CLÉBER CARVALHO PEREIRA

**Estudo experimental e modelagem do escoamento estratificado
ondulado óleo-água**

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Área de concentração: Térmica e
Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Oscar Mauricio
Hernandez Rodriguez

São Carlos

2011

Folha de Julgamento

“Ai está o que é desagradável! É sempre a velha história! Quando se terminou de construir a própria casa, de repente se percebe que, ao construí-la, aprendeu-se alguma coisa que se deveria ter sabido antes de... começar. O eterno e doloroso “muito tarde!”– A melancolia de tudo o que se acaba!” (Nietzsche)

Dedicatória

Dedico este trabalho primeiramente a Deus.

A minha mãe, Lucia Helena Carvalho Pereira ao meu irmão Cleison Carvalho Pereira e meu sobrinho Eduardo Vieira Pereira.

Ao meu pai Renato Pereira e minha avó Emerentina Pereira , mesmos não estando no nosso plano material acredito que estariam felizes por mais essa minha conquista.

A minha tia, Rita de Cássia Prado de Carvalho , meu primo Sávidor Conti Carvalho que considero não apenas um primo mas um grande amigo e minha prima Débora Carvalho dos Santos (Debi).

Em especial ao Fabio dos Santos Machado Zanucolli pelo seu apoio tanto nos momentos ruins como nos bons e ao Diego Oliveira de Mello (Carioca), graças aos seus conselhos eu ingressei na pós-graduação na Engenharia Mecânica e continuei seu trabalho de mestrado.

Aos meus fieis amigos, Rodrigo Lopes Costa, Cláudia Margareth, Fabrício Borges Moreira (Fafito), Nikolas Paparidis (Nikito), Marcelo Demunari (Devil), Angela Caldeira, Edileuza Silva, Jeovane Alencar, Ricardo Flávio (Xarope), Marcilene Aparecida Oliveira (Cidinha de Oliveira) e Marcio Chaberiberi (Chaba).

Agradecimentos

Ao meu orientador professor Dr. Oscar Maurício Hernandez Rodriguez por ter me incentivado a concluir este trabalho com sábios conselhos, por toda atenção dedicada a mim sempre quando precisei. Agradeço por ter acreditado em mim e por ter me dado a oportunidade de conhecer a área de Engenharia Mecânica. Muito obrigado, Oscar!

Aos professores Antonio Moreira dos Santos pelo conhecimento transmitido e Gherhardt Ribatski pelo incentivo a continuar na pós-graduação e contribuindo com o empréstimo da câmera de alta velocidade que utilizei no meu experimento.

Aos técnicos Roberto Lourenço, Roberto Pratavieira, em especial ao Jorge Nicolau dos Santos pela ajuda na implementação do software para a aquisição dos dados da onda. Muito obrigado Jorge! E ao José Roberto Bogni (Zé) pela ajuda na bancada experimental e pelos churrascos nas quintas sempre com aquela Brahma estupidamente gelada.

Aos colegas de trabalho, em especial ao Marcelo Souza de Castro e Fernando Augusto Alves Mendes (Pato) pelo auxilio na minha parte experimental e Luis Enrique Ortiz Vidal (Pitcho) pelos conselhos, Evelise Roman Corbalan Góis, Iara Hernandez Rodriguez, Dionatan Angelo Morretti e Mateus Fernando Geremias.

RESUMO

PEREIRA, C. C. **Estudo experimental e modelagem do escoamento estratificado ondulado óleo-água**. 2011.144 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2011.

O escoamento estratificado óleo-água é bastante comum na indústria do petróleo, especialmente em poços direcionais *offshore*, oleodutos e gasodutos. Entretanto, existem poucos trabalhos na literatura sobre a natureza da estrutura ondulatória observada no escoamento em dutos ascendentes ou descendentes a partir da horizontal. O objetivo deste trabalho foi estudar as propriedades geométricas e cinemáticas da onda interfacial, *i.e*, forma média, comprimento, amplitude e celeridade, e assim contribuir para a compreensão do papel da onda interfacial na dinâmica do escoamento estratificado. Um software baseado em plataforma Labview® possibilitou a automação para obtenção dos dados das ondas interfaciais extraídas de imagens de vídeos de alta resolução. Além das propriedades das ondas, também se coletaram valores de fração volumétrica *in situ* e de gradiente de pressão bifásico para cinco ângulos de inclinação (-20° , -10° , 0° , 10° e 20°) em diferentes pares de vazões de óleo e água. Desenvolveu-se um modelo fenomenológico considerando os termos ondulatórios do escoamento para o cálculo da fração volumétrica *in situ* e do gradiente de pressão bifásico, sendo comparado com modelos disponíveis na literatura e dados experimentais. A concordância do modelo proposto com os dados coletados neste trabalho se mostrou muito boa, o que sugere um avanço em comparação ao existente na literatura. O estudo da equação da onda de perturbação interfacial para o escoamento estratificado óleo-água indicou que a natureza da onda observada é cinemática e não dinâmica; e baseado na equação da celeridade da onda cinemática pode-se confrontar a celeridade experimental com a teórica, revelando boa concordância.

Palavras-Chave: Escoamento bifásico, Escoamento óleo-água, Escoamento estratificado, Onda interfacial, Queda de pressão, Fração volumétrica.

ABSTRACT

PEREIRA, C. C. **Experimental study and modeling of wavy oil-water stratified pipe flow**. 2011.144 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2011.

The oil-water stratified flow is quite common in the oil industry, especially in offshore directional wells and pipelines. However, there are few studies on the physics of the wavy structure observed in upward and downward stratified flow. The goal of this work was to study the geometric and kinematic properties of interfacial waves, i.e., the average shape, wavelength, amplitude and celerity. A homemade Labview®-based software enabled the automatic acquisition of data extracted from frames obtained via high resolution video recording. *In situ* volume fraction and two-phase pressure gradient data for five inclination angles (-20° , -10° , 0° , 10° and 20°) at several pairs of oil and water flow rates were also collected. A phenomenological model that takes into account the wavy structure is proposed to calculate volume fractions and two-phase pressure gradient and it was compared with available models from the literature and experimental data. The good agreement of the proposed model with the data collected in this study is promising and suggests that it may provide better predictions in comparison with models from the literature. The study of the interfacial perturbation wave equation for stratified flow indicates that the observed wave's nature is kinematic and not dynamic; and based on the kinematic wave velocity equation we could compare the experimental celerity with the theoretical one, with good agreement.

Keywords: Two-phase flow, Oil-water flow, Stratified flow, Interfacial wave, Pressure drop, Volume fraction.

Lista de figuras

FIGURA 2.1- PADRÕES DE ESCOAMENTO OBSERVADOS POR TRALLERO (2005).....	36
FIGURA 2.2- (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA <i>IN SITU</i> E (B) QUEDA DE PRESSÃO POR TRALLERO (2005).....	37
FIGURA 2.3- PADRÕES DE ESCOAMENTO ÓLEO-ÁGUA OBSERVADOS POR ELSETH (2001).....	38
FIGURA 2.5- (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA <i>IN SITU</i> DA ÁGUA E (B) QUEDA DE PRESSÃO OBSERVADA POR RODRIGUEZ <i>ET AL.</i> (2006).	41
FIGURA 2.6- ESCOAMENTO ESTRATIFICADO LÍQUIDO-LÍQUIDO COM INTERFACE PLANA E CURVA.....	42
FIGURA 2.7- REPRESENTAÇÃO DA TOPOLOGIA DA INTERFACE DESCRITA POR AL-WAHAIBI E ANGELI (2006A).....	44
FIGURA 2.8- DEFORMAÇÃO DA ONDA CAUSADA PELA FORÇA DE ARRASTO E PELA TENSÃO INTERFACIAL DESCRITA POR AL-WAHAIBI E ANGELI (2006B).....	45
FIGURA 3.1- ESQUEMA DO CIRCUITO EXPERIMENTAL.....	48
FIGURA 3.2 - FOTOGRAFIA DO CIRCUITO EXPERIMENTAL.....	49
FIGURA 3.3- TRANSDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL DA VALIDYNE.....	49
FIGURA 3.4- CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL.....	50
FIGURA 3.5- INCLINÔMETRO DIGITAL.....	50
FIGURA 3.6- ESTAÇÃO DE TRABALHO REMOTO.	51
FIGURA 3.7- PAINEL FRONTAL DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS.....	51
FIGURA 3.8- REÔMETRO - LVDV-III+.	54
FIGURA 3.9- VISCOSIDADE DO ÓLEO PADRÃO (SHELL VITREA 100 NÃO UTILIZADO EM TESTES) EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	54
FIGURA 3.10- VISCOSIDADE DO ÓLEO USADO (SHELL VITREA 100 UTILIZADO EM TESTES) EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.	55

FIGURA 3.11- VISCOSIDADE DO ÓLEO USADO E ÓLEO LIMPO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	55
FIGURA 3.12- MEDIDOR DE TENSÃO INTERFACIAL E ÂNGULO DE CONTATO, MODELO CAM 200, MARCA KSV.....	57
FIGURA 3.13- TENSÃO INTERFACIAL DO ÓLEO USADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	57
FIGURA 3.14 - GOTA ADERIDA À SUPERFÍCIE DO VIDRO DE BOROSILICATO.....	58
FIGURA 3.15- CARTAS DE FLUXO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS DE ÁGUA E ÓLEO NAS INCLINAÇÕES (A) HORIZONTAL, (B) 10° DESCENDENTE, (C) 20° DESCENDENTE, (D) 10° ASCENDENTE E (E) 20° ASCENDENTE; SENDO: ST- ESTRATIFICADO LISO, SW- ESTRATIFICADO ONDULADO, DO/W&W- DISPERSÃO DE ÓLEO EM ÁGUA E ÁGUA, DO/W&DW/O- DISPERSÃO DE ÓLEO EM ÁGUA E DISPERSÃO DE ÁGUA EM ÓLEO; SW* INDICA OS PONTOS ANALISADOS NESTE TRABALHO.	59
FIGURA 3.16- APARATO EXPERIMENTAL PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS DA ONDA.	60
FIGURA 3.17- IMAGEM OBTIDA PELA CÂMERA.....	61
FIGURA 3.18- IMAGEM BINARIZADA.....	61
FIGURA 3.19 (1) REPRESENTA O <i>KERNEL</i> E (2) PARTE DA IMAGEM.....	63
FIGURA 3.20 ESQUEMA DA OPERAÇÃO CONVOLUÇÃO.....	63
FIGURA 3.21- IMAGEM DA INTERFACE OBTIDA PELO SOFTWARE.....	64
FIGURA 3.22- IMAGEM DAS ONDAS FILTRADAS.	65
FIGURA 3.23- ONDA DIVIDIDA EM <i>N</i> COMPRIMENTOS DE ONDA.....	66
FIGURA 3.24- AMPLITUDES DA ONDA.	67
FIGURA 3.25- CORRELAÇÃO CRUZADA.....	68
FIGURA 3.26- REPRESENTAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO DA ONDA INTERMEDIÁRIA..	69
FIGURA 3.27- FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DESCRITAS PELO PROGRAMA.....	70
FIGURA 3.28- PAINEL FRONTAL DA BINARIZAÇÃO DA IMAGEM.....	70

FIGURA 3.29 -PAINEL FRONTAL DA FILTRAGEM E (ADIMENSIONALIZAÇÃO E NORMALIZAÇÃO).....	71
FIGURA 3.30 -PAINEL FRONTAL DO CÁLCULO DA AMPLITUDE E COMPRIMENTO DA ONDA.....	72
FIGURA 3.31- PAINEL FRONTAL DO CÁLCULO DA CELERIDADE DA ONDA.....	73
FIGURA 3.32- RÉGUAS DE CALIBRAÇÃO DA IMAGEM.....	74
FIGURA 3.33- PDF: COMPRIMENTO, AMPLITUDE E CELERIDADE PARA INCLINAÇÃO 0°.....	76
FIGURA 4.1- PADRÃO DE ESCOAMENTO ESTRATIFICADO ÓLEO-ÁGUA COM GEOMETRIA DA INTERFACE PLANA.....	79
FIGURA 4.2 - PADRÃO DE ESCOAMENTO ESTRATIFICADO ÓLEO-ÁGUA COM GEOMETRIA DA INTERFACE CURVA	82
FIGURA 5.1 AJUSTE DO Ck PARA A FRAÇÃO VOLUMÉTRICA <i>IN SITU</i> DA ÁGUA.....	90
FIGURA 5.2- AJUSTE DO Ck PARA A QUEDA DE PRESSÃO BIFÁSICA.	90
FIGURA 5.3- FRAÇÃO VOLUMÉTRICA <i>IN SITU</i> DO ÓLEO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO ÓLEO: DADOS EXPERIMENTAIS, MODELO HOMOGÊNEO, MODELO DE RODRIGUEZ E OLIEMANS (2006) E MODELO PROPOSTO, PARA AS INCLINAÇÕES (A) HORIZONTAL, (B) -10°, (C) -20°, (D) +10° E (E) +20°.....	92
FIGURA 5.4- COMPARAÇÃO ENTRE A FRAÇÃO VOLUMÉTRICA <i>IN SITU</i> DE ÓLEO OBTIDA PELO MODELO PROPOSTO E A OBTIDA EXPERIMENTALMENTE.....	93
FIGURA 5.5- COMPARAÇÃO ENTRE A FRAÇÃO VOLUMÉTRICA <i>IN SITU</i> DE ÓLEO OBTIDA PELO MODELO DE RODRIGUEZ E OLIEMANS (2006) E A OBTIDA EXPERIMENTALMENTE.....	93
FIGURA 5.6- COMPARAÇÃO ENTRE A FRAÇÃO VOLUMÉTRICA <i>IN SITU</i> DE ÓLEO OBTIDA PELO MODELO HOMOGÊNEO E A OBTIDA EXPERIMENTALMENTE.....	94
FIGURA 5.7- QUEDA DE PRESSÃO EM 7,5 METROS DE TUBULAÇÃO: EXPERIMENTAL, MODELO HOMOGÊNEO, MODELO DE RODRIGUEZ E OLIEMANS (2006) E MODELO PROPOSTO, PARA AS INCLINAÇÕES (A) HORIZONTAL, (B) -10°, (C) -20°, (D) +10°.	95

FIGURA 5.8 -DADOS DE COMPRIMENTO MÉDIO DA ONDA EM FUNÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA *IN SITU* DE ÓLEO E PARA (A) HORIZONTAL, 10° DESCENDENTE E 10° ASCENDENTE, (B) 20° DESCENDENTE E 20° ASCENDENTE.... **97**

FIGURA 5.9- DADOS DE AMPLITUDE MÉDIA DA ONDA EM FUNÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA *IN SITU* DE ÓLEO E PARA (A) HORIZONTAL, 10° DESCENDENTE E 10° ASCENDENTE, (B) 20° DESCENDENTE E 20° ASCENDENTE. **98**

FIGURA 5.10- CELERIDADE DA ONDA MÉDIA, VELOCIDADES *IN SITU* DE ÓLEO (VO) E ÁGUA (VW) EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DE ÓLEO, PARA AS INCLINAÇÕES (A) HORIZONTAL, (B) -10°, (C) -20°, (D) +10° E (E) +20°. **99**

FIGURA 5.11- COEFICIENTE ADIMENSIONAL φ^* EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO ÓLEO PARA AS INCLINAÇÕES (-20°, -10°, 0°, +10° E 20°).....**102**

FIGURA 5.12- COEFICIENTE ADIMENSIONAL η^* EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO ÓLEO PARA AS INCLINAÇÕES (-20°, -10°, 0°, +10° E 20°)**102**

FIGURA 5.13- CELERIDADE MÉDIA DA ONDA INTERFACIAL PARA AS INCLINAÇÕES (A) HORIZONTAL, (B) -10°, (C) -20°, (D) +10° E (E) +20°.**104**

FIGURA 5.14- COMPARAÇÃO ENTRE A CELERIDADE MÉDIA DE ONDA CINEMÁTICA OBTIDA PELA EQUAÇÃO 4.33 E A OBTIDA EXPERIMENTALMENTE. **105**

FIGURA 5.15- FORMA MÉDIA DA ONDA PARA AS INCLINAÇÕES (A) (0°,-10 E 10°) E (B) (-20° E 20°).**106**

FIGURA A.1- (A) COMPRESSOR; (B) TORRES DE RESFRIAMENTO DE AR.....**117**

FIGURA A.2- TANQUE ACUMULADOR DE AR.....**118**

FIGURA A.3- INVERSORES DE FREQUÊNCIA.....**119**

FIGURA A.4- BOMBAS HELICOIDAIS DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA E ÓLEO.....**119**

FIGURA A.5- DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SEPARADOR DE PLACAS COALESCENTES.....**120**

FIGURA A.6- SEPARADOR DE ÁGUA E ÓLEO DO TIPO PLACAS COALESCENTES.**120**

FIGURA A.7- (A)MEDIDOR TIPO VÓRTEX EX-DELTA PARA ALTAS VAZÕES DE ÁGUA, (B) MEDIDOR OVAL DE ENGENHAGENS PARA BAIXAS VAZÕES DE ÁGUA. ...**121**

FIGURA A.8- (A) MEDIDOR BAIXAS VAZÕES, (B) MEDIDOR MÉDIAS VAZÕES.....**122**

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Testes de densidade do óleo.....	53
Tabela 3.2 Valores médios de viscosidade.....	56
Tabela 3.3 Valores médios do ângulo de contato.....	58

Lista de símbolos

Letras latinas

A	Área da seção transversal do tubo
A_o	Área da seção transversal ocupada pelo óleo
A_w	Área da seção transversal ocupada pela água
C_o	Fração volumétrica de injeção de óleo
C_w	Fração volumétrica de injeção da água
C_v	Celeridade da onda
d	Defasagem entre duas imagens
D	Diâmetro interno do tubo
D_{ho}	Diâmetro hidráulico do óleo
D_{hw}	Diâmetro hidráulico da água
DP	Queda de pressão
(dp/dz)	Gradiente de pressão bifásico
F_a	Força de arrasto interfacial
fr	Número de <i>imagens</i>
f	Equilíbrio local da quantidade de movimento
f_o	Fator de atrito do óleo
f_w	Fator de atrito da água
f_i	Fator de atrito interfacial
g	Gravidade
h_a	Altura da água
$P_{(i,j)}$	Função do pixel central
Q_w	Vazão volumétrica de injeção da água
Q_o	Vazão volumétrica de injeção do óleo
k	Função da correlação cruzada
Re_w	Número de Reynolds da água
Re_o	Número de Reynolds do óleo
S_w	Perímetro molhado pela água
S_o	Perímetro molhado pelo óleo
S_i	Perímetro molhado pela interface
s	Escurregamento
U_{os}	Velocidade superficial do óleo

