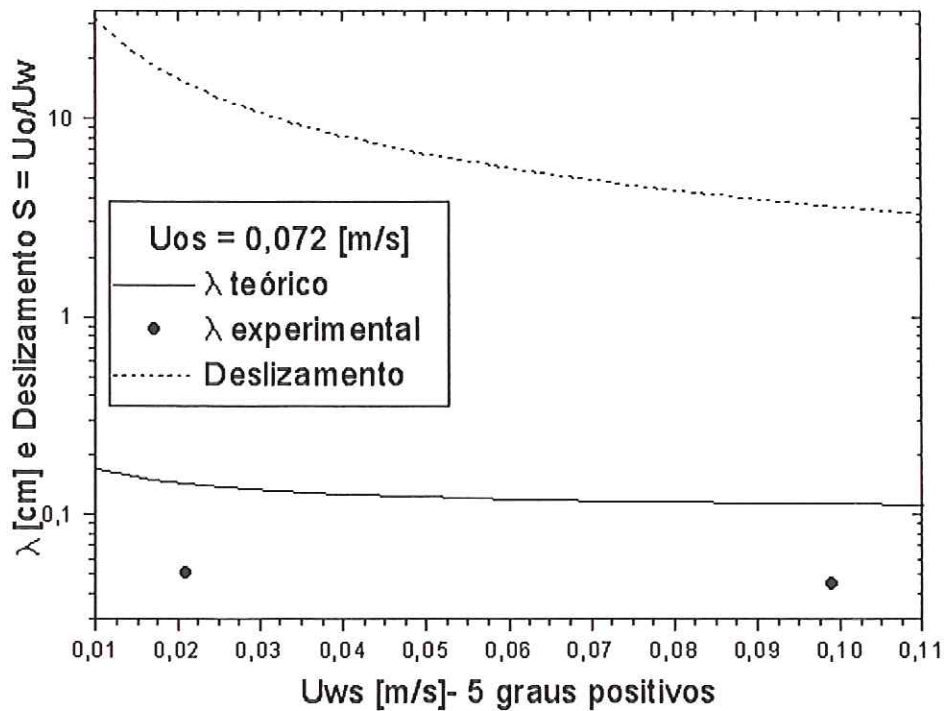


Figura 44 Comprimentos de onda interfacial ( $\lambda_{mod}$ ) para inclinação de 5 graus positivos

A Fig.43, referente aos testes 1 e 2 contidos na Tab.5, apresenta comprimentos de onda interfacial coletados (pontos) e previstos via modelagem ( $\lambda_{teorico2}$ , curva cheia), além do deslizamento previsto ( $S_m$ , curva pontilhada). Notamos que com o aumento da velocidade superficial da água ( $Uws$ ) existe uma tendência de queda do deslizamento ( $S_m$  tende a unidade), do comprimento de onda medido ( $\lambda_{int}$ ) e previsto ( $\lambda_{teorico2}$ ). Apesar de leve, a tendência de queda do comprimento de onda experimental está de acordo com o previsto pelo modelo. A diminuição do deslizamento interfacial deveria promover o aumento do comprimento de onda de acordo com a teoria invíscida. Instabilidades viscosas são,



provavelmente, responsáveis pela diminuição do comprimento de onda com o aumento da velocidade superficial da água, i.e., aumento do número de Reynolds da água.

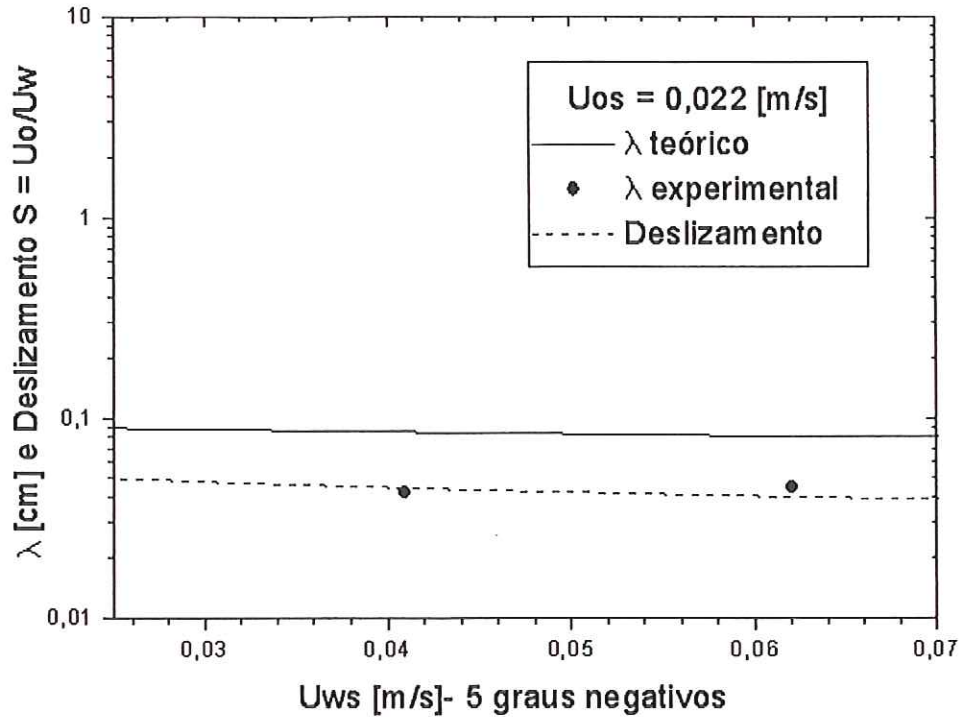


Figura 45 Comprimentos de onda interfacial ( $\lambda$ ) para inclinação de 5 graus negativos

Fig. 44, referente aos testes 4 e 5 contidos na Tab.5, também apresenta o comprimento de onda interfacial previsto ( $\lambda_{teorico2}$ ) e coletado ( $\lambda_{int}$ ), juntamente com previsões para o deslizamento ( $S_m$ ). Quando aumentamos a velocidade superficial da água ( $U_{ws}$ ), o comprimento de onda previsto ( $\lambda_{teorico2}$ ) apresenta uma leve tendência de queda, indo de encontro aos dados ( $\lambda_{int}$ ). Estes, por sua vez, apresentam uma tendência de aumento. O deslizamento ( $S_m$ ) está se distanciando da unidade levemente (1), o que indica um pequeno aumento da velocidade relativa entre as fases. No caso apresentado na Fig. 44, a variação da velocidade superficial da água é relativamente pequena, assim como variações no deslizamento e no comprimento de onda teórico.

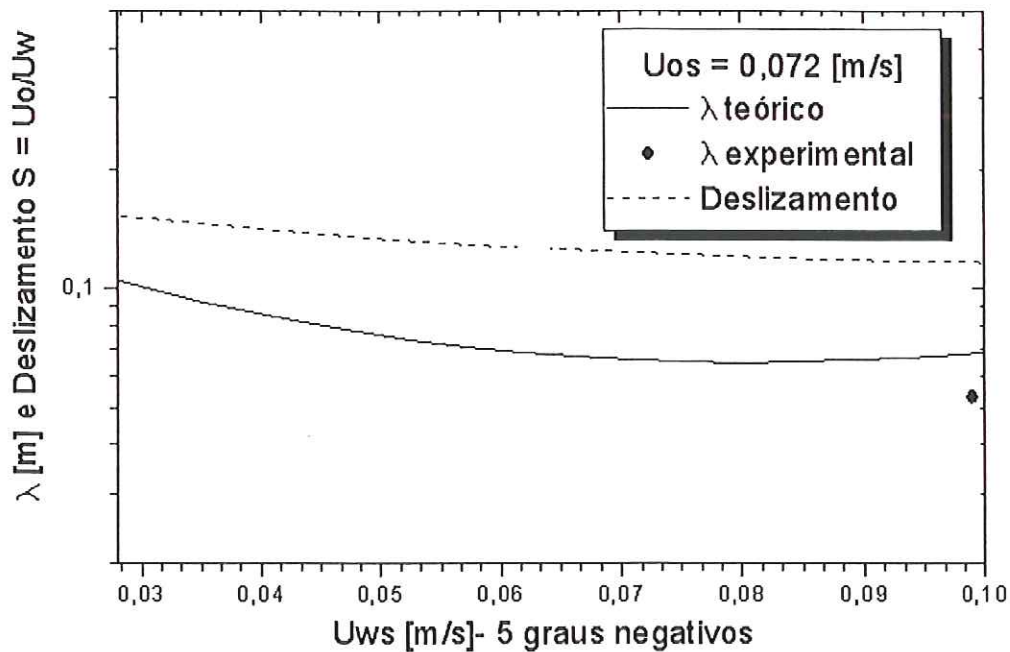


Figura 46 Comprimentos de onda interfacial ( $\lambda$ ) para inclinação de 5 graus negativos

A Fig. 45, referente ao teste 6 contido na Tab.5, contém informação semelhante à apresentada nas Figs. 44 e 43. Note que possuímos apenas um comprimento de onda interfacial experimental ( $\lambda_{int}$ ), pois o par de velocidades superficiais deste teste difere em sua velocidade superficial do óleo ( $U_{os}$ ), impossibilitando uma comparação direta com os outros pontos dessa mesma inclinação ( $\theta$ ). O deslizamento ( $S_m$ ) está se distanciando da unidade, i.e., está aumentando, mas tende a se estabilizar assintoticamente com o aumento de  $U_{ws}$ . O comprimento de onda interfacial previsto ( $\lambda_{teórico2}$ ) apresenta uma tendência diferente em comparação com as Figs. 44 e 43. Com o aumento da velocidade superficial da água ( $U_{ws}$ ), esse apresenta uma tendência de queda, seguida de uma leve tendência de crescimento. Vale lembrar que dois fenômenos são provavelmente responsáveis pela instabilidade hidrodinâmica do padrão estratificado. No início, com o aumento da velocidade superficial da água, i.e., do número de Reynolds da água, instabilidades viscosas relacionadas à intensidade da turbulência podem ser preponderantes. Para velocidades superficiais maiores, a instabilidade

invíscida de Kelvin-Helmholtz pode ser dominante e uma diminuição do deslizamento ocasionaria um aumento do comprimento de onda.