U_{ws}	Velocidade superficial da água
V_o	Velocidade <i>in situ</i> do óleo
V_w	Velocidade <i>in situ</i> da água
V_r	Velocidade relativa entre as fases
x ou y	Variável ou coordenada espacial

Letras Gregas

ε_o	Fração volumétrica <i>in situ</i> do óleo
ε_w	Fração volumétrica <i>in situ</i> da água
ρ	Densidade
μ	Viscosidade
θ	Ângulo de inclinação
τ_o	Tensão cisalhante parietal do óleo
τ_w	Tensão cisalhante parietal da água
τ_i	Tensão cisalhante interfacial
δ	Rugosidade interfacial
α_m	Amplitude média da onda
λ_m	Comprimento médio da onda
ϵ	Rugosidade parietal
σ	Tensão interfacial óleo-água
φ	Termo da equação de instabilidade do escoamento estratificado relacionado as ondas dispersivas
η	Termo da equação de instabilidade do escoamento estratificado relacionado as ondas dinâmicas

Subscrito

m	Médio
o	Fase do óleo
w	Fase da água
Teo	Teórico
m	Mistura

Siglas

ST	Estratificado liso
SW	Estratificado ondulado
SW&MI	Estratificado ondulado com mistura na interface
Do/w&w	Dispersao de óleo em água e água
Do/w& Dw/o	Dispersao de óleo em água e dispersão de água em óleo

SUMÁRIO

CAPITULO 1 -INTRODUÇÃO.....	27
CAPITULO 2 -REVISÃO DA LITERATURA	31
2.1 Considerações iniciais	31
2.2 Uma breve abordagem ao escoamento gás-líquido	34
2.3 Padrões de escoamento líquido-líquido em tubulações horizontais e levemente inclinadas	34
2.4 Estrutura ondulatória em escoamento estratificado	41
2.4.1 Interface do padrão estratificado ondulado	41
2.4.2 Geometria da onda interfacial.....	43
2.4.3 Instabilidade hidrodinâmica no escoamento estratificado ondulado	46
CAPITULO 3 -TRABALHO EXPERIMENTAL	47
3.1 Instrumentação e Aquisição de Sinais	49
3.1.1 Transdutores de pressão	49
3.1.2 Medição do ângulo de inclinação da linha de testes.....	50
3.1.3 Estação de controle remoto	50
3.1.4 Aquisição de sinais.....	51
3.2 Medição da fração volumétrica <i>in situ</i> de óleo através da técnica das válvulas de fechamento rápido	52
3.3 Propriedades físicas do óleo.....	53
3.3.1 Densidade do óleo	53
3.3.2 Viscosidade dinâmica do óleo	54
3.3.3 Tensão interfacial Óleo-água.....	56
3.3.4 Ângulo de contato	57
3.4 Organização do trabalho experimental	58
3.5 Aparato experimental para aquisição dos dados da onda	60
3.6 Tratamento da Imagem.....	60
3.6.1 Localização da imagem	60
3.6.2 Binarização da imagem.....	61
3.6.3 Eliminação de bolhas e ruídos através de morfologia	61

3.6.4 Localização e detecção da interface	62
3.6.5 Filtro de Fourier	64
3.7 Cálculo das propriedades da onda	65
3.7.1 Definição e cálculo das propriedades geométricas da onda	65
3.7.2 Celeridade da onda.....	67
3.7.3 Topologia média da onda	68
3.8 Programa de aquisição das propriedades geométricas e cinemáticas da onda	70
3.8.1 Binarização da imagem.....	70
3.8.2 Filtragem e normalização	71
3.8.3 Cálculo da amplitude e comprimento de onda médios	72
3.8.4 Cálculo da Celeridade da onda	73
3.9 Calibração da Imagem	74
3.10 Determinação da taxa de amostragem dos <i>imagens</i>	74
3.11 Análise estatística dos dados	75
CAPITULO 4 -MODELAGEM MATEMÁTICA.....	77
4.1 Modelagem para o cálculo da fração volumétrica <i>in situ</i> e gradiente de pressão bifásico (Fases separadas)	77
4.1.1 Modelagem das equações de fechamento proposta por Rodriguez e Oliemans (2006)	78
4.1.2 Modelagem das equações de fechamento proposta por este trabalho	81
4.1.3 Modelo homogêneo	84
4.2 Equação da onda interfacial para o escoamento estratificado óleo-água.....	85
CAPITULO 5 -RESULTADOS E DISCUSSÃO.	89
5.1 Ajuste do termo ondulatório do fator de atrito interfacial (constante Ck).....	89
5.2 Previsão da fração volumétrica <i>in situ</i> do óleo e perda de carga bifásica	91
5.2.1 Fração volumétrica <i>in situ</i> do óleo	91
5.2.2 Queda de pressão bifásica.....	94
5.3 Propriedades geométricas e cinemáticas da onda interfacial	96
5.4 Estudo da natureza da onda interfacial	101
5.5 Forma da onda	103

CAPITULO 6 -CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
APÊNDICE A -INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS DO NETEF.....	117
A.1 Sistema de suprimento de ar	117
A.2 Sistemas de suprimento de água e óleo.....	118
A.3 Separador de água e óleo	120
A.4 Medidores de vazão de água	121
APÊNDICE B -TABELA COM OS DADOS EXPERIMENTAIS.....	123
APÊNDICE C -INCERTEZA EXPERIMENTAL	125
C.1 Velocidades superficiais de água e óleo	127
C.2 Fração volumétrica <i>in situ</i> do óleo	128
C.3 Perda de carga.	131
APÊNDICE D -PROGRAMA LABVIEW	133
D.1 Binariza e apara	133
D.2 Filtra e normaliza	134
D.3 Cálculo do comprimento e amplitude da onda.	135
D.4 Cálculo da celeridade da onda	136
APÊNDICE E -PROGRAMA PARA O TRATAMENTO DOS DADOS DE FRAÇÃO VOLUMETRICA IN SITU E PERDA DE CARGA.....	137
E.1 Interface plana(modelo de Rodriguez e oliemans (2006))	137
E.2 Interface curva (modelo proposto por essa pesquisa)	139
E.3 Equação de instabilidade do escoamento estratificado.....	142

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos 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 bifásicas: (i) gás ou líquido-sólido (alguns exemplos: leitos fluidizados borbulhantes ou circulantes, biorreatores e transporte pneumático), com aplicações comuns na indústria farmacêutica, metalúrgica e petroquímica (reações de síntese, craqueamento catalítico, reações de oxidação 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 condensadores de vapor, óleo-gás e água-gás em tubulações), com aplicações comuns na indústria petroquímica e de refrigeração (microbiologia, refrigeração e ventilação industrial e produção e transporte de petróleo e gás natural); e (iii) líquido-líquido (escoamento óleo leve/pesado e água em tubulações), com aplicações comuns na indústria do petróleo (produção e transporte de petróleo).

Na produção e transporte do petróleo, misturas imiscíveis de óleo, água e gás são conduzidas através de dutos assumindo diversas configurações espaciais ou padrões de escoamento. Uma das grandes preocupações da indústria são as perdas de energia e os altos custos associados ao deslocamento dos fluidos, especialmente em condições de produção *offshore*. Diante de uma característica peculiar, induzindo um tipo de padrão de escoamento e garantindo a estabilidade do mesmo, é possível reduzir o consumo de energia e aumentar de forma significativa a produção, além de diminuir os custos de projeto e operacionais.

Reflexo da grande demanda de petróleo na atualidade, a indústria petroleira vem incentivando maciçamente pesquisas na área, dentre elas o desenvolvimento de estudos sobre escoamentos bifásicos líquido-líquido. Existem muitos estudos sobre escoamentos gás-líquido; em contrapartida são escassos aqueles devotados aos escoamentos líquido-líquido. Mais especificamente, dentre os vários padrões de escoamento líquido-líquido, o foco deste trabalho é compreender a fenomenologia do escoamento estratificado ondulado óleo-água.

O escoamento estratificado óleo-água, onde a fase oleosa escoar na parte superior do tubo e a fase aquosa na parte inferior, é bastante comum na indústria do petróleo, especialmente em poços direcionais *offshore*, oleodutos e gasodutos. Não raro, torna-se importante preservá-lo, tendo em vista que frequentemente misturas de água em óleo e óleo em água são de difícil separação no final da linha de transporte ou produção.

A estrutura ondulatória observada na interface do padrão de escoamento estratificado carece de estudo. Fração volumétrica *in situ* das fases e queda de pressão são variáveis globais importantes do escoamento bifásico que provavelmente dependem das características da onda interfacial. Portanto, o objetivo principal deste trabalho foi levantar as propriedades geométricas e cinemáticas da interface óleo-água e assim contribuir para a compreensão do papel da onda na dinâmica do escoamento estratificado. Nesse contexto, uma meta desta pesquisa foi levantar um banco de dados extensivo sobre o padrão de escoamento estratificado ondulado, o que possibilitou uma investigação dos fenômenos relacionados. Para diferentes pares de vazões e inclinações, foram coletados dados de fração volumétrica *in situ*, queda de pressão bifásica, propriedades geométricas (amplitude e comprimento de onda) e cinemáticas (celeridade) da onda.

No âmbito teórico, são propostas novas abordagens para o cálculo de algumas variáveis que compõem a equação baseada no modelo de dois fluidos unidimensional capaz de prever a fração volumétrica *in situ* e queda de pressão do escoamento estratificado. Além disso, um estudo baseado na equação da onda de perturbação interfacial do escoamento estratificado ou simplesmente equação da onda também foi desenvolvido.

Para o êxito deste trabalho, algumas metas foram propostas:

1. Realizar um estudo experimental sobre o escoamento estratificado ondulado óleo-água em dutos inclinados a partir da horizontal.
 - Identificar o padrão estratificado ondulado em cartas de fluxo tanto na ascendente quanto na descendente a partir da horizontal.
 - Medir a fração volumétrica *in situ* das fases a partir da técnica das válvulas de fechamento rápido.
 - Medir a queda de pressão do escoamento bifásico óleo-água.

- Coletar os dados de comprimentos, amplitudes e celeridades da estrutura ondulatória interfacial através da análise de filmes obtidos através de filmadora de alta definição e alta taxa de aquisição.
- Tratar os dados obtidos com o auxílio de software em plataforma Labview®.

2. Desenvolver um modelo matemático para o escoamento estratificado ondulado óleo-água.

O trabalho foi organizado nos seguintes capítulos:

Capítulo 2: revisão bibliográfica dos trabalhos relacionados ao escoamento bifásico líquido-líquido, com ênfase no estratificado ondulado óleo-água e incluindo: ocorrência, caracterização e modelagem.

Capítulo3: descrição do trabalho experimental, circuito experimental, equipamentos, calibração e rotina para obtenção e tratamento dos dados.

Capítulo 4: modelagem fenomenológica.

Capítulo 5: apresentação e discussão dos resultados obtidos experimentalmente e comparações com os modelos propostos.

Capítulo 6: conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPITULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo apresentamos o estado da arte dos assuntos abordados no presente trabalho de pesquisa. Os tópicos visam mostrar ao leitor os estudos relacionados ao escoamento bifásico, principalmente o escoamento líquido-líquido estratificado óleo-água. Precedente à revisão da literatura, alguns dos termos básicos do escoamento bifásico devem ser definidos.

2.1 Considerações iniciais

Considerando um escoamento óleo-água, por exemplo, escoando simultaneamente em uma tubulação com área de seção transversal A . As vazões volumétricas de injeção do óleo e da água são Q_o e Q_w , respectivamente. As frações volumétricas de injeção do óleo e da água são respectivamente:

$$C_o = \frac{Q_o}{Q_o + Q_w}, C_w = \frac{Q_w}{Q_o + Q_w} \quad 2.1$$

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, respectivamente, como:

$$U_{os} = \frac{Q_o}{A}, U_{ws} = \frac{Q_w}{A} \quad 2.2$$

Combinando-se as Equações 2.1 e 2.2, é obtida a relação entre as velocidades superficiais e as frações volumétricas de injeção:

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

Substituindo a Equação 2.2 em 2.1, tem-se:

$$C_o = \frac{U_{os}}{U_{os} + U_{ws}}, C_w = \frac{U_{ws}}{U_{os} + U_{ws}} \quad 2.4$$

Em escoamento bifásico, 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:

$$V_o = \frac{Q_o}{A_o}, V_w = \frac{Q_w}{A_w} \quad 2.5$$

Das Equações 2.2 e 2.5 segue-se que a velocidade *in situ* sempre excede a velocidade superficial para cada fase.

O *holdup* ou fração volumétrica *in situ* da fase, ε (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:

$$\varepsilon_o = \frac{A_o}{A} \frac{\delta L}{\delta L} = \frac{A_o}{A}, \varepsilon_w = \frac{A_w}{A} \quad 2.6$$

Quando uma das fases é gasosa, sua fração volumétrica *in situ* é comumente chamada de fração de vazio. As velocidades superficiais de cada fase são relacionadas à fração volumétrica *in situ* da seguinte forma:

$$V_o = \frac{U_{os}}{\varepsilon_o}, V_w = \frac{U_{ws}}{\varepsilon_w} \quad 2.7$$

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

$$U_m = \frac{Q_o + Q_w}{A} \quad 2.8$$

A qual também é igual a soma das velocidades superficiais:

$$U_m = U_{os} + U_{ws} \quad 2.9$$

Quando dois fluidos escoam juntos em uma tubulação, a fração volumétrica *in situ* é geralmente diferente da fração volumétrica de injeção. Diferenças de densidades e/ou viscosidades causam uma importante característica dos escoamentos bifásicos: o escorregamento s .

Como descrito em Oliemans (1986), o *holdup ratio* 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:

$$s = \frac{\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_o}}{\frac{C_w}{C_o}} = \frac{V_o}{V_w} \quad 2.10$$

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

2.2 Uma breve abordagem ao escoamento gás-líquido

Os parâmetros mais importantes que governam um escoamento são: a geometria do tubo (ângulo de inclinação e diâmetro), condições operacionais (vazão, pressão e temperatura), assim como propriedades físicas do gás e líquido (densidade, viscosidade e tensão superficial) Meng *et al.* (2001).

Taitel e Dukler (1976) apresentaram modelos fenomenológicos para determinar a transição de padrões de escoamento em escoamentos gás-líquido horizontal. Partindo da análise do escoamento estratificado, geraram uma carta de fluxo para o escoamento gás-líquido. Tal artigo é base para diversos trabalhos que propõem novas teorias para previsão de fronteiras de transição. Os autores propuseram equações de fechamento, para a previsão de fração volumétrica *in situ* e queda de pressão do escoamento estratificado gás-líquido, baseadas numa geometria plana da interface que separa as fases.

Li *et al.* (1997) relataram dois padrões encontrados em escoamentos estratificados gás-líquido em dutos horizontais e inclinados: estratificado liso, para velocidades superficiais do gás relativamente baixas, e o estratificado ondulado, para velocidades superficiais do gás suficientemente altas. Os autores identificaram a transição do padrão liso para o padrão ondulado e notaram que no padrão de escoamento ondulado há uma grande influência das ondas na transferência de calor e instabilidade do sistema. Foi mostrada também a existência de sub-padrões dentro do estratificado ondulado: ondas bidimensionais e ondas de larga amplitude.

2.3 Padrões de escoamento líquido-líquido em tubulações horizontais e levemente inclinadas

São escassos os trabalhos publicados na literatura sobre o escoamento líquido-líquido em tubulações. Pouco foi feito com o objetivo de obter dados que sirvam para prever seguramente os padrões, as frações volumétricas *in situ* e as quedas de pressão num escoamento contendo água e óleo. É esperado que as forças de equilíbrio, às quais os fluidos estão expostos, se modifiquem ao inclinar uma tubulação contendo um escoamento óleo-água. A força da gravidade é decomposta em suas componentes (normal e paralela ao eixo da tubulação); a componente normal promove a segregação do fluido, semelhante para os casos de dutos horizontais, enquanto a componente axial

faz com que a fase mais densa desacelere ou acelere em relação à fase menos densa. Diferentes viscosidades e densidades dos fluidos, geometrias e material do tubo também podem alterar a configuração do escoamento. Vários questionamentos que envolvem o estudo do escoamento líquido-líquido ainda não foram esclarecidos (Rodriguez e Oliemans, 2006).

Podemos destacar o estudo experimental do escoamento óleo-água de Trallero *et al.* (1995), com óleo de viscosidade 29 mPa.s e densidade 884 kg/m³ em tubulação horizontal de 2" de diâmetro interno, onde foram identificados pelos autores os padrões de escoamento na Figura 2.1: escoamento estratificado (ST), estratificado com mistura na interface (ST&MI), dispersão de óleo em água e água (Do/w&w), dispersão de água em óleo e óleo em água (Do/w&Dw/o), emulsão de óleo em água (o/w) e emulsão de água em óleo(w/o), e coletados dados de razão entre fração volumétrica de injeção e fração volumétrica *in situ* de água (C_w / ε_w) e queda de pressão em 162 diâmetros de tubo de comprimento (Figura 2.2 (a) e (b)), respectivamente.

Um dos primeiros trabalhos experimentais onde foram observadas ondas interfaciais em escoamento óleo-água estratificado em tubulação inclinada foi o de Alkaya *et al.* (2000). Eles realizaram os testes num tubo de acrílico de 2" polegadas variando as inclinação a partir da horizontal em (+5°, +1°, +2°e +0,5). Dentre os padrões de escoamento líquido-líquido observados, puderam notar que o aparecimento de ondas interfaciais no padrão estratificado era decorrente do aumento da inclinação em relação a horizontal, principalmente no escoamento descendente.

Elseth (2001) estudou o escoamento óleo-água em uma tubulação horizontal de 56.3 mm de diâmetro interno e com óleo combustível de viscosidade 1.64 mPa.s. Os padrões observados pelo autor podem ser classificados em duas categorias: escoamento estratificado e escoamento disperso, sendo que para o escoamento estratificado foram observados os padrões: estratificado suave, estratificado ondulado, estratificado misturado com gotas de água no óleo, estratificado misturado com gotas de óleo na água e estratificado misturado com ambas as gotas de água no óleo e gotas de óleo na água. E para o escoamento disperso: dispersão contínua de óleo com camada densa de gotas de água, dispersão contínua de água com camada densa de gotas de óleo, dispersão contínua de óleo não homogênea, dispersão contínua de água não homogênea, dispersão

continua de óleo homogênea e dispersão contínua de água homogênea . A Figura 2.3 mostra os padrões de escoamentos observados por Elseth (2001).