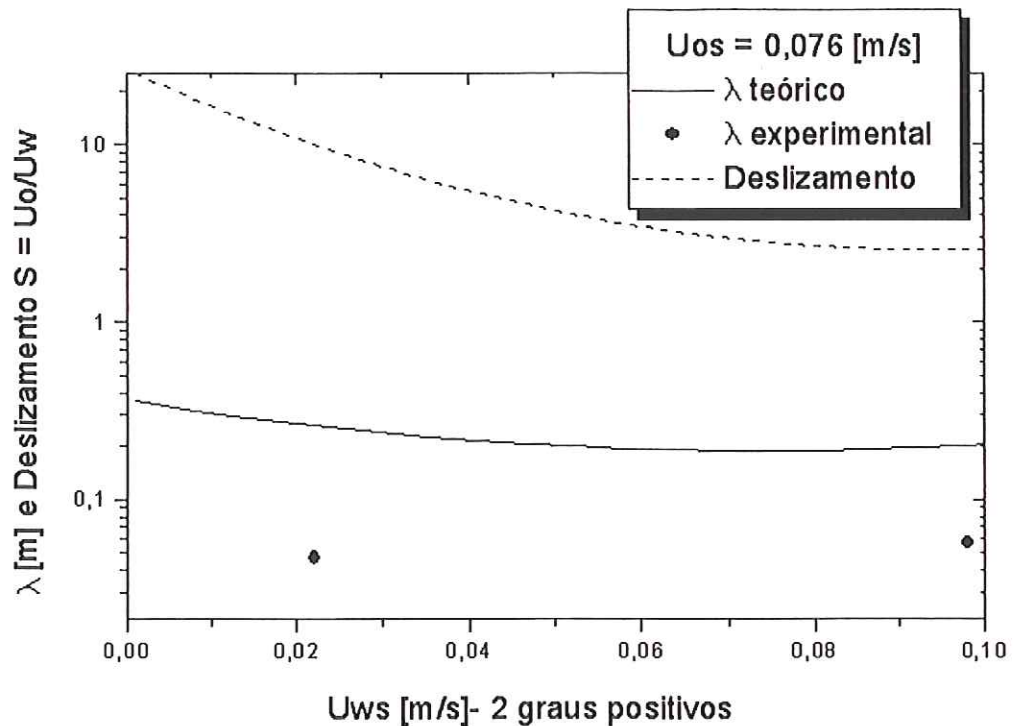


Figura 47 Comprimentos de onda interfacial ( $\lambda$ ) para inclinação de 2 graus positivos

A Fig. 46, referente aos testes 7 e 8 contidos na Tab.5, contém informação semelhante à apresentada nas Figs. 45, 44 e 43. O deslizamento ( $S_m$ ) está se aproximando da unidade, o que denota sua diminuição com o aumento da velocidade superficial da água. O comprimento de onda interfacial previsto ( $\lambda_{teórico2}$ ) possui uma tendência semelhante em comparação com a Fig. 45. Inicialmente, com o aumento da velocidade superficial da água ( $Uws$ ), esse apresenta uma tendência de queda, seguida de uma leve tendência de crescimento. Os dados experimentais corroboram com as previsões, com valores de comprimento de onda mais altos para altas velocidades superficiais da água. Para essa inclinação positiva, é mais evidente a provável disputa entre instabilidade viscosa e invíscida. No início, com o aumento do número de Reynolds da água, instabilidades viscosas relacionadas à intensidade da turbulência podem ser preponderantes e o comprimento de onda tende a diminuir.

Para velocidades superficiais mais altas, instabilidades invíscidas tendem a ser dominantes e uma diminuição do deslizamento interfacial ocasionaria um aumento do comprimento de onda.

A Fig. 47, referente ao teste 9 contido na Tab.5, apresenta informação semelhante à apresentada nas Figs. 46, 45, 44 e 43. O deslizamento ( $S_m$ ) inicialmente aumenta com  $U_{ws}$  e tende a diminuir para maiores velocidades superficiais da água ( $U_{ws}$ ). Com o aumento da velocidade superficial da água ( $U_{ws}$ ), o comprimento de onda interfacial previsto ( $\lambda_{teórico2}$ ) apresenta uma tendência de queda, seguida de uma forte tendência de crescimento. Novamente, observa-se a provável disputa entre fenômenos de instabilidade invíscido e viscoso.

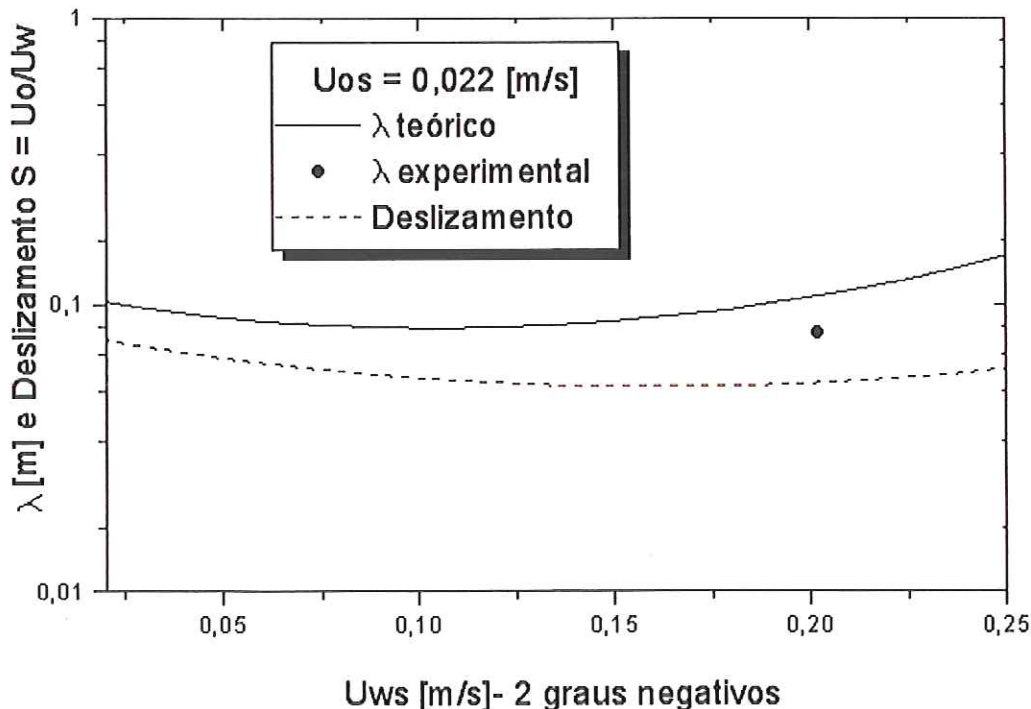


Figura 48 Comprimentos de onda interfacial ( $\lambda$ ) para inclinação de 2 graus negativos

As Figs. 47 e 48 apresentam, respectivamente, comparação direta entre comprimento de onda experimental ( $\lambda_{int.}$ ) e comprimento de onda previsto com inserção dos dados experimentais ( $\lambda_{teorico1}$ ) e com redução de variáveis ( $\lambda_{teorico2}$ ).

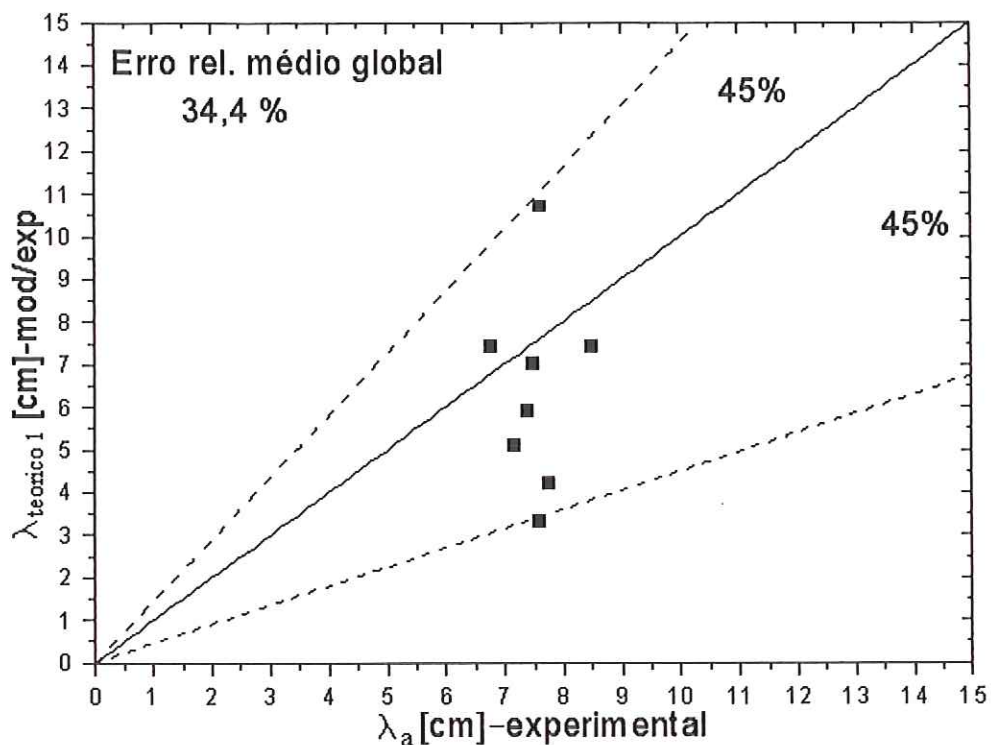


Figura 49 Comprimento de onda interfacial Experimental / Modelagem com dados experimentais

Na Fig. 48, vemos que a concordância quantitativa entre as previsões do modelo e dados experimentais é bastante satisfatória. A maior parte dos pontos se encontra dentro de uma dispersão de 45%, o que representa um bom resultado, considerando a complexidade do escoamento bifásico estratificado estudado e a simplicidade da abordagem unidimensional adotada. A modelagem com inserção dos dados experimentais consegue prever comprimentos de ondas interfacial com um erro global relativo bastante pequeno, da ordem de 34,4%, visto

que o modelo se aproxima bem da observação experimental. O erro é obtido através da seguinte equação:

$$Erro = \frac{1}{N} \sum_i \sqrt{\left( \frac{\lambda_{teo} - \lambda_{exp}}{\lambda_{exp}} \right)^2} \quad (5.2)$$