Figura 2.1- Padrões de escoamento observados por Trallero (2005)

(a)

(b)

Figura 2.2- (a) Fração volumétrica *in situ* e (b) queda de pressão por Trallero (2005).

Figura 2.3- Padrões de escoamento óleo-água observados por Elseth (2001).

Angeli e Hewitt (2000), utilizando óleo (1,6 mPa s viscosidade e 801 kg / m³ densidade) e água, velocidades de mistura variando de 0,2 a 3,9 m/s e fração volumétrica de injeção de água de 6% até 86%, identificaram experimentalmente vários padrões de escoamento líquido-líquido, variando desde o estratificado até o completamente disperso. Os autores usaram dois métodos para a observação dos padrões: gravação de vídeo de alta velocidade e determinação da fração de fase local com uma sonda de impedância de alta frequência, enquanto que a fase contínua na dispersão dos fluxos foi reconhecida por uma sonda de condutividade. Também analisaram as distribuições das fases água e óleo em relação a dois diferentes materiais do tubo (acrílico e aço inoxidável). Em determinados intervalos de condições, a distribuição das fases diferiam drasticamente entre o tubo de aço inoxidável e de acrílico por causa da rugosidade.

Ullmann *et al.* (2003) fizeram um estudo experimental e teórico dos efeitos da inclinação no padrão estratificado laminar líquido-líquido. Os resultados experimentais mostraram que impondo uma ligeira inclinação a partir da horizontal as fases tendem à estratificação. Os modelos teóricos propostos pelos autores confirmam a constatação experimental de que existem dois tipos de padrão estratificado: estratificado liso e ondulado, dependendo das frações volumétricas das fases, velocidades superficiais e queda de pressão.

Lum e Angeli (2004), num escoamento bifásico água e óleo com inclinação de 5 graus positivos em um tubo de aço de 38-mm ID, notaram que a transição do padrão estratificado para o disperso foi afetada pelo aumento da injeção de óleo. Também verificaram que a queda de pressão por fricção foi menor no escoamento bifásico óleo-água do que no escoamento monofásico de óleo ou água.

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 kg/m³ e viscosidade 6 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 afetou significativamente o tamanho das gotículas em ambas as fases. Velocidades maiores da fase contínua resultaram em gotas menores.

Lum *et al.* (2006) analisaram experimentalmente os efeitos da inclinação nos padrões de escoamento no escoamento bifásico água-óleo em tubulação de aço de 38 mm de diâmetro interno, para 5 e 10 graus na ascendente e 5 graus na descendente. Um novo padrão foi destacado pelos autores, um tipo de pistonado com bolhas pouco alongadas de óleo (*oil plug flow*) para as inclinações de 5 e 10 graus na ascendente. Em 5 graus na descendente o padrão estratificado ondulado desapareceu. Os autores puderam notar que a velocidade da água em relação ao óleo na ascendente foi menor do que na descendente e o gradiente de pressão por fricção tanto na ascendente quanto na descendente foram menores que na horizontal.

Rodriguez e Oliemans (2006) fizeram um trabalho experimental sobre escoamento bifásico óleo-água em tubulação 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° , -2° , -1.5° , 0° , 1° , 2° e 5° . A caracterização do padrão de escoamento e identificação de seus limites foram concebidas via observação de filmes e comparadas com a carta de fluxo proposta por Trallero (2005). As medidas queda de pressão bifásica e frações volumétricas *in situ* foram verificadas através de dupla densimetria por raios-gama e os autores comparam os dados experimentais com o modelo de fases separadas e o modelo homogêneo. Dados precisos são apresentados em função das vazões e inclinações e para todos os padrões de escoamento observados. Na Fig. 2.4 e 2.5 (a) e (b) estão em destaque as cartas de fluxo que localizam os padrões de escoamento observados por aqueles autores para as inclinações -5° e 5° , dados de razão entre fração volumétrica de injeção e fração volumétrica *in situ* de água, para as inclinações 0° , 1° , 2° e 5° , e gradiente de pressão bifásico na horizontal, respectivamente.

Figura 2.4- Cartas de fluxo observada por Rodriguez *et al.* (2006), (a) 5 graus descendente e (b) 5 graus ascendente.

Figura 2.5- (a) Fração Volumétrica *in situ* da água e (b) queda de pressão observada por Rodriguez *et al.* (2006).

2.4 Estrutura ondulatória em escoamento estratificado

2.4.1 Interface do padrão estratificado ondulado

Quanto à estrutura interfacial 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 ar-água. Porém, para um escoamento estratificado líquido-líquido, onde além dos termos gravitacionais as tensões interfaciais exercem grande importância na configuração da interface, a configuração básica apresenta uma interface curvilínea na seção transversal. 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 do tubo, adesão na parede e gravidade. Brauner *et al.* (1998) propuseram um modelo baseado na geometria curva da interface para as equações de fechamento do modelo de dois fluidos unidimensional para prever a fração volumétrica *in situ* e queda de pressão no padrão estratificado. Esse estudo mostrou que, na prática, a interface possui uma forma curva.

As Figuras 2.6 (a) e (b) representam o escoamento estratificado óleo-água com geometria interfacial plana e curva, respectivamente.

Figura 2.6- Escoamento estratificado líquido-líquido com interface plana e curva.

Raj *et al.* (2005) comprovaram experimentalmente que em escoamento estratificado líquido-líquido a proposta de interface curva de Brauner *et al.* (1998), aplicada as equações que predizem os dados de fração volumétrica *in situ*, dão uma melhor aproximação do que a de Taitel e Dukler (1976), que propuseram interface plana. Os autores chegaram à conclusão que o modelo de Taitel e Dukler (1976) seria adequado apenas para escoamentos gás-líquido.

Kang e Kim (1992) desenvolveram uma ferramenta capaz de descrever a tensão cisalhante interfacial e as propriedades das ondas no escoamento estratificado ondulado. Além disso, foi medida a velocidade de ondas em um ponto fixo e foi verificado que ela não está relacionada com a espessura da camada de líquido. Tal experimento foi realizado em dutos com as inclinações de (4.1°) e verticais (87°) , em escoamento estratificado ar-água.

Wang *et al.* (2004) analisaram 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.). Comprovaram que 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. Os autores realizaram seus experimentos tanto em gravidade

normal quanto em micro gravidade, concluindo que: a amplitude da onda e a rugosidade interfacial em micro-gravidade são inferiores a metade dos valores correspondentes em gravidade normal e a rugosidade interfacial relativa em gravidade normal é geralmente maior que a rugosidade da parede.

Dyment e Boudlal (2004) obtiveram soluções analíticas para escoamento em tubos com inclinação negativa. Uma teoria é proposta para a transição de escoamento estratificado com ondas 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 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 relatado.

Foram realizados por Berthelsen e 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 diferenças finitas, com refinamento de malha na interface e parede.

2.4.2 Geometria da onda interfacial

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. 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.

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* (2004). Uma sonda capacitiva foi utilizada para a medição da topologia da onda interfacial, espessura local do filme e velocidade. Foi detectado que a amplitude da onda e não seu comprimento é fortemente afetada mudando o nível de gravidade. Na realidade, a amplitude da onda em gravidade normal é duas vezes maior que em 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 espessura da subcamada viscosa.

Segundo Al-Wahaibi e Angeli (2006a), durante um escoamento óleo-água 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, baseados na análise invíscida de Kelvin- Helmholtz, propuseram 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 a esta, fazendo com que a amplitude da onda aumentasse (Figura 2.7). 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 (equação de Laplace-Young).

Figura 2.7- Representação da topologia da interface descrita por Al-Wahaibi e Angeli (2006a).

Em Al-Wahaibi e Angeli (2006b), a formação ou separação de gotas devido a uma força de arrasto que origina o movimento relativo entre as fases torna o escoamento estratificado instável e propenso a um padrão de escoamento disperso. Considerando o balanço de forças em Al-Wahaibi e Angeli (2006a), os autores desenvolveram uma ferramenta capaz de prever a amplitude e o comprimento da onda crítica relacionada à transição de padrão de escoamento. Eles identificaram três regiões do escoamento estratificado ondulado: região de ondas estáveis, região de grande arrasto interfacial, onde a onda se deforma, e região de ondas instáveis. A figura 2.8 mostra a deformação da onda causada pela força de arrasto e pela tensão interfacial, descrita por Al-Wahaibi e Angeli (2006b).

Figura 2.8- Deformação da onda causada pela força de arrasto e pela tensão interfacial descrita por Al-Wahaibi e Angeli (2006b).

Mello (2007), baseado no trabalho de Al-Wahaibi e Angeli (2006a), investigou teoricamente a onda interfacial e utilizou para comparações um banco de dados levantado por terceiros. Entretanto, Mello (2007) utilizou a equação da energia bifásica unidimensional, a qual foi aplicada separadamente para ambas as fases ao longo de meio comprimento de onda, e a dissipação de energia foi modelada através do ajuste de fatores de atrito. Foram levantados nove (9) comprimentos de onda nas inclinações (-2), (-5), (5) e (2) graus para diferentes pares de vazão e foi notado de forma qualitativa que tais alterações podem influenciar na topologia da onda. Devido à limitação do banco de dados, não foi possível verificar as tendências previstas. Além disso, na modelagem o autor supôs uma onda senoidal, o que não condiz com as observações realizadas pelo próprio autor que indicaram uma onda do tipo “águas rasas” ou aquelas de arrebenção.

2.4.3 Instabilidade hidrodinâmica no escoamento estratificado ondulado

A transição do padrão de escoamento estratificado para outro tipo de padrão é comumente modelada através da teoria linear da estabilidade hidrodinâmica. Essa trata da análise de uma solução linear das equações que governam o escoamento estratificado visando determinar as condições em que a frequência define esta solução apresentada em termos complexos (Trallero, 1995, Brauner e Maron 1991, 1992a e 1992b e Rodriguez e Bannwart, 2008). Na prática, 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.

Outra forma de modelar a transição baseia-se na identificação da natureza das ondas interfaciais, cinemática ou dinâmica, e da relação de ambas com a dinâmica do escoamento (Wallis, 1969, e Crowley *et al.*, 1992). Na literatura existem poucos trabalhos relacionados ao segundo enfoque. Nesse caso, é relevante que se caracterizem as ondas cinemática e dinâmica. Tendo em vista um escoamento em regime permanente, em equilíbrio de forças, as ondas interfaciais que podem ser descritas por meio de balanço de massa são chamadas cinemáticas; já no caso das ondas dinâmicas, os termos inerciais são relevantes, *i.e.*; o escoamento é transitório ou instável, como na transição de padrão de escoamento. A relação entre as ondas pode ter um papel primordial na estabilidade do escoamento (Wallis, 1969).

Brauner e Maron (1992) propõem uma terceira via para a previsão da transição do padrão de escoamento estratificado líquido-líquido. Foram propostos dois critérios de transição, (ZNC) *zero-neutral-stability* e (ZRC) *zero-real-characteristics*, baseados, respectivamente, na análise de estabilidade linear e numa análise algébrica do sistema de equações hiperbólicas do modelo de dois fluidos para escoamento estratificado. Mostrou-se que há também sub-padrões, como no padrão estratificado com dispersão na interface.

As três abordagens descritas acima levam ao mesmo resultado quando se considera um número de onda que tende o zero.

CAPITULO 3 - TRABALHO EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se o trabalho experimental realizado no Laboratório de Engenharia Térmica e Fluídos (NETeF) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, (EESC-USP). É descrito o circuito experimental, assim como os equipamentos, instalações e softwares utilizados para a aquisição de sinais. Além da calibração da instrumentação, levantamento das propriedades físicas e geométricas dos fluidos e o método de tratamento dos dados das ondas interfaciais.

O circuito multifásico do NETeF dispõe em suas instalações de uma tubulação horizontal em vidro borossilicato de sódio de 12 metros de comprimento e 26 mm de diâmetro, projetada para gerar diversos tipos de padrão de escoamento do tipo gás-líquido, líquido-líquido ou gás-líquido-líquido, contendo água, ar e óleo. Os componentes básicos utilizados do circuito são:

- Compressor;
- Separador de água e óleo com capacidade de 2200 litros;
- Bombas de óleo e água;
- Transdutores de pressão diferencial;
- Medidores de Vazão de óleo e água;
- Válvulas solenóides para corte e desvio rápido de fluxo;
- Linha auxiliar de *by pass*;
- Dispositivos de segurança para calibração e controle dos instrumentos de medida (válvulas, sensores, etc.);

A Figura 3.1 apresenta o esquema do circuito experimental e a Figura 3.2 a fotografia da instalação do NETeF utilizada neste trabalho.

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 líquido-líquido
Medidor do tipo vortex		Medidor de engrenagem

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)

Figura 3.1- Esquema do circuito experimental.

Figura 3.2 - Fotografia do circuito experimental.

Maiores detalhes das instalações podem ser vistas no Apêndice A.

3.1 Instrumentação e Aquisição de Sinais

3.1.1 Transdutores de pressão

Os sinais da variação de pressão instantânea foram coletados por um transdutor diferencial de pressão da Validyne, modelo DP-15 (Fig. 3.3). Utilizou-se o diafragma 34 com alcance de escala de 22 KPa e incerteza de 0,5% do fundo de escala. A taxa de aquisição utilizada foi de 5kHz e os dados foram processados e analisados em um programa implementado em LabView®. A calibração do transdutor (Figura 3.4) foi feita a partir de uma coluna de mercúrio e as tomadas de pressão distaram 7,5 metros uma da outra.

Figura 3.3- Transdutor de pressão diferencial da Validyne.

Figura 3.4- Curva de calibração do transdutor de pressão diferencial.

3.1.2 Medição do ângulo de inclinação da linha de testes

Para as inclinações propostas na pesquisa, utilizou-se um inclinômetro digital da marca Bosh modelo DNM 60L. A Figura 3.5 mostra o instrumento.

Figura 3.5- Inclinômetro digital.

3.1.3 Estação de controle remoto

Todos os dados coletados durante os testes chegaram 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 a instrumentação. Os atuadores que controlam as vazões de água, ar e óleo são acionados via sistema CAN de baixa frequência. Na figura 3.6 temos a estação de trabalho remoto composta por um microcomputador e a placa de aquisição, PXI da *National Instruments®*.

Figura 3.6- Estação de trabalho remoto.

3.1.4 Aquisição de sinais

Um programa de aquisição de sinais foi implementado em plataforma Labview® e foi utilizado para a aquisição automática dos valores mensurados pelos medidores de vazão, pressão e temperatura (Vide Figura 3.1). O painel frontal é mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7- Painel frontal do programa de aquisição de sinais.

3.2 Medição da fração volumétrica *in situ* de óleo através da técnica das válvulas de fechamento rápido

Frações volumétricas *in situ* da água e do óleo foram medidas através da técnica das válvulas de fechamento rápido. Um sistema de *by pass* instalado na linha viabilizou a aplicação da técnica. Em um escoamento indo da direita para a esquerda na seção de teste observada na Figura 3.1, as válvulas solenóides V1 e V2 encontram-se abertas permitindo a passagem livre de fluido pela seção de teste.

A válvula na linha auxiliar de *by pass* V3 deve estar totalmente fechada, impedindo o desvio do fluido. Para isso, V3 deve ser mantida energizada, juntamente com V2 que é normalmente fechada. Energizando V1 e desenergizando V2 e V3 simultaneamente, fechamos a linha de teste e abrimos passagem para o *by pass*, fazendo com que todo o escoamento se desloque pela válvula V3. Deste modo é realizado o aprisionamento dos fluidos na linha de teste para posterior esgotamento e medição da fração volumétrica; as válvulas se fecham em 0,1 segundo.

A medição da fração volumétrica *in situ* das fases seguiu a seguinte rotina: estabelecidas as vazões de água e óleo requeridas e após um breve transiente até a estabilização do padrão, as válvulas de fechamento rápido V1 e V2 foram fechadas e o escoamento aprisionado. Logo em seguida, esgotava-se a linha com um tempo de esgotamento de aproximadamente 20 minutos em todos os testes.

No entanto, um pequeno volume de óleo ainda permanecia aderido na parede do tubo; tal erro foi suprimido supondo que, após o período de esgotamento, a diferença entre o volume total da linha (6400 ml) e o volume medido das fases foi devida ao óleo não esgotado. Os volumes de água e de óleo foram medidos por 4 provetas de 2000 ml cada uma; para cada medida esperava-se um período de 40 minutos até a decantação ocorrer de fato. Para cada ponto coletados foram realizadas 3 replicatas e a incerteza experimental associada está no Apêndice C.

3.3 Propriedades físicas do óleo

Os fluídos utilizados nos experimentos foram água de torneira e óleo mineral. Para a água, foi medida via balança de precisão e pipeta a densidade de 988 kg/m^3 e adotada a viscosidade de 1 mPa.s . As propriedades físicas do óleo receberam maior atenção.

3.3.1 Densidade do óleo

A densidade foi medida com a utilização de pipeta de 5mL e balança de precisão, com $0,0005\text{g}$ de precisão. Foram feitas 5 medidas para cada amostra, sendo que os valores médios obtidos estão descritos na Tabela 3.1. Utilizando o modelo homogêneo para previsão da densidade de mistura em função da fração volumétrica das fases:

$$\rho_m = (1 - \varepsilon_o)\rho_a + \varepsilon_o\rho_o \quad 3.1$$

obtemos uma fração volumétrica de água dispersa no óleo de 3%.

Amostra	Experimento	Massa (g)	Volume (ml)	Densidade (g/ml)
Óleo limpo	001	4,127	5	0,8254
Óleo limpo	002	4,125	5	0,825
Óleo limpo	003	4,119	5	0,8238
Óleo limpo	004	4,116	5	0,8232
Óleo limpo	005	4,121	5	0,8242
Densidade média				0,82432
Óleo usado	001	4,157	5	0,8314
Óleo usado	002	4,11	5	0,822
Óleo usado	003	4,144	5	0,8288
Óleo usado	004	4,141	5	0,8282
Óleo usado	005	4,15	5	0,83
Densidade média				0,82808
Diferença (%)				0,4540

Tabela 3.1- Testes de densidade do óleo.

3.3.2 Viscosidade dinâmica do óleo

A viscosidade dinâmica do óleo foi medida utilizando um Reômetro da marca Brookfield, modelo LVDV-III+ com rotor SC4-18 (Figura 3.8). O aparelho é formado por dois cilindros concêntricos, sendo um deles girantes. A partir de determinada rotação, o torque necessário é medido e assim, a viscosidade.

Figura 3.8- Reômetro - LVDV-III+.

A viscosidade foi medida em função da temperatura do óleo (10°C - 50°C). A temperatura foi variada com a utilização de banho termostático acoplado ao Reômetro. A Figura 3.9 apresenta a variação da viscosidade do óleo limpo padrão (Shell Vitrea 100), o qual não foi utilizado nos testes experimentais, com sua respectiva linha de tendência.