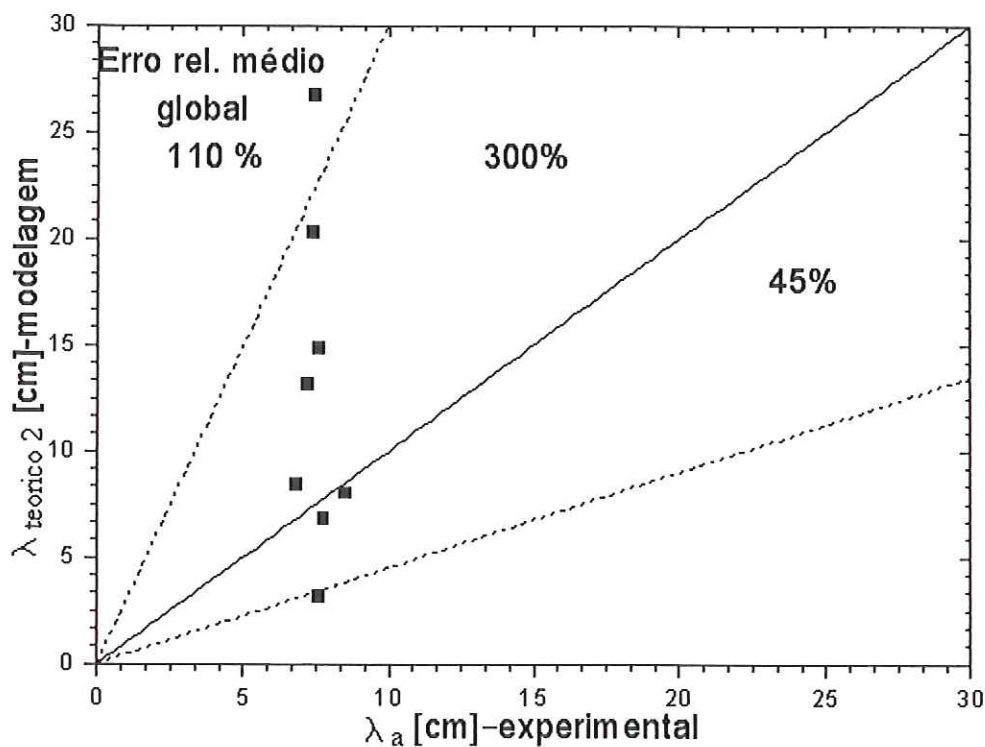
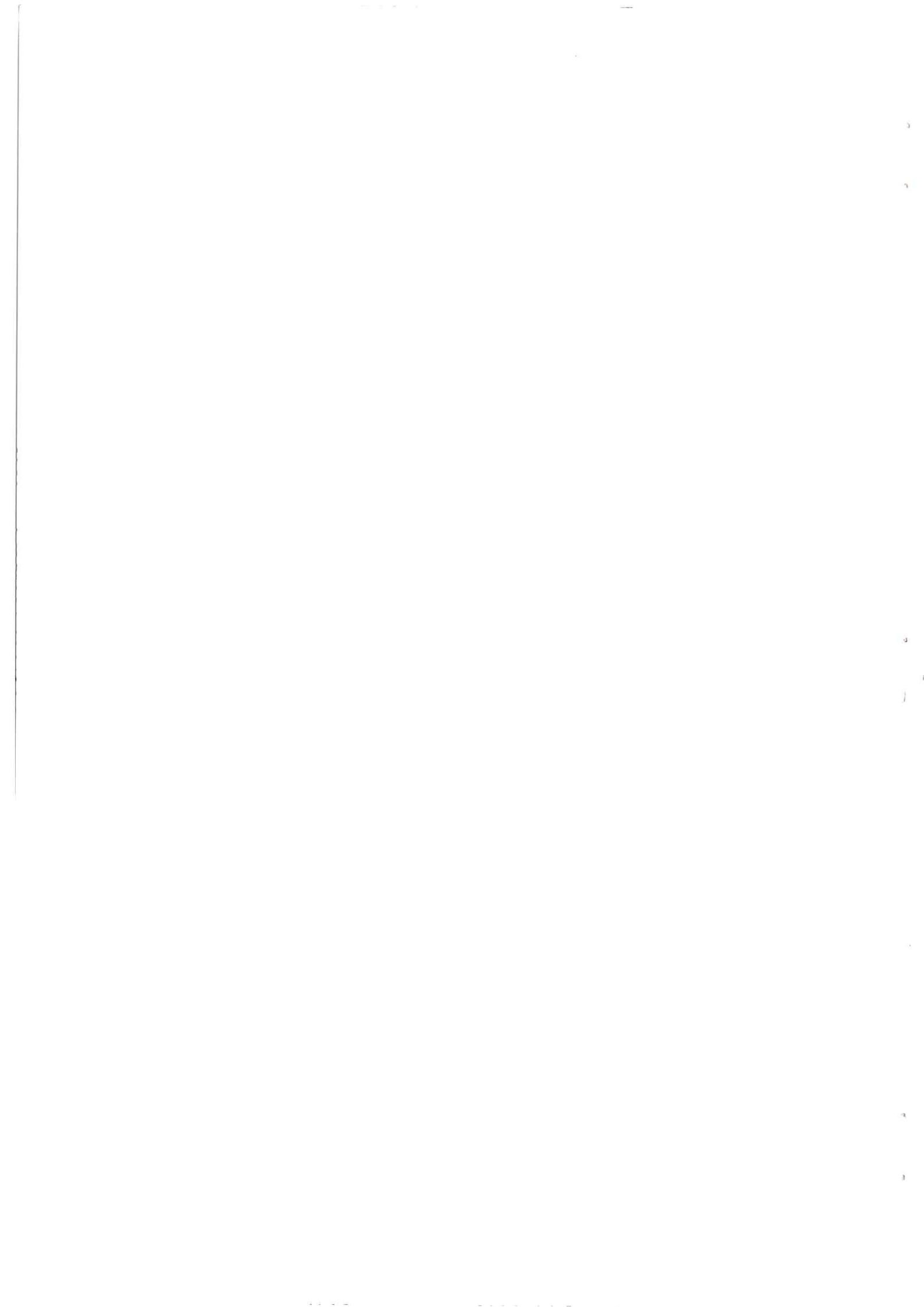


Figura 50 Comprimento de onda interfacial Experimental / Modelagem

Na Fig. 49 temos informação semelhante à apresentada na Fig. 48. Com a redução das variáveis, são feitas algumas aproximações e médias de alguns dos termos da Eq. (4.19), deixando de existir uma relação direta dos dados para aquele determinado par de vazões e inclinação. Esse fato faz com que a modelagem tenha um numero de graus de liberdade maior do que o que foi observado para a modelagem com a inserção direta das variáveis ( $\lambda_{teorico1}$ ). Portanto, uma comparação entre as Figs. 48 e 49 também pode ser interpretada como uma

análise de sensibilidade global das variáveis sobre a resposta. A modelagem com redução de variáveis produziu uma propagação de erro maior, evidenciando que a Eq. (4.19) possui uma sensibilidade muito grande às variáveis, superdimensionando os dados, como é observado na Fig.49. Este fato realça a importância de uma análise mais abrangente em torno das variáveis de inserção.





## **6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Neste trabalho, buscou-se entender e caracterizar as estruturas interfaciais ondulatórias em escoamentos estratificados óleo e água em dutos levemente inclinados. Técnicas experimentais foram desenvolvidas, dados foram coletados e é proposta uma modelagem matemática da onda interfacial.

São apresentadas duas técnicas experimentais para a medição de comprimentos de onda de estruturas ondulatórias interfaciais em escoamento bifásico água-óleo em tubulação levemente inclinada. Um método manual de aquisição é utilizado para a determinação dos comprimentos de onda da forma mais acurada possível. A limitação do método manual é o tempo de aquisição, tratamento e análise requerido. É proposto um método de captura e processamento automático das imagens, sendo responsável pela identificação das ondas interfaciais e fornecimento das propriedades geométricas desejadas. O método automático mostrou-se eficaz, sendo que o erro relativo global na obtenção do comprimento de onda foi da ordem de 5% em relação ao método manual para escoamento estratificado ondulado sem dispersão na interface, o que foi considerado suficiente para a validação da técnica automática. São oferecidos dados inéditos de comprimento de onda interfacial em escoamento óleo-água estratificado em tubulação de aço de 8,28 cm d.i. (D) para quatro inclinações da horizontal (-5, -2, +2 e +5 graus). Da análise dos dados, percebemos que o comprimento de onda médio variou entre (D) e (2D).

Uma primeira tentativa de modelagem matemática é apresentada no intuito de compreender melhor a que rege a formação de ondas na interface de um escoamento óleo-água estratificado. Uma expressão baseada na equação da energia bifásica unidimensional em

regime permanente é proposta para o cálculo das amplitudes e comprimentos de onda em função da geometria da tubulação, propriedades físicas dos fluidos, das velocidades *in-situ* do óleo e da água e do ângulo de inclinação.

Comparações feitas entre comprimentos de onda interfaciais médios e o deslizamento nos forneceram dados importantes correlacionados à teoria invíscida de Kelvin-Helmholtz, porém suspeitamos que em alguns casos os efeitos viscosos podem ter sido significativos em regiões que possuíam uma situação hidrodinâmica particular. Além disso, observamos que as ondas interfaciais médias eram compostas de ondas interfaciais intermediárias e curtas, estas provavelmente apresentando um comportamento não linear. Supomos que apenas as ondas intermediárias tenham um comportamento linear e através de técnica de tratamento de dados realizada no domínio da frequência separamos as ondas curtas das intermediárias. Comparação entre comprimento de onda interfacial intermediária e deslizamento interfacial apresentou resultados que contrariam as previsões da teoria invíscida de Kelvin-Helmholtz. Instabilidades de natureza viscosa podem ser preponderantes em regiões de relativamente baixa velocidade relativa entre as fases e quando se verifica uma variação significativa do número de Reynolds da fase aquosa. Porém, para velocidades superficiais mais altas da mistura se observou que instabilidades invíscidas tenderiam a ser dominantes e uma diminuição do deslizamento ocasionaria um aumento dos comprimentos de onda interfacial. O deslizamento previsto pela modelagem apresentou dados coerentes em comparação com os dados experimentais e foram utilizados para as comparações com o comprimento de onda interfacial intermediária.

De um modo geral, concluímos que a equação proposta prevê razoavelmente bem os comprimentos de onda interfacial intermediária, sejam eles adquiridos via modelagem com a inserção dos dados experimentais ou com redução de variáveis, fornecendo comprimentos de onda da mesma ordem de grandeza dos observados nos experimentos. Comparando, em

detalhes, os resultados experimentais dos comprimentos de onda interfacial intermediária com os previstos via modelagem com a inserção de dados experimentais, percebemos uma concordância quantitativa bastante razoável. A maior parte dos pontos se encontra dentro de uma faixa de dispersão de +/-45%, o que representa um bom resultado, considerando a complexidade do escoamento bifásico estratificado estudado e a simplicidade da abordagem unidimensional adotada. O modelo consegue prever comprimentos de ondas interfacial com um erro global relativo bastante pequeno, da ordem de 34,4%. As previsões do modelo com redução de variáveis sofreram com uma propagação de erro maior, demonstrando uma sensibilidade relativamente grande às variáveis, super-dimensionando os dados. Essa segunda comparação serviu como uma análise de sensibilidade global das variáveis sobre a resposta. Suspeitamos que alguns fatores, tais como: aproximações realizadas referentes à estrutura da onda interfacial (por uma senoide) e o número relativamente grande de graus de liberdade da equação de onda proposta, podem ter acarretado em alguns resultados não satisfatórios do ponto de vista quantitativo.