Figura 3.9- Viscosidade do Óleo Padrão (Shell Vitrea 100 não utilizado em testes) em função da Temperatura.

A Figura 3.10 apresenta a variação da viscosidade com a temperatura do óleo usado no testes (Shell Vitrea 100 com 3% de água), e a linha pontilhada representa a função exponencial que ajusta os dados.

Figura 3.10- Viscosidade do Óleo Usado (Shell Vitrea 100 utilizado em testes) em função da Temperatura.

A Figura 3.11 apresenta os dados obtidos para viscosidade, percebe-se que até o momento, não houve variação significativa no valor da viscosidade dinâmica do óleo devido à presença de água.

Figura 3.11- Viscosidade do Óleo Usado e Óleo Limpo em função da Temperatura.

Como comparação, foi utilizada a equação proposta por Wallis (1969), equação para viscosidade de emulsão com baixa fração volumétrica. Sendo:

$$\mu_m = (1 + \varepsilon_o)\mu_w \quad 3.2$$

A Tabela 3.2 mostra os valores médios da viscosidade e sendo a diferença descrita como sendo o erro relativo em (%) entre o óleo usado e o óleo limpo.

Temperatura (°C)	óleo limpo (cP)	óleo usado (cP)	Eq. # (cP)	Diferença
10	673,249	644,461	723,7427	4,275981
15	451,844	450,169	485,7323	0,370703
20	304,563	309,708	327,4052	-1,68931
25	220,277	214,622	236,7978	2,567222
30	155,102	159,521	166,7347	-2,84909
35	116,257	122,341	124,9763	-5,23323
40	90,336	94,514	97,1112	-4,62496
50	55,544	60,160	59,7098	-8,31053
Diferença				-1,9366

Tabela 3.2- Valores médios de viscosidade.

3.3.3 Tensão interfacial Óleo-água

A tensão interfacial Óleo-Água foi medida utilizando um tensiômetro óptico (marca KSV, modelo CAM 200, Figura 3.12, abaixo), que consiste de um sistema formado por uma câmara onde se coloca um dos fluidos e uma gota do outro fluido é gerada através de uma seringa e agulha. A gota é filmada e a imagem é repassada a um programa de computador que mede as dimensões e pelo modelo de Young-Laplace determina-se a tensão interfacial.

Figura 3.12- Medidor de tensão interfacial e ângulo de contato, modelo CAM 200, marca KSV.

A Figura 3.13 abaixo apresenta os valores médios de tensão interfacial, obtidos entre 10°C e 40°C. A curva representa uma função exponencial que ajusta os valores. Foram feitas cerca de quatro medidas de tensão interfacial em cada temperatura, sendo que cada medida corresponde a uma média de 5 fotos tiradas pelo computador.

Figura 3.13- Tensão Interfacial do Óleo Usado em função da Temperatura.

3.3.4 Ângulo de contato

O ângulo de contato foi medido utilizando o mesmo aparelho das medidas de tensão interfacial. Foram feitos 15 experimentos (Tabela 3.3), sendo que o valor médio do ângulo de contato foi 151,24°. O ângulo de contato óleo-parede é o suplementar do medido, portanto aproximadamente 30°. Foi utilizando uma caixa de vidro com a água do processo, uma placa de vidro (borosilicato), mesmo da tubulação, e o óleo usado nos testes. A Figura 3.14 mostra uma foto da gota aderida à placa de vidro borosilicato.

Figura 3.14 - Gota aderida à superfície do vidro de borosilicato.

Teste	Ângulo de contato esquerdo [AC(L)]	Ângulo de contato direito [AC(R)]	Ângulo de contato [Médio]
1	114,414	154,425	134,420
2	162,685	165,983	164,334
3	148,685	149,720	149,202
4	153,562	166,126	159,844
5	147,173	160,761	153,967
6	135,140	141,643	138,391
7	148,320	159,097	153,708
8	147,982	167,619	157,800
9	143,623	165,897	154,760
10	144,772	168,335	156,554
11	137,643	158,919	148,281
12	143,849	160,056	151,952
13	150,799	155,712	153,255
14	143,768	145,491	144,629
15	143,287	151,744	147,515
Média	144,380	158,102	151,241

Tabela 3.3- Valores medidos de ângulo de contato.

3.4 Organização do trabalho experimental

O principal objetivo desta pesquisa é o estudo da fenomenologia da onda interfacial no escoamento estratificado ondulado óleo-água inclinado; portanto, a malha de pontos situa-se na região do padrão estratificado ondulado. A fim de verificar a região de interesse, foram levantadas experimentalmente cartas de fluxo de forma subjetiva, por visualização, para inclinações a partir da horizontal em $(-20^\circ, -10^\circ, 10^\circ$ e $20^\circ)$. Na Figura 3.15 os pontos representados por SW* foram os escolhidos para a análise das propriedades da onda, fração volumétrica e queda de pressão.

Figura 3.15- Cartas de fluxo das velocidades superficiais de água e óleo nas inclinações (a) horizontal, (b) 10° descendente, (c) 20° descendente, (d) 10° ascendente e (e) 20° ascendente; sendo: ST-estratificado liso, SW- estratificado ondulado, Do/w&w- Dispersão de óleo em água e água, Do/w&Dw/o- Dispersão de óleo em água e dispersão de água em óleo; SW* indica os pontos analisados neste trabalho.

3.5 Aparato experimental para aquisição dos dados da onda

A medição das propriedades geométricas e celeridade da onda interfacial foram feitas com o auxílio de uma câmera de alta definição e velocidade (100.000 imagens/segundo) modelo Optronis Camrecord-600. A câmera foi instalada em um suporte projetado para ficar fixo na estrutura da “gangorra”, mantendo assim sempre a mesma posição indiferente da angulação. Para a iluminação foram utilizadas duas lâmpadas xênonio posicionadas atrás da seção de visualização. Dessa maneira, poderíamos, com o uso delas, reduzir a interferência do óleo que se adere à tubulação e obter maior detalhe do escoamento. Para diminuir o efeito de refração, um caixa de vidro com água foi colocado em volta do tubo. A Figura 3.16 mostra o aparato experimental.

Figura 3.16- Aparato experimental para aquisição dos dados da onda.

3.6 Tratamento da Imagem

Para a obtenção dos dados através das imagens dos filmes foi desenvolvido um software em plataforma Labview® capaz de identificar a onda correspondente a interface água-óleo e predizer sua amplitude, comprimento e celeridade.

3.6.1 Localização da imagem

As imagens obtidas pela câmera de alta velocidade são vetorizadas e a estrutura ondulatória contida em cada imagem é identificada através de técnica de contraste e gradiente de cores, sendo que a fração de água encontra-se abaixo dessa estrutura, enquanto a de óleo encontra-se acima dessa. A Figura 3.17 mostra a imagem original.

Figura 3.17- Imagem obtida pela câmera.

3.6.2 Binarização da imagem

O primeiro passo utilizado na localização da onda é a segmentação da imagem, através da binarização. Na binarização cada pixel da imagem é comparado a um valor denominado limiar. Se o brilho do pixel for superior ao limiar é atribuído a ele um valor, se for inferior outro valor é atribuído. Como a imagem encontra-se em *gray-scale*, escolhemos uma tonalidade de preto e vermelho afim de que o contraste seja suficiente para não perdermos detalhes da onda. Com base nesse critério, todo pixel que apresenta um brilho superior ao limiar é considerado vermelho e todo pixel que apresenta um brilho inferior é considerado preto; a região preta é onde se encontra o óleo e a vermelha a água. A Figura 3.18 mostra a imagem da Figura 3.17 binarizada.

Figura 3.18- Imagem binarizada.

3.6.3 Eliminação de bolhas e ruídos através de morfologia

Morfologia é uma operação muito utilizada no processamento de imagens. Ela utiliza a teoria de conjuntos para extrair informações da imagem. Para ela, a imagem binária é composta por objetos e um plano de fundo. Objetos são pontos com valor 1, enquanto que pontos com valor 0 compõe o plano de fundo.

Duas operações morfológicas em especial, *dilate* e *erode*, são utilizadas pelo programa desenvolvido. Ambas utilizam um conjunto de pontos denominado elemento estrutural, sendo este uma matriz binária onde os elementos com valor 1 definem a forma do elemento estrutural desejado.

Depois da realização de *dilate* e *erode* obtém-se o resultado desejado. Nela, constata-se a eliminação das pequenas partículas que podem influenciar na detecção da interface ondulada.

3.6.4 Localização e detecção da interface

O último passo para a localização no domínio espacial dos pontos da onda corresponde em localizar os pontos que pertencem a uma fronteira ou borda, ou seja, achar os pixels que apresentam um grande contraste com seus respectivos vizinhos. O conceito de detecção de borda utilizado se baseia no gradiente de uma função bidimensional. Sabe-se que o gradiente está relacionada com a variação do valor de uma variável em relação à outra. No caso de uma imagem, a variação do brilho em uma determinada direção.

A presença da fronteira é caracterizada por um valor do gradiente alto, pois há uma variação grande no brilho para um espaço pequeno. Portanto, para a localização dos pixels das bordas calcula-se o gradiente na direção vertical da figura e compara-se o valor obtido para o gradiente em cada pixel com um valor limiar, sendo que para valores maiores é atribuído o valor 1 e para valores menores o valor 0. Logo, a onda será formada pelo conjunto de pixels com valor 1. Como a imagem analisada é discreta tanto no espaço como no valor da intensidade luminosa, é necessário um método para o cálculo do gradiente. O método utilizado foi a operação de convolução com um filtro de gradiente.

A operação de convolução consiste em uma matriz quadrada, conhecida como *kernel* (Figura 3.19), que recalcula o valor de cada pixel da imagem como uma ponderação entre o valor dele e dos pixels de sua vizinhança, sendo o tamanho do *kernel* determinado pelo tamanho e os pesos da ponderação dos elementos dessa matriz. Um esquema dessa operação pode ser visto na Figura 3.20.

Figura 3.19 (1) Representa o *kernel* e (2) Parte da imagem.

Figura 3.20 Esquema da operação convolução.

Seja o seguinte *kernel*:

$$\begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ w_4 & w_5 & w_6 \\ w_7 & w_8 & w_9 \end{bmatrix} \quad 3.3$$

Sendo (i,j) as coordenadas do pixel analisado, através da convolução, para a operação *erode* o novo valor de $P_{(i,j)}$ do pixel central será:

$$P_{(i,j)} = \text{mínimo} \left[\sum_{j=0}^{m-1} P(i)w(i-j) \right] \quad 3.4$$

Através da convolução para a operação *dilate* o novo valor de $P_{(i,j)}$ do pixel central será:

$$P_{(i,j)} = \text{máximo} \left[\sum_{j=0}^{m-1} P(i)w(i-j) \right] \quad 3.5$$

A operação usada para binarizar a interface da onda foi a operação *Open*, que é constituída de um *dilate* (*erode* $P_{(i,j)}$). Essa operação do labview® faz com que a probabilidade de ocorrer imperfeições na interface seja pequena. Para uma varredura

vertical é encontrada a fronteira para a interface desejada. A altura da onda consiste numa varredura na vertical até achar a “troca de cor” ou contraste na interface. A Figura 3.21 mostra a interface da onda obtida pelo software.

Figura 3.21- Imagem da interface obtida pelo software.

3.6.5 Filtro de Fourier

Ondas de diferente natureza, formas e tamanhos podem coexistir e ao tentarmos calcular as propriedades médias surgem problemas devido às diferentes propriedades geométricas de cada uma dessas, ora pela interferência de ondas com comprimento muito menor, ora pela sobreposição de ondas de comprimento muito maior. Limitamos nossa análise à suposição de que ondas curtas, intermediárias ou longas possuem propriedades geométricas e cinemáticas suficientemente distintas, de tal forma que a sobreposição observada num determinado instante de tempo não se propaga para um determinado instante de tempo subsequente. Além disso, supomos que as ondas curtas se propagam sobre a onda longa ou intermediária, sem alterar significativamente a forma média dessa última.

Considere D como sendo o diâmetro interno da tubulação e λ o comprimento da onda. Definimos então os tipos de ondas:

- Ondas curtas: $D < \lambda$, a interface é fortemente ondulada e a declividade da onda indica iminência de quebra.
- Ondas intermediárias: $D < \lambda < 10D$, a interface é claramente ondulada, mas apresenta comportamento suave, longe da quebra.
- Ondas longas: $\lambda > 10D$, a interface é quase plana e a amplitude da onda é pequena em relação à altura da camada de água.

Utilizando-se o algoritmo da transformada de Fourier (FFT), obtêm-se o espectro das ondas, através do qual se estabelecem três frequências de corte: uma para baixas frequências (ondas longas), outra para médias frequências (ondas intermediárias) e outra para altas frequências (ondas curtas). As ondas longas não são analisadas por não serem visualizadas na seção de filmagem. As ondas curtas são consideradas ruído. Elas apresentam um comportamento aparentemente tridimensional e frequentemente não se propagam na direção axial em um determinado instante de tempo subsequente. Assim sendo, está pesquisa apenas analisou as ondas intermediárias. Na Figura 3.22 temos a interface filtrada.

Figura 3.22- Imagem das ondas filtradas.

3.7 Cálculo das propriedades da onda

3.7.1 Definição e cálculo das propriedades geométricas da onda

Depois do processo de binarização, detecção da interface e filtragem, a fim de definir a amplitude e o comprimento da onda, partimos da seguinte definição:

- Crista – O ponto em que $\frac{dy}{dx} = 0$ e que $\frac{du}{d(x+x')} < 0$
- Vale – O ponto em que $\frac{dy}{dx} = 0$ e que $\frac{du}{d(x+x')} > 0$,

Onde $u = y(x+x')$ e x' é real, positivo e tão pequeno quanto se queira. Em termos de programação, x' representa o próximo pixel em que o valor da ordenada torna-se diferente da ordenada da crista ou do vale.

- Amplitude – A diferença entre a ordenada de uma crista e a de um vale seguinte ou anterior.
- Comprimento – A diferença entre a abscissa de duas cristas ou de dois vales seguidos.

Para cada imagem analisada é realizado uma média das propriedades geométricas, da seguinte forma:

Divide-se a imagem em comprimentos de onda, conforme a Figura 3.23, onde n representa o número de comprimentos de ondas. Pela equação 3.6, tem-se o comprimento médio da onda de cada imagem ($\lambda_{m,f}$):

$$\lambda_{m,f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad 3.6$$

Finalmente, através de um conjunto de imagens, que compõe uma amostra de comprimentos de onda representativo da população num escoamento com as mesmas características (inclinação, vazão, etc.), tem-se o comprimento médio da onda λ_m (Eq. 3.7 em que f_r representa o número de imagens):

$$\lambda_m = \frac{1}{f_r} \sum_{i=1}^{f_r} \lambda_{m,i} \quad 3.7$$

Figura 3.23- Imagem dividida em n comprimentos de onda.

Para o cálculo da amplitude da onda, divide-se a imagem como mostrado na Figura 3.23; todavia, uma mesma onda pode ter vales com ordenadas diferentes. Pela Figura 3.24, nota-se que a amplitude da onda do lado direito (em amarelo) pode ser diferente do lado esquerdo (em vermelho). Divide-se as imagens em amplitudes de onda, sendo que cada onda possui um número de amplitudes (n') do lado direito e (n'') do lado esquerdo, e a partir da equação 3.8 tem-se as amplitudes médias das ondas em cada imagem:

$$\alpha'_{m,f} = \frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n'} \alpha'_i, \quad \alpha''_{m,f} = \frac{1}{n''} \sum_{i=1}^{n''} \alpha''_i \quad 3.8$$

Sendo $\alpha'_{m,f}$ e $\alpha''_{m,f}$ as amplitudes médias em uma imagem do lado direito e esquerdo, respectivamente. Através de um conjunto de imagens, que compõem uma amostra de amplitudes de onda, tem-se a amplitude média da onda $(\alpha_m)_d$ do lado direito e $(\alpha_m)_e$ esquerdo (Eq. 3.9 em que f representa o número de imagens):

$$(\alpha_m)_d = \frac{1}{f} \sum_{i=1}^f \alpha'_{m,i}, \quad (\alpha_m)_e = \frac{1}{f} \sum_{i=1}^f \alpha''_{m,i} \quad 3.9$$

A amplitude média da população analisada é então:

$$\alpha_m = \frac{(\alpha_m)_d + (\alpha_m)_e}{2} \quad 3.10$$

Figura 3.24- Amplitudes da onda.

3.7.2 Celeridade da onda

Para o cálculo da celeridade que é a velocidade com a qual a onda se desloca, utilizou-se correlação cruzada, ferramenta interna do Labview® que consiste no cálculo da correlação existente entre duas imagens consecutivas, *i.e.*, defasados em relação ao tempo. Basicamente, é uma análise estatística que mede o grau de relacionamento linear entre os valores emparelhados, ou seja, a correlação entre duas imagens (x e y) para uma defasagem d definida pela Equação 3.11, onde n é o numero de amostras:

$$k = \frac{n \cdot \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n \cdot (\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y)^2 - (\sum y)^2}} \quad 3.11$$

Assim, o coeficiente do método da correlação cruzada, que indica a semelhança entre imagens, é determinado defasando-se a imagem anterior no tempo em relação ao posterior. Este coeficiente é calculado para uma grande quantidade de defasagens com o propósito de obter o coeficiente de correlação máximo entre as imagens em análise. É possível representar graficamente o coeficiente de correlação cruzada, k , em função da defasagem das imagens, como mostra a figura 3.25. O coeficiente k varia de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor a correlação entre duas imagens.

Figura 3.25- Correlação cruzada.

A celeridade da interface é então definida por:

$$C_v = \frac{d}{k \cdot \Delta t} \quad 3.12$$

Sendo d a distancia de defasagem entre as duas imagens, k o valor máximo do coeficiente da correlação cruzada e Δt o tempo de defasagem entre as imagens.

3.7.3 Topologia média da onda

Mesmo com as ondas separadas em curtas, intermediárias e longas, ainda há certa dificuldade em definir um formato médio, já que as faixas de valores para as amplitudes e comprimentos de onda são relativamente grandes. Tais fatores demonstram a impossibilidade na determinação de um formato médio de onda através da simples análise visual das imagens das ondas. Propomos normalizar a coordenada x da onda pelo comprimento de onda (tornar as ondas normalizadas na abscissa) e a

coordenada y da onda pelo diâmetro interno do tubo (tornar as ondas adimensionais na ordenada). Este processo foi utilizado para a topologia da onda intermediária e está representada pela Figura 3.26.

Figura 3.26- Representação da normalização da onda intermediária.

Em cada imagem, a forma da interface é normalizada da seguinte maneira: divide-se a imagem em comprimentos de onda, conforme a Figura 3.26, e para cada onda definem-se vetores adimensionais de coordenadas x_i^* e y_i^* , sendo as equações:

$$x^* = \frac{(x_i - x_{i,min})}{(x_{i,máx} - x_{i,min})}, \quad y_i^* = \frac{y_i}{D} \quad 3.13$$

Onde D é o diâmetro interno do tubo. Portanto, todas as ondas passam a ter a coordenada adimensional x^* (abscissas) variando de 0 a 1. Em seguida, para todas as ondas adimensionais calculamos o valor médio da ordenada adimensional y^* para todo x^* , sendo n o número total de ondas:

$$y^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^* \Big|_{x^*} \quad 3.14$$

E finalmente, fazendo:

$$x_m = \lambda_m \cdot x^*, \quad y_m = D \cdot y^* \quad 3.15$$

obtem-se uma onda com propriedades geométricas médias, sendo λ_m comprimento médio da onda, calculado conforme Eq. 3.7.

3.8 Programa de aquisição das propriedades geométricas e cinemáticas da onda

Após a descrição do ferramental teórico desenvolvido para aquisição das propriedades geométricas e cinemáticas da onda, é apresentado nesta secção o funcionamento do programa. O software foi originalmente desenvolvido por Amaral (2006) e Moretti (2009) e estendido neste trabalho (o código do programa pode ser visto no Apêndice D). O programa foi dividido em três etapas (Figura 3.27).

Figura 3.27- Fluxograma das etapas descritas pelo programa.

3.8.1 Binarização da imagem

Figura 3.28- Painel frontal da binarização da imagem.

O programa segue a sequência descrita pela Figura 3.28:

- ⇒ 1. Seleciona a pasta com as imagens das imagens e salva os arquivos em .txt dos dados de binarização e interface.
- ⇒ 2. Definição dos limites da imagem. (Maiores detalhes Vide Tópico 3.9)
- ⇒ 3. Fator de decimação. Tem a função de analisar as imagens em intervalos, este fator foi usado para obter os dados de amplitude e comprimento de onda. (Maiores detalhes vide Tópico 3.10)
- ⇒ 4. Imagem Original selecionada pelo item 1.
- ⇒ 5. O Roi é a delimitação descrita pelo item 2. Deve-se apenas delimitar a região da imagem onde se tem o escoamento.
- ⇒ 6. Imagem Binarizada.(Maiores detalhes vide 3.6.2)
- ⇒ 7. Gráfico da interface da onda. (Maiores detalhes vide 3.6.4)
- ⇒ 8. Aparas. Regiões onde a imagem tem algumas imperfeições podem ser aparadas.
- ⇒ 9. Quadro com o número total de imagens analisados.

3.8.2 Filtragem e normalização

Figura 3.29 -Painel frontal da Filtragem e (Adimensionalização e Normalização).

O programa segue alguns parâmetros descritos pela Figura 3.29:

- ⇒ 10. Seleciona a pasta com as imagens e salva os arquivos em .txt dos dados da onda filtrada e a Adimensinalização e Normalização descrita em 3.7.3. para os três tipos de ondas.
- ⇒ 11. Diâmetro interno do tubo.
- ⇒ 12. Filtro de Fourier. (Maiores detalhes vide 3.6.5)
- ⇒ 13. Gráficos das ondas filtradas.
- ⇒ 14. Quadro com o número total de imagens analisadas.

3.8.3 Cálculo da amplitude e comprimento médio da onda

Figura 3.30 -Painel frontal do cálculo da amplitude e comprimento da onda.

O programa segue alguns parâmetros descritos pela Figura 3.30:

- ⇒ 15. Seleciona a pasta com as imagens e salva os arquivos em .txt dos Pdf, ondas curtas, médias e longas ,da amplitude e comprimento médio.
- ⇒ 16. Escolhe-se o número de barras para gerar os Pdf.
- ⇒ 17. Pdf , ondas curtas, médias e longas, dos comprimentos médios da onda com o desvio padrão.

⇒ 18. Pdf , ondas curtas, médias e longas ,das amplitudes médias da onda e desvio padrão.

3.8.4 Cálculo da Celeridade da onda

Figura 3.31- Paineil frontal do cálculo da celeridade da onda.

O programa segue alguns parâmetros descritos pela Figura 3.31:

- ⇒ 19. Seleciona a pasta com as imagens e salva os arquivos em .txt da pdf , ondas curtas, médias e longas ,da celeridade da onda .
- ⇒ 20. Número de imagens/segundo. Maiores detalhes vide Tópico 3.10 Determinação da taxa de amostragem das imagens.
- ⇒ 21. Correlação Cruzada. (Vide 3.7.2).
- ⇒ 22. Celeridade. (Vide Equação 3.12).
- ⇒ 23. Escolhe-se o número de barras para gerar os pdf.
- ⇒ 24. PDF, ondas curtas, médias e longas, da Celeridade da onda e desvio padrão.

3.9 Calibração da Imagem

Para minimizar o efeito de distorção da luz (efeito de lente e paralaxe), a tubulação de vidro foi imersa em água dentro de uma caixa de vidro, como mostrado na Figura 3.16. Um procedimento padrão foi delimitar na parede da caixa de vidro a região a ser filmada; todavia, o plano de filmagem do escoamento, dada a posição perpendicular da câmera em relação ao mesmo, se encontra aproximadamente no plano central do tubo. Portanto, para saber quais são as dimensões reais da imagem alguns procedimentos foram seguidos:

- Posicionou-se régua no centro da tubulação tanto na horizontal quanto na vertical.
- Encheu a tubulação de água.
- Dispôs-se a iluminação até poder ter uma imagem tanto das medidas delimitadas na parede da caixa de vidro quanto as do centro do tubo.
- Gravou-se a imagem das régua.

Na Figura 3.32 temos a imagem das régua de calibração. As dimensões reais (dentro do tubo) de comprimento e largura das imagens foram inseridas no programa descritos no Tópico 3.8.1, parâmetro 2. A conversão de mm para pixels é feita pelo programa.

Figura 3.32- Régua de calibração da Imagem.

3.10 Determinação da taxa de amostragem das imagens

Utilizamos uma taxa de aquisição de 60 imagens/segundo, o que foi considerado suficiente levando em conta que uma velocidade de propagação de onda da ordem de 0,1 m/s e comprimento de onda da ordem do diâmetro, estes estimados a olho nu. Para estimar o tempo necessário de filmagem consideramos as limitações do sistema operacional, sem que, naturalmente, isso interferisse na obtenção de uma amostragem

representativa da população. Dessa maneira, escolhemos 60 segundos de filmagem para cada par de vazões de água e óleo, logo adquirimos uma amostra composta de 3600 imagens (aproximadamente 10.000 ondas para cada par de vazões).

As amostras utilizadas pelo software para as propriedades geométricas e celeridade da onda foram diferentes. No caso das propriedades geométricas, o intuito foi coletar o maior número de ondas estatisticamente independentes. Já no caso da celeridade, o maior número de imagens.

A consideração de que uma onda demora algum tempo para atravessar a seção de filmagem, o fator de decimação descrito no Tópico 3.8.1, foi usada para evitar que a mesma fosse contabilizada várias vezes. Por exemplo, se uma onda contida numa imagem demora 1 segundo para atravessar a seção de visualização, a uma taxa de aquisição de 60 imagens/segundo as 60 imagens subseqüentes ainda conterão a mesma onda. Diante dessa condição, variamos o fator de decimação para diferentes pares de vazões até que os valores das médias das propriedades geométricas se mantivessem quase inalterados. Isso serviu para otimizar o tempo de processamento. Foi escolhido para a análise dos dados um fator de decimação igual a 30; ou seja, dos 3600 imagens foram selecionados apenas 120. Em média, em cada imagem selecionada temos aproximadamente 3 ondas. Portanto, a amostra foi de aproximadamente 360 ondas para cada par de vazões, a qual, supomos, é representativa da população.

Por outro lado, para a celeridade da onda sempre é analisado uma imagem e a posterior. Consequentemente, se for utilizado o fator de decimação a correlação falha. Todavia, por razões de tempo de processamento, diminuimos a amostra de 3600 para 1000 imagens, sendo que os valores da celeridade não sofreram grandes alterações.

3.11 Análise estatística dos dados

O uso de métodos estatísticos foi necessário para validar o trabalho experimental e verificar a representatividade das amostras coletadas. Gráficos foram gerados pelo próprio programa LabView® e representam a função densidade de probabilidade (PDF) das propriedades geométricas e cinemáticas da onda.

Visto que o comportamento estatístico é análogo para todos os dados coletados, somente um ponto de comprimento, amplitude e celeridade adquirido será apresentado. Apenas as ondas intermediárias foram consideradas nessa análise.

Na Figuras 3.33 estão representados os dados de comprimento (mm), amplitude (mm) e celeridade (m/s) para a horizontal, dadas as velocidades superficiais da água $U_{ws}=0.15$ m/s e de óleo $U_{os}=0.1$ m/s.

Figura 3.33- PDF: Comprimento, amplitude e celeridade para inclinação 0° .

Na figura 3.33, a curva é uma distribuição normal teórica, sendo esta importante para validar estatisticamente o experimento. Como já descrito no tópico anterior, para analisar as propriedades geométricas da onda foram coletada aproximadamente 360 ondas para cada par de vazões. Nota-se que os valores experimentais das PDF's dos dados de comprimento e amplitude aproximam-se da curva teórica, o que indica que a distribuição dos dados aproxima-se de uma distribuição normal. Sendo assim, a amostra seria representativa da população. Para o caso da celeridade, os 1000 imagens analisados também revelam a mesma tendência descrita para as propriedades geométricas da onda. As PDFs de todos os dados foram analisadas, apresentando resultados semelhantes àqueles vistos na Fig. 3.33.

CAPITULO 4 - MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo é apresentada a modelagem do escoamento estratificado, baseada no modelo de dois fluidos unidimensional, para cálculo da fração volumétrica *in situ* e gradiente de pressão bifásico. Além disso, é conduzida uma análise sobre a natureza física da onda interfacial, a qual foi fundamentada na equação da onda interfacial para escoamento estratificado óleo-água.

4.1 Modelagem para o cálculo da fração volumétrica *in situ* e gradiente de pressão bifásico (Fases separadas)

Antes do início da modelagem, algumas hipóteses devem ser consideradas.

- Escoamento isotérmico;
- Não há mudança de fases;
- Não há transferência de massa;
- Fluidos incompressíveis;
- Regime permanente;

Temos as equações unidimensionais da quantidade de movimento para escoamento estratificado aplicadas às fases óleo e água, respectivamente (Wallis, 1969):

$$A_o \left(-\frac{dp}{dz} \right) - \tau_o S_o \pm \tau_i S_i - \rho_o A_o g \sin(\theta) = 0 \quad 4.1$$

$$A_w \left(-\frac{dp}{dz} \right) - \tau_w S_w \mp \tau_i S_i - \rho_w A_w g \sin(\theta) = 0 \quad 4.2$$

Supõe-se que o gradiente de pressão seja constante e o mesmo para ambas as fases e que o módulo da tensão cisalhante interfacial seja o mesmo para ambas as fases, por uma questão de equilíbrio dinâmico. Onde p é a pressão, z a coordenada axial, A_o e A_w a área de seção transversal ocupada pelo óleo e água; τ_o , τ_w e τ_i as tensões cisalhantes da fase óleo, água e interfacial; S_o , S_w e S_i os perímetros molhados de óleo, água e interfacial; ρ_o , ρ_w as densidades do óleo e da água, respectivamente; g a

aceleração da gravidade e θ o ângulo de inclinação. Eliminando o gradiente de pressão das equações acima, temos:

$$-\frac{\tau_w S_w}{A_w} + \frac{\tau_o S_o}{A_o} \pm \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_w} + \frac{1}{A_o} \right) - (\rho_w - \rho_o) g \sin(\theta) = 0 \quad 4.3$$

sendo que o sinal negativo no termo de tensão interfacial corresponde a água escoando mais rápido que óleo.

A Equação 4.3 é uma equação não-linear que pode ser resolvida numericamente, por exemplo, para o nível da água (h_a) ou fração volumétrica *in situ* da água (A_w/A), se as tensões cisalhantes são expressas em termos de fatores de atrito conhecidos. Após a solução da equação 4.3, o gradiente de pressão bifásico é diretamente obtido pela inserção dos resultados na Equação 4.1 ou 4.2.

Equações de fechamento são necessárias para as tensões cisalhantes e perímetros molhados. Na literatura não se tem muitos trabalhos de caráter elucidativo para tais equações no escoamento óleo-água. A seguir é mostrado o estudo de Rodriguez e Oliemans (2006).

4.1.1 Modelagem das equações de fechamento proposta por Rodriguez e Oliemans (2006)

- **Perímetros**

Os perímetros molhados pelo óleo, S_o , pela água, S_w e pela interface, S_i , são calculados pelo modelo de escoamento apresentado na Figura 4.1. A geometria da interface que separa o óleo e a água é considerada plana.

As áreas ocupadas pelo óleo e água são expressas por:

$$A_w = \frac{\pi r_i^2}{2} + 2 \left[\frac{h r_i \cos(\phi)}{2} + \frac{\phi}{2\pi} \pi r_i^2 \right] \quad A_o = A - A_w \quad 4.4$$

Os perímetros molhados são descritos por:

$$S_o = (\pi - 2\phi)r_i \quad S_w = (\pi + 2\phi)r_i \quad S_i = 2r_i \cos(\phi) \quad 4.5$$

Figura 4.1- Padrão de escoamento estratificado óleo-água com geometria da interface plana.

- **Tensões cisalhantes**

As tensões cisalhantes parietais da água e do óleo e a tensão cisalhante interfacial são funções das velocidades *in situ* das fases e seus fatores de atrito correspondentes. As equações abaixo descrevem as tensões cisalhantes para água (τ_w), óleo (τ_o) e interfacial (τ_i):

$$\tau_w = f_w \frac{\rho_w U_w |U_w|}{8}, \quad \tau_o = f_o \frac{\rho_o U_o |U_o|}{8} \quad e \quad \tau_i = f_i \frac{\rho_f (U_w - U_o) |U_w - U_o|}{8} \quad 4.6$$

- **Fator de atrito**

Os fatores de atrito das fases para escoamento turbulento são calculados usando a correlação de Haaland (1983).

Para a fase água:

$$f_w = \begin{cases} 64/Re_w = 64/(\rho_w D_{hw} U_w / \mu_w), & \text{para } Re_w \leq 1500 \\ \left\{ -1.8 \log_{10} \left[\frac{6.9}{Re_w} + \left(\frac{e}{3.7 D_{hw}} \right)^{1.1} \right] \right\}^{-2}, & \text{para } Re_w > 1500 \end{cases} \quad 4.7$$

Para a fase óleo:

$$f_o = \begin{cases} 64/Re_o = 64/(\rho_o D_{ho} U_o / \mu_o), & \text{para } Re_o \leq 1500 \\ \left\{ -1.8 \log_{10} \left[\frac{6.9}{Re_o} + \left(\frac{e}{3.7 D_{ho}} \right)^{1.1} \right] \right\}^{-2}, & \text{para } Re_o > 1500 \end{cases} \quad 4.8$$

O fator de atrito interfacial é definido pela fase que escoar mais rápido:

$$f_i = f_o \quad \text{e} \quad \rho_f = \rho_o \quad \text{se } U_o > U_w \quad 4.9$$

$$f_i = f_w \quad \text{e} \quad \rho_f = \rho_w \quad \text{se } U_o < U_w \quad 4.10$$

- **Diâmetro hidráulico**

Multiplicando-se por quatro a área de seção transversal ocupada pela fase e dividindo-se pelo respectivo perímetro molhado, tem-se o diâmetro hidráulico, sendo D_{hw} e D_{ho} os diâmetros da água e óleo, respectivamente:

$$D_{hw} = \frac{4A_w}{S_w} \quad D_{ho} = \frac{4A_o}{S_o} \quad 4.11$$

Segundo Brauner e Maron (1989), os diâmetros hidráulicos são obtidos por 4.11 se as velocidades médias das fases forem aproximadamente iguais. Caso contrário, eles propõem:

Para $U_w > U_o$

$$D_{hw} = \frac{4A_w}{S_w + S_i} \quad \text{e} \quad D_{ho} = \frac{4A_o}{S_o} \quad 4.12$$

Para $U_w < U_o$

$$D_{ho} = \frac{4A_o}{S_o + S_i} \quad e \quad D_{hw} = \frac{4A_w}{S_w} \quad 4.13$$

- **Número de Reynolds**

Para o escoamento de fases separadas o número de Reynolds é definido para cada fase:

$$Re_o = \frac{\rho_o U_o D_{ho}}{\mu_o} \quad Re_w = \frac{\rho_w U_w D_{hw}}{\mu_w} \quad 4.14$$

4.1.2 Modelagem das equações de fechamento proposta por este trabalho

- **Perímetros**

Os perímetros molhados pelo óleo, S_o , pela água, S_w e pela interface, S_i , são calculados pelo modelo de escoamento apresentado na Figura 4.2. A geometria curva da interface que separa o óleo e a água na seção transversal é considerada um arco de circunferência, levando em conta o ângulo de contato do óleo com a parede (Ng *et al.*, 2002).

As áreas ocupadas pelo óleo e água são expressas por (Chen *et al.*, 1997):

$$A_o = (1 - \varepsilon_w) \frac{\pi D^2}{4} \quad A_w = \varepsilon_w \frac{\pi D^2}{4} \quad 4.15$$

Os perímetros molhados são descritos por:

$$S_o = (\pi - \phi)D \quad S_w = \phi D \quad S_i = \phi_i D_i \quad 4.16$$

$$D_i = D \frac{\sin(\phi)}{\sin(\phi_i)} \quad \theta_i = \left(\frac{\sin(\phi_i)}{\sin(\phi)} \right)^2 \left(\theta + \frac{\sin^2(\phi)}{\tan(\phi_i)} - \frac{\sin(2\phi)}{2} - \pi \epsilon_w \right) \quad 4.17$$

Figura 4.2 - Padrão de escoamento estratificado óleo-água com geometria da interface curva

- **Fator de atrito interfacial**

Supõe-se que o cisalhamento interfacial seja função da estrutura ondulatória. E ainda, que seja possível modelar a dissipação de energia na interface ondulada através da proposição de uma rugosidade interfacial aparente. Portanto, a tensão interfacial seria maior do que aquela prevista pelo modelo utilizado em Rodriguez e Oliemans (2006).