Para trabalhos futuros, se faz necessária a reavaliação de alguns fatores que, suspeitamos, sejam peças fundamentais para uma correta previsão das propriedades geométricas da interface. Notamos que a estrutura interfacial observada no escoamento bifásico poderia ser aproximada não por uma senoide, mas sim por uma estrutura equivalente a encontrada nas ondas do mar próximas à arrebentação. Esse tipo de estrutura modificaria as previsões do comprimento de onda, visto que as diferenças de pressão ao longo da onda interfacial e suas respectivas frações volumétricas acima e abaixo dos picos e vales seriam afetados. Outros aspectos a serem observados estão embutidos nas variáveis de entrada da modelagem. O aprofundamento do estudo das características analíticas da equação da onda serviria como um moderador da propagação de erro relativo da modelagem.

## *Conclusões*

---

Para a presente pesquisa foi utilizado um banco de dados levantado originalmente para outra finalidade e, portanto, limitado. Assim, comparações essenciais mais detalhadas para a correta compreensão da função das propriedades geométricas da interface com as velocidades superficiais e inclinação não foram possíveis. Uma coleta de dados mais abrangente, em termos de velocidades superficiais, tanto do óleo como da água, para uma certa gama de inclinações seria preponderante para a viabilização de uma análise mais conclusiva. O Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos - NETeF - da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP – está, no momento, habilitado para esse trabalho.

## 7 – LISTA DE REFERÊNCIAS

- ALKAYA, B.; JAYAWARDENA, S.S.; BRILL; J.P. (2000). Oil water flow patterns in slightly inclined pipes. In: ETCE/OMAE200 JOINT CONFERENCE: energy for the news millennium, 2000, New Orleans. **Proceedings...** New York: ASME. p. 14-17
- AL-SARKHI, A.; ABU-NADA, E.; BATAYNEH, M. (2006). Effect of drag reducing polymer on air-water annular flow in an inclined pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.32, n.8, p.926-934, Aug.
- AL-WAHAIBI, T.; ANGELI, P. (2006). **Predictive model for critical wave amplitude at the onset of entrainment in oil-water flow**. London: Department of Chemical Engineering, University College London.
- AMARAL, R. F.(2006). **Desenvolvimento de software e interface A/D para aquisição de dados e controle de escoamentos bifásico óleo-água e trifásico óleo-água-ar** Iniciação Científica, Orientador Oscar Maurício Hernandez Rodriguez. Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos-NETeF.Escola de Engenharia de São Carlos.Universidade de São Paulo
- ANGELI, P.; HEWITT, G.F. (1998). Pressure gradient in horizontal liquid-liquid flows. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.24, n.6, p.1183-1203, Sept.
- ANGELI, P.; HEWITT, G.F. (2000). Flow structure in horizontal oil-water flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.26, n.7, p.1117-1140, July.
- AROSIO, S.; GUILIZZONI, M. (2006). Structure visualization for a gas-liquid flow - quantitative flow structure fields. **Journal of Visualization**, Tokyo, v.9, n.3, p.275-282.
- AUGIER, F. et al. (2003). Volume fraction gradient-induced flow patterns in a two-liquid phase mixing layer. **Chemical Engineering Science**, London, v.58, n.17, p.3985-3993, Sept.
- BANNWART, A.C. et al. (2004). Flow patterns in heavy crude oil-water flow. **Journal of Energy Resources Technology**, New York, v.126, n.3, p.184-189, Sept.
- BERTHELSEN, P.A.; YTREHUS, T. (2005). Calculations of stratified wavy two-phase flow in pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.31, n.5, p.571-592, May.
- BOOMKAMP, P.A.M.; MIESEN, R.H.M. (1996). Classification of instabilities in parallel two-phase flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.22, n.1, p.67-88, Feb.