A modelagem proposta para o fator de atrito interfacial em escoamento estratificado ondulado baseia-se numa analogia com o escoamento anular gás-líquido (Wallis, 1969). Para escoamento anular, a influência do filme líquido (δ) sobre o escoamento do núcleo de gás é modelada através do fator de atrito interfacial, f_i , o qual é função de um termo relacionado à espessura do filme líquido. Essa análise é análoga à realizada em escoamento monofásico turbulento em tubos rugosos (*sand roughness*), mas no escoamento anular o fator de atrito interfacial é função do número de Reynolds do gás e da espessura do filme líquido.

Muitas correlações empíricas foram propostas para a previsão da rugosidade interfacial aparente e espessura do filme líquido. Tais correlações podem ser vistas em Wallis (1969) e, essencialmente, resultam em:

$$f_i = f_g \left(1 + \text{Const.} \frac{\delta}{D} \right) \quad 4.18$$

É proposto que a espessura do filme líquido do escoamento anular seja equivalente a amplitude da onda interfacial no escoamento estratificado ondulado óleo-água, como mostra a Figura 4.4.

Figura 4.4 Escoamento estratificado ondulado óleo-água.

Assim, o fator de atrito interfacial para o escoamento ondulado óleo-água é:

$$f_i = f_f \left(1 + C_k \frac{\alpha}{D} \right) \quad 4.19$$

Onde C_k é uma constante que deve ser ajustada, f_f pode ser tanto f_w ou f_o dependendo das velocidades das fases, D o diâmetro interno do tubo e α a amplitude da onda.

- **Tensão cisalhante interfacial**

Dadas as expressões para o fator de atrito interfacial, são propostas as seguintes expressões para a tensão cisalhante interfacial

Para $U_w > U_o$

$$\tau_i = f_w \left(1 + C_k \frac{\alpha}{D} \right) \frac{\rho_w (U_w - U_o) |U_w - U_o|}{8} \quad 4.20$$

Para $U_w < U_o$

$$\tau_i = f_o \left(1 + C_k \frac{\alpha}{D} \right) \frac{\rho_o (U_w - U_o) |U_w - U_o|}{8} \quad 4.21$$

Note que se a interface for lisa ($\alpha = 0$), as expressões 4.20 e 4.21 recuperam a forma da expressão 4.6. Os cálculos das tensões cisalhantes e fatores de atrito de água e óleo, dos diâmetros hidráulicos e números de Reynolds do óleo e da água são análogos ao modelo de Rodriguez e Oliemans (2006).

4.1.3 Modelo homogêneo

Este modelo trata o escoamento estratificado óleo-água como uma mistura homogênea ou um pseudo-fluido com propriedades médias e obedecendo as equações do escoamento monofásico. A fração volumétrica das fases é exibida como:

$$\varepsilon_w = \frac{U_{ws}}{U_{os} + U_{ws}}, \quad \varepsilon_o = 1 - \varepsilon_w \quad 4.22$$

E o gradiente de pressão bifásico:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right) = \frac{f_f \rho_m (U_{os} + U_{ws})^2}{2D} + \rho_m g \sin(\theta) \quad 4.23$$

Sendo usado o f_f laminar baseado no número de Reynolds da mistura:

$$f_f = \frac{64}{Re_m} \quad Re_m = \frac{\rho_m (U_{os} + U_{ws}) D}{\mu_m} \quad 4.24$$

Usando a correlação de Dukler descrita em Wallis (1969) para a viscosidade da mistura:

$$\mu_m = (1 - \varepsilon_o) \mu_w + \varepsilon_o \mu_o \quad 4.25$$

onde D é o diâmetro interno do tubo e ρ_m pode ser resolvida pela Equação 3.1 do Capítulo 3.

4.2 Equação da onda interfacial para o escoamento estratificado óleo-água

Partimos da equação da onda interfacial obtida através da linearização e acoplamento das equações de conservação de quantidade de movimento e massa para o escoamento estratificado óleo-água (Wallis 1969).

$$M \frac{\partial^4 h_w}{\partial z^4} + N \frac{\partial^2 h_w}{\partial t^2} + 2E \frac{\partial^2 h_w}{\partial t \partial z} + F \frac{\partial^2 h_w}{\partial z^2} + G \left(\frac{\partial h_w}{\partial t} + H \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = 0 \quad 4.26$$

cujos coeficientes são:

$$M = \sigma \left[\frac{\left(\frac{\pi D^2}{4} \right)}{S_i} \right]$$

$$N = \left(\frac{\rho_w}{\varepsilon_w} + \frac{\rho_o}{\varepsilon_o} \right)$$

$$E = \left(\frac{\rho_w U_w}{\varepsilon_w} + \frac{\rho_o U_o}{\varepsilon_o} \right)$$

$$F = \frac{\rho_w U_w^2}{\varepsilon_w} + \frac{\rho_o U_o^2}{\varepsilon_o} - \frac{\left(\frac{\pi D^2}{4} \right)}{S_i} [(\rho_w - \rho_o) g \cos \beta]$$

$$G = \frac{\partial f}{\partial U_{ws}} - \frac{\partial f}{\partial U_{os}}$$

$$H = \frac{\frac{\partial f}{\partial \varepsilon_w}}{\frac{\partial f}{\partial U_{ws}} - \frac{\partial f}{\partial U_{os}}}$$

Onde f é o resultado da relação de equilíbrio local da quantidade do movimento de cada fase:

$$-\frac{\tau_w S_w}{A_w} + \frac{\tau_o S_o}{A_o} \pm \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_w} + \frac{1}{A_o} \right) - (\rho_w - \rho_o) g \sin(\theta) = f \quad 4.27$$

Rearranjando a equação 4.26, temos:

$$\varphi \frac{\partial^4 h_w}{\partial z^4} + \eta \left(\frac{\partial h_w}{\partial t} + V_o \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial h_w}{\partial t} + V_o \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial h_w}{\partial t} + H \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = 0 \quad 4.28$$

Sendo:

$$\varphi = \frac{M}{N} = \frac{\sigma \left[\frac{\left(\frac{\pi D^2}{4} \right)}{S_i} \right]}{\left(\frac{\rho_w}{\varepsilon_w} + \frac{\rho_o}{\varepsilon_o} \right)} \quad 4.29$$

$$\eta = \frac{N}{G} = \frac{\left(\frac{\rho_w}{\varepsilon_w} + \frac{\rho_o}{\varepsilon_o} \right)}{\frac{\partial f}{\partial U_{ws}} - \frac{\partial f}{\partial U_{os}}} \quad 4.30$$

$$V_o = \frac{E}{N} = \frac{\left(\frac{\rho_w U_{ws}}{\varepsilon_w} + \frac{\rho_o U_{os}}{\varepsilon_o} \right)}{\left(\frac{\rho_w}{\varepsilon_w} + \frac{\rho_o}{\varepsilon_o} \right)} \quad 4.31$$

A velocidade dinâmica é:

$$C_d = \pm \sqrt{V_o^2 - \frac{F}{N}} \quad 4.32$$

e a celeridade da onda cinemática é:

$$C_v = H = \frac{\frac{\partial f}{\partial \varepsilon_w}}{\frac{\partial f}{\partial U_{ws}} - \frac{\partial f}{\partial U_{os}}} \quad 4.33$$

Para que a Equação 4.26 represente uma onda, é necessário que seja do tipo hiperbólico. Isto requer que certas condições sejam satisfeitas pelos coeficientes φ e η . A Equação 4.28, então, permite classificar as ondas em duas classes:

- ✓ Ondas hiperbólicas $\varphi = 0$ e $\eta \neq 0$
- ✓ Ondas dispersivas $\varphi \neq 0$ e $\eta \neq 0$

Por sua vez, as ondas hiperbólicas podem ser divididas em dois tipos:

- ✓ Ondas Cinemáticas se $\eta < 1$.
- ✓ Ondas dinâmicas se $\eta > 1$.

CAPITULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados experimentais e as previsões da modelagem matemática proposta no Capítulo 4. Os tópicos são organizados da seguinte forma: ajuste do termo ondulatório do fator de atrito interfacial (constante C_k), comparações dos dados experimentais de fração volumétrica *in situ* e queda de pressão com modelos da literatura (Rodriguez e Oliemans (2006) e modelo homogêneo) e modelo proposto nesta pesquisa, apresentação dos dados experimentais de amplitude e comprimento de onda e forma média da onda e o estudo da natureza física da estrutura ondulatória através da equação da onda. Todos os resultados experimentais e o programa desenvolvido no software Mathematica®, onde foram implementadas as equações apresentadas no capítulo anterior, podem ser vistos no Apêndice B e Apêndice E respectivamente.

5.1 Ajuste do termo ondulatório do fator de atrito interfacial (constante C_k)

A constante C_k da Equação 4.19 foi ajustada inserindo os dados empíricos das amplitudes médias das ondas (Vide Tópico 5.3). O ajuste baseou-se no seguinte critério: minimização simultânea do quadrado dos erros relativos médios entre os valores teóricos e experimentais de fração volumétrica *in situ* da água (equação 5.1 e Figura 5.1) e queda de pressão bifásica (equação 5.2 e Figura 5.2).

$$erro_{\varepsilon_w} = \frac{1}{N} \sum_i^N \left(\frac{\varepsilon_{teo} - \varepsilon_{exp}}{\varepsilon_{exp}} \right)^2 * 100 \quad 5.1$$

$$erro_{\frac{dp}{dz}} = \frac{1}{N} \sum_i^N \left(\frac{\frac{dp}{dz}_{teo} - \frac{dp}{dz}_{exp}}{\frac{dp}{dz}_{exp}} \right)^2 * 100 \quad 5.2$$

Figura 5.1 Ajuste do C_k para a fração volumétrica *in situ* da água.

Figura 5.2- Ajuste do C_k para a queda de pressão bifásica.

Os valores da constante C_k foram variados de 0 a 1000. Uma constatação importante é que, tanto para a fração volumétrica *in situ* de água, quanto para a queda de pressão bifásica, ocorre um ponto de erro mínimo. Para a fração volumétrica *in situ*, o menor erro relativo encontra-se em torno de $C_k = 300$. Para a queda de pressão, o menor erro relativo encontra-se em torno de $C_k = 100$. Considerando que o erro no caso da fração volumétrica não aumenta significativamente para valores de C_k entre 100 e 300 e que, por outro lado, para o caso da queda de pressão o erro aumenta significativamente para valores de C_k maiores que 100, foi adotado o valor de $C_k = 100$. Portanto, com o valor da constante definido, tem-se uma nova expressão para o fator de atrito interfacial.

5.2 Previsão da fração volumétrica *in situ* do óleo e perda de carga bifásica

5.2.1 Fração volumétrica *in situ* do óleo

São apresentados nesse tópico os dados experimentais de fração volumétrica *in situ* de óleo e são feitas comparações com as previsões do modelo de Rodriguez e Oliemans (2006), modelo homogêneo e o modelo proposto na presente pesquisa. Na Figura 5.3 estão as comparações para inclinação (a) horizontal, (b) 10° descendente, (c) 20° descendente, (d) 10° ascendente e (e) 20° ascendente. A faixa de incerteza na medição da fração volumétrica com as válvulas de fechamento rápido variou de $\pm 0,88\%$ e $\pm 2,58\%$ (Apêndice C).

Na figura 5.3, U_{ws} é a velocidade superficial da água, U_{os} a velocidade superficial do óleo e ε_o a fração volumétrica *in situ* do óleo. Comparando os dados experimentais com as previsões, o modelo homogêneo subestimou os dados e o modelo de Rodriguez e Oliemans (2006) superestimou. O modelo proposto, em todos os casos, ofereceu melhores previsões. Como pode ser observado na Figura 5.4, numa comparação direta entre dados e previsões do modelo proposto, ocorreu um desvio de +25% e erro relativo médio global de 14,2%. Já na Figura 5.5, vê-se que o modelo de Rodriguez e Oliemans (2006) propiciou um desvio de +60% e erro relativo médio global de 40,4%. Na Figura 5.6 constata-se que para o modelo homogêneo o desvio foi de -45% e o erro relativo médio global de 39%. onde ε_{teo} representa a fração volumétrica *in situ* do óleo prevista pelos modelos e ε_{exp} a fração volumétrica *in situ* do óleo medida experimentalmente.

Figura 5.3- Fração volumétrica *in situ* do óleo em função da velocidade superficial do óleo: dados experimentais, modelo homogêneo, modelo de Rodriguez e Oliemans (2006) e modelo proposto, para as inclinações (a) horizontal, (b) -10° , (c) -20° , (d) $+10^\circ$ e (e) $+20^\circ$.

Figura 5.4- Comparação entre a fração volumétrica *in situ* de óleo obtida pelo modelo proposto e a obtida experimentalmente.

Figura 5.5- Comparação entre a fração volumétrica *in situ* de óleo obtida pelo modelo de Rodriguez e Oliemans (2006) e a obtida experimentalmente.

Figura 5.6- Comparação entre a fração volumétrica *in situ* de óleo obtida pelo modelo homogêneo e a obtida experimentalmente.

A concordância quantitativa entre as previsões do modelo proposto e os dados experimentais de frações volumétricas *in situ* do óleo é bastante satisfatória, sendo assim considerado um bom resultado tendo em vista a complexidade do escoamento bifásico estratificado. Para o cálculo do erro relativo médio global foi utilizada a expressão 5.3:

$$erro_{holdup\ o} = \frac{1}{N} \sum_i^N \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{teo} - \varepsilon_{exp}}{\varepsilon_{exp}} \right)^2} * 100 \quad 5.3$$

5.2.2 Queda de pressão bifásica

São apresentadas nesse tópico comparações entre a queda de pressão obtida experimentalmente e aquela prevista pelo modelo de Rodriguez e Oliemans (2006), modelo homogêneo e o modelo proposto na presente pesquisa. Na Figura 5.7 estão as comparações na (a) horizontal, (b) 10° descendente, (c) 20° descendente, (d) 10° ascendente, com as mesmas velocidades superficiais da água e óleo do topico anterior.

Figura 5.7- Queda de pressão em 7,5 metros de tubulação: experimental, modelo homogêneo, modelo de Rodriguez e Oliemans (2006) e modelo proposto, para as inclinações (a) horizontal, (b) -10°, (c) -20°, (d) +10°.

A faixa de incerteza na medição da queda de pressão bifásica pelo medidor é de 0,5% do fundo de escala (0,1 kPa; maiores detalhes estão no Apêndice C).

Na Figura 5.7, verifica-se que os dados experimentais de queda de pressão, em todas as angulações, ficaram abaixo das previsões dos modelos. O modelo proposto se aproximou melhor na maioria absoluta dos casos. A queda de pressão prevista pelo modelo proposto quando comparada à experimental para todos os pontos, independentemente da angulação, apresentou um erro relativo médio global de 70,6%, o modelo de Rodriguez e Oliemans (2006) de 82,4% e o modelo homogêneo de 106%. Para o cálculo do erro relativo médio global foi utilizada a seguinte expressão:

$$erro_{queda\ de\ pressão} = \frac{1}{N} \sum_i^N \sqrt{\left(\frac{DP_{teo} - DP_{exp}}{DP_{exp}} \right)^2} * 100 \quad 5.4$$

Onde DP_{teo} representa a queda de pressão pelos modelos e DP_{exp} a queda de pressão medida experimentalmente.

Em suma, a comparação dos dados experimentais com os modelos sugere que o modelo proposto representa um avanço. Foi possível obter melhores previsões de fração volumétrica *in situ* e queda de pressão bifásica em escoamento estratificado ondulado óleo-água. O modelo propiciou uma melhora significativa principalmente para o caso da previsão da fração volumétrica *in situ*.

5.3 Propriedades geométricas e cinemáticas da onda interfacial

São apresentados a seguir os dados experimentais das propriedades geométricas e cinemáticas da onda interfacial para a malha de pontos estabelecida. Nas Figuras 5.8 e 5.9 estão os dados de comprimento médio e amplitude média de onda, respectivamente, em função da velocidade relativa para diversas inclinações. Na Figura 5.10 estão dados de celeridade média de onda e velocidades *in situ* das fases em função da velocidade superficial de óleo e para diversas inclinações.

Figura 5.8 -Dados de comprimento médio da onda em função da fração volumétrica *in situ* de óleo e para (a) horizontal, 10° descendente e 10° ascendente, (b) 20° descendente e 20° ascendente.

Figura 5.9- Dados de amplitude média da onda em função da fração volumétrica *in situ* de óleo e para (a) horizontal, 10° descendente e 10° ascendente, (b) 20° descendente e 20° ascendente.

Figura 5.10- Celeridade da onda média, velocidades in situ de óleo (V_o) e água (V_w) em função da velocidade superficial de óleo, para as inclinações (a) horizontal, (b) -10° , (c) -20° , (d) $+10^\circ$ e (e) $+20^\circ$.

Sendo V_r a velocidade relativa entre as fases, nas Figura 5.8 (a) e (b), em geral, pode-se notar que o aumento da velocidade relativa entre as fases faz com que o comprimento da onda diminua. É interessante também observar que os comprimentos da onda na ascendente (10° e 20°) são em geral maiores do que na descendente (-10° e -20°) e horizontal. Aparentemente, o escoamento é mais estável na ascendente e para as velocidades relativas menores. As velocidades relativas são mais baixas na ascendente, o que explicaria a maior estabilidade, conforme o critério de estabilidade hidrodinâmica de Kelvin-Helmholtz.

Pode-se ver na Figura 5.9 (a) e (b) que com o aumento da velocidade relativa a amplitude média da onda tende a decair para inclinações horizontal e descendente. Já para inclinações ascendentes as amplitudes tendem a aumentar. Além disso, as amplitudes na ascendente são menores do que na descendente e horizontal. Novamente, isso indica uma interface mais estável na ascendente.

Em relação à Figura 5.10, em aspectos gerais e para todas as inclinações exploradas, a celeridade da onda manteve-se entre as velocidades *in situ* do óleo e da água. Esse é um comportamento típico de ondas de natureza cinemática. É interessante salientar que na horizontal, 10° descendente, 10° ascendente e 20° ascendente e para as baixas velocidades superficiais do óleo a celeridade da onda se aproximou da velocidade *in situ* da água, enquanto que para velocidades mais altas ela se aproximou da do óleo. Em 20° descendente os dados se aproximaram da velocidade *in situ* do óleo. Não foram observadas grandes alterações nos valores de celeridade para as diferentes angulações analisadas.

Em suma, as propriedades geométricas da onda parecem seguir a seguinte tendência: nas inclinações horizontal e descendentes os comprimentos médios da onda são menores do que nas ascendentes, e no caso das amplitudes médias ocorre o contrário. Além disso, na medida em que a velocidade relativa vai aumentando, em todas as inclinações verificadas, os comprimentos médios das ondas tendem a diminuir, as amplitudes na horizontal e descendente tendem a decair e na ascendente aumentar. Por fim, a celeridade não parece ser influenciada pela angulação, mas sim pela velocidade *in situ* da fase mais rápida.