- BONTOZOGLOU, V.; HANRATTY, T.J. (1989). Wave height estimation in stratified gas-liquid flows. **Aiche Journal**, New York, v.35, n.8, p.1346-1350.
- BONTOZOGLOU, V. (1991). Weakly nonlinear Kelvin-Helmholtz waves between fluids of finite depth. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.17, n.4, p.509-518, July/Aug.
- BRAUNER, N.; ROVINSKY, J.; MARON, D.M. (1996). Determination of the interface curvature in stratified two-phase systems by energy considerations. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.22, n.6, p.1167-1185, Nov.
- BRAUNER, N.; MARON, D.M. (1994). Stability of 2-phase stratified flow as controlled by laminar turbulent transition. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Oxford, v.21, n.1, p.25-74, Jan./Feb.
- BRAUNER, N.; MARON, D.M.; ROVINSKY, J. (1998). A Two-fluid model for stratified flows with curved interfaces. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.24, n.8, p.975-1004, Sept.
- BRAUNER, N.; MARON, D.M. (1992). Flow pattern transitions in two-phase liquid-liquid flow in horizontal tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.18, n.1, p.123-140, Jan.
- DRAZIN, P.G.; REID, W.H. (1981). **Hydrodynamic stability**. Cambridge: Cambridge University Press.
- DYMENT, A.; BOUDLAL, A. (2004). A Theoretical model for gas-liquid slug flow in down inclined ducts. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.30, n.5, p.512-550, May.
- HAHEIM, S.A. (2001). **Oil-water slip in inclined pipes and application to downhole separation**. Norway: ABB Corporate Research.
- HU, B.; ANGELI, P. (2006). Phase inversion and associated phenomena in oil-water vertical pipeline flow. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, Ottawa, v.84, n.1, p.94-107, Feb.
- KERLE, T.; KLEIN, J.; YERUSHALMI-ROZEN, R. (2002). Accelerated rupture at the liquid/liquid interface. **Langmuir**, Washington, v.18, n.26, p.10146-10154, Nov.
- LI, G.J.; GUO, L.; CHEN, X.J. (1997). An Experimental investigation on the interfacial waves in air-water two-phase flow within horizontal pipelines. **Chinese Journal Chemical Engineering**, China, v.5, n.4, p.316-324, Dec.
- LOPES ROMA, W.N. (2003). **Fenômenos de transporte para engenharia**. São Carlos: Rima.
- LOVICK, J.; ANGELI, P. (2004). Droplet size and velocity profiles in liquid-liquid horizontal flows. **Chemical Engineering Science**, London, v.59, n.15, p.3105-3115, Aug.

- LUM, J.Y.L.; AL-WAHAIBI, T.; ANGELI, P. (2006). Upward and downward inclination oil-water flows. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.32, n.4, p.413-435, Apr.
- LUM, J.Y.; LOVICK, J.; ANGELI, P. (2004). Low inclination oil-water flows. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, Ottawa, v.82, n.2, p.303-315, Apr.
- MENG, W.H. et al. (2001). Experimental study of low-liquid-loading gas-liquid flow in near-horizontal pipes. **SPE Production & Facilities**, Richardson, v.16, p.240-249.
- OLIEMANS, R.V.A.; OOMS, G.; WU, H.L. (1986). **The Lubricating-film model for core-annular flow**. Ph.D.Thesis - Technische Hogeschool Felft, Delft Universitu of Technologic, Netherlands, 1986.
- PINTO Jr, D, L (2007). **Software livre EstatcampExcel**. <http://www.estatcamp.com.br>
- RAJ, T.S.; CHAKRABARTI, D.P.; DAS, G. (2005). Liquid-liquid stratified flow through horizontal conduits. **Chemical Engineering & Technology**, Weinheim, v.28, n.8, p.899-907, Aug.
- RODRIGUEZ, O.M.H.; OLIEMANS, R.V.A. (2006). Experimental study on oil-water flow in horizontal and slightly inclined pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.32, n.3, p.323-343, Mar.
- RODRIGUEZ, O.M.H.; OLIEMANS, R.V.A.; MUDE, R.F. (2006). Stability analysis of slightly-inclined stratified oil-water flow, including the distribution coefficients and the cross-section curvature. In: NORTH AMERICAN CONFERENCE ON MULTIPHASE TECHNOLOGY, 5., 2006, Banff. **Proceedings...** Cranfield: BRH Group. P.229-245.
- RODRIGUEZ , O.M.H., BANNWART A.C. (2006a). Experimental study on interfacial waves in vertical core flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering** . v.54 p.140-148, julho.
- RODRIGUEZ , O.M.H., BANNWART A.C. (2006b). Analytical model for interfacial waves in vertical core flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v.54 p. 173-182, julho.
- RODRIGUEZ , O.M.H., BANNWART A.C. (2007). Neutral- stability wave number in parallel liquid-liquid flows. **International Conference on Multiphase Flow**, ICMF 2007, paper 571, Leipzig, Alemanha, julho, p. 9-13
- TRALLERO, J.L. (1995). **Oil-water flow patterns in horizontal pipes**. Ph.D. Thesis - The University of Tulsa, Tulsa, 1995.
- TRALLERO, J.L.; SARICA, C.; BRILL, J.P. (1997). A Study of oil/water flow patterns in horizontal pipes. **SPE Production & Facilities**, Richardson, v.12, n.3, p.165-172, Aug..

ULLMANN, A., ZAMIR, M., LUDMER, Z., BRAUNER, N (2003). Stratified laminar countercurrent flow of two liquid phases in inclined tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.29, n.10, p.1583-1604, Oct.

ULLMANN, A.; BRAUNER, N. (2006). Closure relations for two-fluid models for two-phase stratified smooth and stratified wavy flows. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.32, n.1, p.82-105, Jan.

WALLIS, G.B. (1969). **One dimension two-phase flow**. New York: McGraw-Hill.

WANG, Z.L.; GABRIEL, K.S.; MANZ, D.L. (2004). The Influences of wave height on the interfacial friction in annular gas-liquid flow under normal and microgravity conditions. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.30, n.10, p.1193-1211, Oct.

WANG, Z.L.; GABRIEL, K.S.; ZHU, Z.F. (2004). The Effects of gravity on the features of the interfacial waves in annular two-phase flow. **Microgravity Science and Technology**, Bremen, v.15, n.3, p.19-27.