5.4 Estudo da natureza da onda interfacial

Como já visto na modelagem matemática, tópico 4.3, as ondas podem ser classificadas em dispersivas ou hiperbólicas, sendo as hiperbólicas subdivididas em cinemáticas ou dinâmicas. Nesta seção, os dados experimentais serão comparados com as previsões da teoria da onda cinemática (Wallis, 1969) para o estudo da natureza da onda interfacial.

Para que a Equação 4.28 represente uma onda hiperbólica é necessário que sejam satisfeitas as seguintes condições: $\varphi = 0$ (Equação 4.29) e $\eta \neq 0$ (Equação 4.30). Os coeficientes φ e η tem dimensão de tempo; assim, eles são divididos pela razão entre comprimento e celeridade da onda, esta que indica a escala de tempo da onda interfacial observada neste trabalho, resultando nos coeficientes adimensionais φ^* e η^* . Sendo portanto, os adimensionais descritos pelas equações abaixo, pela razão do comprimento e celeridade da onda experimental:

$$\varphi^* = \frac{\varphi}{\left(\frac{\lambda_m}{C_v}\right)_{exp}} \quad \eta^* = \frac{\eta}{\left(\frac{\lambda_m}{C_v}\right)_{exp}} \quad 5.5$$

Nas Figuras 5.11 e 5.12 observam-se os valores de φ^* e η^* , respectivamente, em função da velocidade superficial do óleo para inclinações -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$ e 20° . Na Figura 5.11 observa-se que o coeficiente adimensional φ^* apresenta valores muito próximos de zero. Portanto, as ondas interfaciais observadas neste trabalho são consideradas hiperbólicas.

Uma vez as ondas definidas como sendo hiperbólicas, elas podem ser subdivididas em cinemáticas ou dinâmicas. Teoricamente, são cinemáticas se $\eta < 1$ e dinâmicas se $\eta > 1$. Na Figura 5.12 percebe-se que os valores do coeficiente adimensional η^* são sempre menores ou muito menores do que 1. Para valores altos de velocidade superficial de óleo η^* aproxima-se de 1, o que poderia indicar ruptura da onda ou instabilidade hidrodinâmica.

Figura 5.11- Coeficiente adimensional ϕ^* em função da velocidade superficial do óleo para as inclinações (-20°, -10°, 0°, +10° e 20°).

Figura 5.12- Coeficiente adimensional η^* em função da velocidade superficial do óleo para as inclinações (-20°, -10°, 0°, +10° e 20°) .

Wallis (1969) descreve a celeridade da onda cinemática pela Equação 4.33. A Figura 5.13 compara a previsão da equação 4.33 com os dados experimentais da celeridade da onda em função da fração volumétrica do óleo na (a) horizontal, (b) 10° descendente, (c) 20° descendente, (d) 10° ascendente e (e) 20° ascendente. Como a Equação 4.33 depende das equações de fechamento descritas no Capítulo 4, adotou-se o modelo proposto pela presente pesquisa, tendo em vista que ele se mostrou mais adequado que os modelos da literatura.

Na Figura 5.13, $C_v \text{ exp}$ é a celeridade média da onda medida experimentalmente e C_v (Eq. 4.33) é a celeridade teórica de uma onda cinemática, conforme teoria proposta por Wallis (1969). A concordância entre previsão e dados é bastante satisfatória. O espalhamento foi da ordem de ± 10 e erro relativo médio global de 9,94% (Figura 5.14). Para o cálculo do erro relativo médio global foi utilizada a expressão 5.6.

$$\text{erro}_{\text{celeridade da onda}} = \frac{1}{N} \sum_i^N \sqrt{\left(\frac{Cv_{(eq. 4.31)} - Cv_{exp}}{Cv_{exp}} \right)^2} * 100 \quad 5.6$$

5.5 Forma da onda

A forma média da onda descrita no capítulo 3 foi analisada para 5 pontos, sendo: velocidades superficiais da água $U_{ws} = 0.15$ m/s e de óleo $U_{os} = 0.1$ m/s para 0°, -10° e 10° (Fig. 3.35 a) e $U_{ws} = 0.1$ m/s, $U_{os} = 0.1$ m/s para -20° e 20° (Fig. 3.35 b). Na Figura 5.15 estão os gráficos da onda média e nota-se que as formas da onda na horizontal e na descendente são diferentes da ascendente, levando, portanto, a acreditar que na ascendente ocorre uma onda mais suave e estável.

Figura 5.13- Celeridade média da onda interfacial para as inclinações (a) horizontal, (b) -10°, (c) -20°, (d) +10° e (e) +20°.

Figura 5.14- Comparação entre a celeridade média de onda cinemática obtida pela equação 4.33 e a obtida experimentalmente.

Figura 5.15- Forma média da onda para as inclinações (a) (0°, -10 e 10°) e (b) (-20° e 20°).

CAPITULO 6 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.

Este trabalho apresentou um estudo experimental sobre o padrão estratificado ondulado óleo-água. Buscou-se caracterizar e entender o escoamento a partir da obtenção de dados de propriedades geométricas e cinemáticas da onda interfacial, além de fração volumétrica *in situ* e queda de pressão bifásica. Propôs-se um modelo fenomenológico baseado no modelo de dois fluidos unidimensional, considerando a estrutura ondulatória interfacial. O modelo proposto foi comparado com dois modelos disponíveis na literatura e com os dados experimentais coletados. E um estudo sobre a natureza física da onda, fundamentado na equação da onda da perturbação interfacial, também foi desenvolvido.

Os principais resultados deste trabalho podem ser assim sintetizados:

- O estudo experimental das propriedades geométricas da onda mostrou que: o comprimento médio da onda interfacial, tanto na descendente quanto na ascendente a partir da horizontal, tende a decrescer com o aumento da velocidade relativa entre as fases, e para as mesmas velocidades relativas, o comprimento médio na horizontal e descendente é em geral inferior do que na ascendente. Em relação à amplitude média da onda, aumentando à velocidade relativa na horizontal e descendente as amplitudes tendem a diminuir, já na ascendente ela tende a aumentar. As amplitudes da onda na horizontal e descendentes são geralmente maiores do que na ascendente. Considerando as diferenças entre os comprimentos e amplitude descritos em relação aos ângulos de inclinação, o escoamento tende a ser mais estável na ascendente e para as velocidades relativas menores. As velocidades relativas são mais baixas na ascendente, o que explicaria a maior estabilidade, conforme o critério de estabilidade hidrodinâmica de Kelvin-Helmholtz.
- O estudo experimental das propriedades cinemáticas da onda mostrou que: a celeridade média da onda em aspectos gerais e para todas as inclinações exploradas manteve-se entre as velocidades *in situ* do óleo e

da água. Entretanto, na horizontal, em 10° descendente, 10° descendente e 20° ascendente, para as velocidades superficiais do óleo mais baixas ela se aproximou da velocidade *in situ* da água e para mais altas se aproximou da velocidade *in situ* do óleo, em 20° descendente ela se aproximou da velocidade do óleo. Não foram observadas grandes alterações nos valores de celeridade para as diferentes angulações, o que sugere que talvez ela não seja influenciada pela angulação, mas sim pela velocidade *in situ* da fase mais rápida.

- A modelagem proposta para as equações de fechamento do modelo de dois fluidos unidimensional para previsão da fração volumétrica *in situ* e queda de pressão bifásica considera a geometria interfacial curva na seção transversal. Um fator de atrito interfacial baseado no conceito de rugosidade equivalente é proposto. O modelo proposto mostrou uma melhor concordância com os dados experimentais em comparação com outros dois modelos da literatura; para a fração volumétrica *in situ* do óleo teve uma dispersão de +25% e erro médio global de 14,2%, enquanto o modelo de Rodriguez e Oliemans (2006) uma dispersão de +60% e erro médio global de 40,4% e o modelo homogêneo uma dispersão de -45% e erro médio global de 39%; para a queda de pressão o modelo proposto teve um erro médio global de 70,6%, o modelo de Rodriguez e Oliemans (2006) 82,4% e o modelo homogêneo de 106%.
- Um estudo fundamentado na equação da onda da perturbação interfacial para escoamento estratificado óleo-água foi conduzido. Para que a equação teórica represente uma onda é necessário que seja do tipo hiperbólico e isto requer que certas condições sejam satisfeitas: o coeficiente φ da equação citada tem de ser igual a zero e o coeficiente η diferente de zero. Uma vez sendo provado o caráter hiperbólico, as ondas podem ser classificadas em cinemática ou dinâmica, sendo que para ser cinemática o coeficiente η tem que ser menor do que um. Os dados experimentais apontaram que a onda observada é do tipo hiperbólico e cinemática. Sendo a onda cinemática, foi utilizada a equação da onda cinemática descrita pela teoria de Wallis (1969) para confrontar a

celeridade experimental com a teórica. A concordância entre previsões e dados foi bastante satisfatória, com um espalhamento de ± 10 e erro relativo médio global de 9,94%.

Com o intuito de dar continuidade a esta pesquisa, para trabalhos futuros sugere-se:

- Coletar um banco de dados mais abrangente das propriedades geométricas e cinemáticas da onda, fração volumétrica *in situ* e queda de pressão bifásica, a fim de obter maiores esclarecimentos sobre estrutura ondulatória.
- Aprofundar o estudo do modelo fenomenológico para aprimorar a previsão da queda de pressão.
- Desenvolver um modelo fenomenológico para a previsão das propriedades geométricas da interface.
- Fazer as mesmas investigações desta pesquisa em diferentes tubulações, geometrias, ângulos de inclinação, viscosidades, densidades dos fluidos e materiais do tubo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- BERGLES, A.E. et al. (1981). **Two-phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries**, Hemisphere, McGraw-Hill.
- 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.
- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. (2002). **Fenômenos de transporte**. 2.ed. Tradução de Affonso Silva Telles, Carlos Russo, Ricardo Pires Peçanha e Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

- 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.25, n.8, p.1346-1350.
- BONTOZOGLOU, V. (1991). Weakly nonlinear Kelvin-Helmholtz waves between fluids of finite depths. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.17, n.4, p.509-518, July/Aug.
- BOTTERILL, J.S.M. (1986). Fluid Bed Heat Transfer. In **Gas Fluidization Technology**, Chichester, Jon Wiley.
- 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 two-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.
- BUTTERWORTH, D.; HEWITT, G.F. (1977). **Two-phase Flow and Heat Transfer**, Oxford University Press, reprinted 1978.
- COLLIER, J.G. (1981). **Convective Boiling and Condensation**, McGraw-Hill.
- CHEN, X.T.; CAI, X.D.; BRILL, J.P. (1997). Gas-liquid stratified-wavy flow in horizontal pipelines. *Journal of Energy Resources Technology*, Tulsa, v. 119, p. 209-216, Dec.
- de MELLO, D.O. (2007). **Estudo Experimental e Modelagem Matemática de Ondas no Escoamento Estratificado Óleo-Água em Tubulação Levemente Inclinada**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- DELHAIE, J.M.; GIOT, M.; RIETH, ULLER, M.L. (1981). **Thermohydraulics of two-phase systems for industrial design and nuclear engineering**, Hemisphere/McGraw-Hill.
- 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.
- ELSETH, G. (2001). **An experimental study of oil-water flow in horizontal pipes**. 269p. PhD Thesis – Telemark University College, Norway.
- FOX, R.W.; MCDONALD, A.T.; PRITCHARD, P.J. (2004). **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. 6.ed. Tradução de Ricardo Nicolau Nassar Koury e Geraldo Augusto Campolina França. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- GOVIER, G.W.; AZIZ, K. (1972). **The Flow of Complex Mixtures in Pipes**, Van Nostrand-Reinhold.
- HAHEIM, S.A. (2001). **Oil-water Slip in Inclined Pipes and Application to Downhole Separation**. Norway: ABB Corporate Research.
- HETSRONE, G. (1982). **Handbook of Multiphase Systems**, Hemisphere/McGraw-Hill.
- HEWITT, G.F. (1978). **Measurement of Two-phase Flow Parameters**, Academic Press.
- HOWARD, J.R. (1989). **Fluidized Bed Technology-Principles and Applications**, Adam Hilger.
- 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.
- ISHII, M. (1975). **Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow**, Eyrolles.
- KANG, H.C.; KIM, M.H. (1992). Relation between the interfacial shear stress and the wave motion in a stratified flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.19, n.1, p.35-49, 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.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. (1969). **Fluidization Engineering**. Inc. USA, John Wiley & Sons.
- 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.

NG, T. S.; LAWRENCE, C. J.; HEWITT, G.F. (2002). Laminar stratified pipe flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.28,n.6 p.963-996, Jun.

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, p.413-435, Apr.

LUM, J.Y.L.; 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.

MORETTI, A. D. (2009). **Estudo experimental de ondas interfaciais em escoamento estratificado água-óleo horizontal e levemente inclinado**. Iniciação Científica, Orientador Oscar Maurício Hernandez Rodriguez. Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos-NETeF. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

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.(2008) Stability Analysis of Core-annular Flow and Neutral Stability Wave Number. **AIChE Journal**, v. 54, pp. 20-31.

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. et al. (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.

VARA, R.M.O. (2001). **Hidrodinâmica do Escoamento Bifásico Óleo Pesado – Água em um Tubo Horizontal**. 139p. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

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.

APÊNDICE A - INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS DO NETEF

A.1 Sistema de suprimento de ar

Um compressor Worthington de 60 CV centrífugo, do tipo parafuso, é responsável pelo suprimento de ar para o sistema (Figura A.1 a). O ar ao sair do compressor é refrigerado por três torres de resfriamento (Figura A.1 b), seguindo 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. Operando com uma pressão de saída de até 700 KPa, o compressor alimenta um reservatório de ar que equaliza a variação de pressão do sistema, evitando assim variações de pressões inconvenientes para testes em regime permanente (Figura A.2).

A principal função das válvulas é controlar a vazão de ar que alimenta a linha de teste. A quantidade de ar é medida através de medidores de vazão do tipo placas de orifício ou medidor do tipo deslocamento positivo, que estão localizadas a jusante. As três ramificações possuem vazões nominais de $14 \text{ m}^3/\text{h}$, $40 \text{ m}^3/\text{h}$ e $100 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo possível através delas o ajuste fino da vazão do ar que entra no sistema.

Figura A.1- (a) Compressor; (b) Torres de resfriamento de ar

Figura A.2- Tanque acumulador de ar.

A.2 Sistemas de suprimento de água e óleo

A água e o óleo mineral ficam estocados separadamente em reservatórios ou tanques de armazenamento de polipropileno, e são bombeados para a linha através de bombas helicoidais do tipo parafuso, acionadas remotamente por inversores de frequência de 12 KW (Figura A.3). Geralmente, utiliza-se bomba centrífuga para a água. Entretanto, dependendo das condições do escoamento bifásico, esse tipo de bomba causava refluxo, gerando muita variação nos sinais de saída de vazão, o que dificultava o controle. A fim de minimizar a oscilação desses sinais e aperfeiçoar o controle de vazão de água, optou-se por utilizar, assim como para o óleo, uma bomba de deslocamento positivo helicoidal do tipo parafuso. Dessa maneira, em princípio, as bombas forneceriam uma vazão constante do fluido, independente da pressão da linha. Logo, diminui-se a oscilação dos sinais de vazão de água. Para o bombeamento de água foi utilizada, então, uma bomba helicoidal do tipo parafuso da marca Weatherford com potência de acionamento de 15 CV e potência absorvida de 10 CV, contando com um coeficiente de segurança; e para o óleo uma bomba helicoidal do tipo parafuso também da marca Weatherford modelo 2WHT 53/F, com potência de 10 CV.

Figura A.3- Inversores de frequência.

As medidas das vazões de água e óleo são realizadas a montante da seção de testes através de medidores instalados na linha, que serão descritos mais adiante. A Figura A.4 mostra, acima e abaixo, as bombas helicoidais de óleo e água utilizadas, respectivamente. Óleo e água são bombeados desde os tanques de armazenamento passando por tubulações em PVC até atingir a linha de teste de vidro. Após a linha, a mistura de água e óleo passa por um tanque separador do tipo placas coalescente. Uma vez separados os líquidos, cada um segue para o reservatório respectivo por gravidade. Tanto os inversores de frequência quanto a rotação do motor da bomba são controlados manualmente ou remotamente por um programa em plataforma Labview® através de protocolo CAM de comunicação.

Figura A.4- Bombas helicoidais de alimentação de água e óleo.

A.3 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 a separação de líquidos. A capacidade do mesmo é de 22 000 litros. O revestimento interno de placas é feito com uma resina especial a base de poliéster para melhorar sua afinidade com a água e repulsão ao óleo em uma das faces (face hidrofílica e oleofóbica). Fenômeno recíproco deve ocorrer na face oposta da mesma (face hidrofóbica e oleofílica), esta em PVC. Assim, ele pode operar com misturas de óleo em água e também com misturas de água em óleo. O separador está dividido em três câmaras, como pode ser observado no diagrama esquemático da Figura A.5.

Figura A.5- Diagrama esquemático do Separador de Placas Coalescentes.

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.

Figura A.6- Separador de água e óleo do tipo placas coalescentes.

O princípio de separação consiste em facilitar a aglutinação ou coalescência das gotas de água ou óleo que se encontram misturadas em uma dispersão homogênea, formando gotas cada vez maiores e aumentando assim sua velocidade de ascensão ou descenso, conforme a lei de Stokes. Estas bolhas se separam naturalmente devido a diferença de densidade entre os fluidos. A seguir, a terceira câmara serve apenas para armazenar os volumes de água, que retornam por gravidade para os tanques de armazenamento respectivos. A figura A.6 mostra um foto do separador de placas coalescentes.

A.4 Medidores de vazão de água

Estão disponíveis no laboratório dois medidores de vazão de água: um medidor de engrenagem para baixas vazões de água (modelo OGT da Oval) que lê uma faixa de 1 a 35 l/min., o que equivale a uma faixa de velocidades superficiais de 0,031 a 1,1 m/s, e um medidor de altas vazões de água do tipo Vortex (Modelo EX-DELTA VXW 1050 da Oval), capaz de ler uma faixa de 33.33 a 1316.667 l/min. o que equivale a uma faixa de velocidades superficiais de 1,05 a 41 m/s. Na Figura A.7 a e b podem ser observados os medidores de água de alta e de baixa vazão, respectivamente.

Figura A.7- (a) Medidor tipo vórtex EX-Delta para altas vazões de água, (b) Medidor Oval de engrenagens para baixas vazões de água.

A.5 Medidores de vazão de óleo

Estão disponíveis no laboratório dois medidores de vazão de óleo sendo: um medidor de engrenagem para baixas vazões de óleo (modelo FLOWMATE, Oval M-III) que lê uma faixa de 0,05 a 8 l/min., o que equivale a uma faixa de velocidades

superficiais de 0,016 a 0,25 m/s, e um medidor de deslocamento positivo para médias vazões de óleo (Modelo EG LS5576, Oval), capaz de ler uma faixa de 2,5 a 106 l/min., o que equivale a uma faixa de velocidades superficiais de 1,05 a 3,33 m/s. Na Figura A.8 a e b podem ser observados os medidores de água de baixas e de médias vazões, respectivamente.

Figura A.8- (a) Medidor baixas vazões, (b) Medidor médias vazões.

APÊNDICE B - TABELA COM OS DADOS EXPERIMENTAIS

N. exp	θ [°]	U_{ws}	U_{os}	ε_o exp	ε_o^*	ε_o^{**}	ε_o^{***}	ΔP exp	ΔP^*	ΔP^{**}	ΔP^{***}	λ_{exp}	α_{exp}	$C_v exp$	C_v^*	η	$\varphi[10^{-8}]$
1	0	0.15	0.03	0,39	0,16	0,68	0,42	0,89	2,75	2,63	2,53	43	4,59	0,1	0,11	0,066	3,24
2	0	0.15	0.05	0,47	0,24	0,74	0,52	1,32	4,88	4,21	3,91	40,63	4,51	0,19	0,17	0,072	3,43
3	0	0.15	0.07	0,48	0,3	0,77	0,56	1,83	6,5	5,4	4,96	41,07	4,7	0,23	0,21	0,072	3,37
4	0	0.15	0.1	0,58	0,39	0,8	0,64	2,26	9,81	7,79	7,03	38,68	3,98	0,3	0,29	0,077	3,29
5	0	0.15	0.13	0,63	0,46	0,82	0,69	3,12	13,08	10,14	9,09	40,15	3,71	0,37	0,36	0,076	3,06
6	0	0.15	0.15	0,65	0,49	0,83	0,71	3,54	14,74	11,33	10,15	37,79	3,66	0,35	0,4	0,074	2,78
7	-10	0.15	0.03	0,39	0,16	0,76	0,51	-11,16	-9,5	-8,52	-9,27	41,54	4,62	0,12	0,12	0,071	3,63
8	-10	0.15	0.05	0,49	0,25	0,79	0,58	-10,41	-7,18	-6,89	-7,72	40,1	4,56	0,15	0,18	0,074	3,4
9	-10	0.15	0.07	0,51	0,3	0,79	0,6	-9,79	-5,51	-5,57	-6,52	37,63	3,81	0,18	0,22	0,073	3,2
10	-10	0.15	0.1	0,58	0,39	0,81	0,65	-9,3	-2,01	-3,12	-4,28	39,7	3,93	0,31	0,3	0,069	2,94
11	-10	0.15	0.13	0,65	0,46	0,83	0,7	-8,62	1,41	-0,72	-2,11	36,76	3,6	0,36	0,37	0,07	2,63
12	-10	0.15	0.15	0,66	0,49	0,84	0,71	-8,11	3,12	0,48	-1,02	37,83	3,76	0,4	0,4	0,066	2,51
13	-20	0.1	0.03	0,48	0,22	0,82	0,58	-22,63	-21,22	-19,07	-20,39	43,52	5,4	0,15	0,13	0,063	3,06
14	-20	0.1	0.05	0,57	0,33	0,84	0,67	-21,64	-18,65	-17,46	-18,67	37,4	3,88	0,2	0,2	0,076	3,05
15	-20	0.1	0.07	0,62	0,39	0,85	0,71	-20,86	-16,76	-16,25	-17,49	38,01	3,58	0,25	0,24	0,076	2,95
16	-20	0.1	0.1	0,69	0,49	0,87	0,75	-20,35	-13,05	-13,82	-15,17	37,88	3,19	0,32	0,31	0,075	2,57
17	-20	0.1	0.13	0,73	0,56	0,88	0,79	-19,55	-9,49	-11,43	-12,88	36,03	2,53	0,36	0,39	0,078	2,26
18	-20	0.1	0.15	0,75	0,59	0,88	0,81	-19,05	-7,72	-10,23	-11,73	37,47	2,3	0,42	0,43	0,078	2,17
19	10	0.15	0.03	0,38	0,16	0,6	0,44	13,25	15,06	14,16	14,22	47,83	1,76	0,1	0,1	0,092	4,23
20	10	0.15	0.05	0,45	0,24	0,69	0,53	13,85	17	15,46	15,42	48,86	2,19	0,11	0,16	0,094	4,83

21	10	0.15	0.07	0,47	0,3	0,73	0,59	13,92	18,51	16,53	16,33	47,88	2,14	0,19	0,2	0,098	4,76
22	10	0.15	0.1	0,57	0,39	0,78	0,65	14,35	21,63	18,79	18,31	42,11	2,44	0,26	0,28	0,096	4,16
23	10	0.15	0.13	0,62	0,46	0,81	0,69	15,93	24,76	21,07	20,3	36,17	2,49	0,35	0,36	0,093	3,54
24	10	0.15	0.15	0,66	0,49	0,82	0,71	16,21	26,35	22,23	21,33	35,75	2,67	0,38	0,39	0,088	3,2
25	20	0.1	0.03	0,41	0,22	0,54	0,48	-	-	-	-	28,71	0,28	-	-	-	-
26	20	0.1	0.05	0,53	0,33	0,68	0,64	-	-	-	-	41,79	0,43	-	-	-	-
27	20	0.1	0.07	0,58	0,39	0,74	0,72	-	-	-	-	47,56	0,81	-	-	-	-
28	20	0.1	0.1	0,64	0,49	0,8	0,73	-	-	-	-	43,27	1,44	0,17	0,26	0,144	5,32
29	20	0.1	0.13	0,71	0,56	0,84	0,77	-	-	-	-	37,47	1,43	0,32	0,34	0,133	4,18
30	20	0.1	0.15	0,74	0,59	0,85	0,79	-	-	-	-	38,5	1,35	0,35	0,38	0,13	4,02
<hr/>																	
Jw		Velocidade superficial da água (m/s)										ΔP^*		Perda de carga (modelo homogêneo) (KPa)			
Jo		Velocidade superficial do óleo (m/s)										ΔP^{**}		Perda de carga (Rodriguez e Oliemans (2006) (KPa)			
$\varepsilon_o \text{ exp}$		Fração volumétrica <i>in situ</i> do óleo experimental.										ΔP^{***}		Perda de carga (modelo proposto por esta pesquisa) (KPa)			
ε_o^*		Fração volumétrica <i>in situ</i> do óleo (modelo homogêneo).										λ_{exp}		Comprimento da onda experimental (mm)			
ε_o^{**}		Fração volumétrica <i>in situ</i> do óleo (Rodriguez e Oliemans (2006)).										α_{exp}		Amplitude da onda experimental (mm)			
ε_o^{***}		Fração volumétrica <i>in situ</i> do óleo (modelo proposto por esta pesquisa).										$C_{v \text{ exp}}$		Celeridade da onda experimental (m/s)			
ΔP_{exp}		Perda de carga experimental (KPa)										C_v^*		Celeridade da onda descrita por Wallis (1969) equação 4.31 (m/s)			

APÊNDICE C - INCERTEZA EXPERIMENTAL

A análise de incerteza serve para validar e quantificar a exatidão dos dados experimentais colhidos, já que erros sempre estão presentes quando se trata de medições experimentais. Os erros podem ser de dois tipos: o erro fixo ou sistemático é o mesmo para cada leitura e pode ser eliminado por calibração ou correção apropriada e o erro aleatório é diferente para cada leitura, depende de condições imprevisíveis e, por isso, não pode ser eliminado. O objetivo da análise de incerteza é estimar o erro aleatório provável nos resultados experimentais, ou seja, estimar a incerteza nas medições e nos resultados calculados devido a este tipo de erros. A estimativa deste tipo de incerteza tem três etapas (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2004):

1- Estimar o intervalo de incerteza das medidas

Por repetição: para dados normalmente distribuídos, mais de 99% dos dados medidos situam-se dentro de $\pm 3\sigma$, sendo σ o desvio padrão, 95% situam-se dentro de $\pm 2\sigma$, e 68% situam-se dentro de $\pm \sigma$.

Sem repetição: é usualmente mais ou menos a menor divisão da escala do instrumento de medida (contagem ou leitura mínima).

A incerteza pode ser definida como:

$$u_h = \pm \frac{\text{incerteza relativa}}{\text{medida}} \quad \text{C.1}$$

2- Estabelecer o limite de confiança de cada medida

A determinação do intervalo de confiança baseia-se no conceito de desvio-padrão para uma distribuição normal. Probabilidades de cerca de 20 por 1 correspondem a $\pm 2\sigma$ e de 3 para 1 correspondem a limites de confiança de $\pm \sigma$. Probabilidades de 20 por 1 são tipicamente usados nos trabalhos de engenharia.

3- Análise da propagação de incerteza nos cálculos

Supondo que a medição das variáveis $x_1, x_2, \dots, x_n$, é feita, a incerteza de cada variável medida é u_i . As medições são usadas para o cálculo de algum resultado, R . Em geral, R pode ser matematicamente expresso como $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Para analisar como os erros nas variáveis medidas $x_1, x_2, \dots, x_n$ propagam-se no cálculo de R , calcula-se o efeito sobre R de um erro na medição de um x_i individual de acordo com a formula (analogia com a derivada de uma função):

$$\delta R_i = \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \quad \text{C.2}$$

A variação relativa em R é:

$$\frac{\delta R_i}{R} = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\delta x_i}{x_i} \quad \text{C.3}$$

A Equação C.3 pode ser usada para estimar o intervalo de incerteza do resultado devido à incerteza em x_i . Introduzindo a notação de incerteza relativa, tem-se:

$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} u_{x_i} \quad \text{C.4}$$

A incerteza de R devida a combinação dos efeitos das incertezas em todos os x_i , pode ser representada por:

$$u_R = \pm \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{C.5}$$

Neste apêndice serão apresentados em detalhes os cálculos relativos à análise de incerteza experimental.

É necessário avaliar as incertezas devidas à instrumentação e conferir se essas se encontram dentro de uma faixa satisfatória. Foram calculadas as incertezas na obtenção experimental das velocidades superficiais das fases, razão de injeção, fração volumétrica *in situ*, deslizamento entre as fases, fator de atrito, viscosidade da mistura e queda de pressão.

C.1 Velocidades superficiais de água e óleo

Considera-se a incerteza relativa ou erro para a vazão de água, $\dot{Q}_w$, 1,25% da medida para o medidor de baixa vazão e 1,0% da medida para o medidor de alta vazão.

Para a vazão de óleo, $\dot{Q}_o$, a incerteza relativa considera-se 0,5% da medida de vazão tanto para o medidor de média vazão quanto para o de baixa. Os valores de incerteza relativa tanto para vazão de água como de óleo foram obtidos a partir dos manuais de especificações da OVAL de cada medidor. Sendo assim a incerteza na medição de vazão de água é constante e igual a 1,0% ou 1,25%, dependendo do medidor usado para a medição, e a incerteza na medição de vazão de óleo constante e igual a 0,5%.

Tendo as velocidades superficiais de água e óleo definidas respectivamente por:

$$U_{ws} = \frac{\dot{Q}_w}{A}, U_{os} = \frac{\dot{Q}_o}{A} \quad \text{C.6}$$

Desprezando a incerteza na medição do diâmetro interno do tubo, tem-se:

$$U_{ws} = U_{ws}(\dot{Q}_w), U_{os} = U_{os}(\dot{Q}_o) \quad \text{C.7}$$

Sendo assim, a incerteza na medição das velocidades superficiais de água e óleo igual à incerteza na medição das vazões.

$$u_{U_w} = u_{Q_w}, u_{U_o} = u_{Q_o} \quad \text{C.8}$$

Assim, tem-se a incerteza na medição das velocidades superficiais de água, para as medidas feitas com o medidor de baixa e alta vazão, respectivamente:

$$u_{U_w} = \pm 1,25\% \quad \text{C.9}$$

$$u_{U_w} = \pm 1,0\% \quad \text{C.10}$$

e a incerteza na medição das velocidades superficiais de óleo:

$$u_{U_o} = \pm 0,5\% \quad \text{C.11}$$

C.2 Fração volumétrica *in situ* do óleo

A incerteza na medição da fração volumétrica de óleo ε_o pela técnica da válvula de fechamento rápido é dada pela incerteza em cada uma das quatro medidas de volume de óleo efetuadas, e a medida do volume total da linha, representadas pelo erro da bureta utilizada.

O volume total de óleo medido para cada ponto é dado por:

$$V_o = V_{o1} + V_{o2} + V_{o3} + V_{o4} \quad \text{C.12}$$

Onde V_o é o volume total de óleo e V_{o1} , V_{o2} , V_{o3} , V_{o4} são os volumes de óleo na primeira, segunda, terceira e quarta medida respectivamente.

A incerteza na medição de V_o poderia ser estimada através da seguinte expressão:

$$u_{V_o} = \pm \left[\left(\frac{V_{o1}}{V_o} \frac{\partial V_o}{\partial V_{o1}} u_{V_{o1}} \right)^2 + \left(\frac{V_{o2}}{V_o} \frac{\partial V_o}{\partial V_{o2}} u_{V_{o2}} \right)^2 + \left(\frac{V_{o3}}{V_o} \frac{\partial V_o}{\partial V_{o3}} u_{V_{o3}} \right)^2 + \left(\frac{V_{o4}}{V_o} \frac{\partial V_o}{\partial V_{o4}} u_{V_{o4}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{C.13}$$

Sendo:

$$\frac{\partial V_o}{\partial V_{o1}} = \frac{\partial V_o}{\partial V_{o2}} = \frac{\partial V_o}{\partial V_{o3}} = \frac{\partial V_o}{\partial V_{o4}} = 1 \quad \text{C.14}$$

A incerteza na medição de V_{o1} , V_{o2} , V_{o3} , V_{o4} é dada por:

$$u_{V_{o1}} = \pm \frac{10\text{mL}}{V_{o1}} \quad \text{C.15}$$

$$u_{V_{o2}} = \pm \frac{10\text{mL}}{V_{o2}} \quad \text{C.16}$$

$$u_{V_{o3}} = \pm \frac{10\text{mL}}{V_{o3}} \quad \text{C.17}$$

$$u_{V_{o4}} = \pm \frac{10\text{mL}}{V_{o4}} \quad \text{C.18}$$

Substituindo as Equações C.14 a C.18 na Equação C.13 a incerteza na medida do volume de óleo é dado por:

$$u_{V_o} = \pm \left[\left(\pm \frac{10\text{mL}}{V_o} \right)^2 + \left(\pm \frac{10\text{mL}}{V_o} \right)^2 + \left(\pm \frac{10\text{mL}}{V_o} \right)^2 + \left(\pm \frac{10\text{mL}}{V_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{C.19}$$

Substituindo os valores do volume total de óleo de cada medição, V_o , tem-se a faixa de incerteza na medição de V_o :

$$\pm 0,0082 < u_{V_o} < \pm 0,0243 \quad \text{C.20}$$

Ou seja a faixa de incerteza varia entre $\pm 0,82\%$ e $\pm 2,43\%$.

A medida do volume total da linha V , é composta por quatro medidas. A bureta tem 2000 mL e o volume total da linha é aproximadamente 6400 mL. Assim são necessárias quatro medidas. Assim o volume total da linha é dado pela seguinte expressão:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad \text{C.21}$$

Na qual V é o volume total da linha, igual a 6400 mL, V_1 , V_2 , V_3 são os volumes da primeira, segunda e terceira medida, igual a 2000 mL e V_4 é o volume da quarta medida, igual a 400 mL.

A incerteza na medição de V poderia ser estimada através da seguinte expressão:

$$u_V = \pm \left[\left(\frac{V_1}{V} \frac{\partial V}{\partial V_1} u_{V_1} \right)^2 + \left(\frac{V_2}{V} \frac{\partial V}{\partial V_2} u_{V_2} \right)^2 + \left(\frac{V_3}{V} \frac{\partial V}{\partial V_3} u_{V_3} \right)^2 + \left(\frac{V_4}{V} \frac{\partial V}{\partial V_4} u_{V_4} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{C.22}$$

Sendo:

$$\frac{\partial V}{\partial V_1} = \frac{\partial V}{\partial V_2} = \frac{\partial V}{\partial V_3} = \frac{\partial V}{\partial V_4} = 1 \quad \text{C.23}$$

A incerteza na medição de V_1 , V_2 , V_3 e V_4 é dada por:

$$u_{V_1} = \pm \frac{10mL}{V_1} \quad C.24$$

$$u_{V_2} = \pm \frac{10mL}{V_2} \quad C.25$$

$$u_{V_3} = \pm \frac{10mL}{V_3} \quad C.26$$

$$u_{V_4} = \pm \frac{10mL}{V_4} \quad C.27$$

Substituindo as Equações C.23 a C.27 na Equação C.22 têm-se:

$$u_V = \pm \left[\left(\pm \frac{10mL}{V} \right)^2 + \left(\pm \frac{10mL}{V} \right)^2 + \left(\pm \frac{10mL}{V} \right)^2 + \left(\pm \frac{10mL}{V} \right)^2 \right]^{1/2} \quad C.28$$

Sendo V constante e igual a 6400 mL, tem-se assim a incerteza na medição de V :

$$u_V = \pm 0,54 \% \quad C.29$$

Como o volume da linha é constante a fração volumétrica de óleo é dada por:

$$\varepsilon_o = \frac{V_o}{V} \quad C.30$$

E a incerteza na medição de ε_o poderia ser dada pela seguinte expressão:

$$u_{\varepsilon_o} = \pm \left[\left(\frac{V_o}{\varepsilon_o} \frac{\partial \varepsilon_o}{\partial V_o} u_{V_o} \right)^2 + \left(\frac{V}{\varepsilon_o} \frac{\partial \varepsilon_o}{\partial V} u_V \right)^2 \right]^{1/2} \quad C.31$$

Sendo:

$$\frac{\partial \varepsilon_o}{\partial V_o} = \frac{1}{V} \quad C.32$$

$$\frac{\partial \varepsilon_o}{\partial V} = -\frac{V_o}{V^2} \quad \text{C.33}$$

Substituindo as Equações C.30, C.32 e C.33 na Equação C.31 têm-se:

$$u_{\varepsilon_o} = \pm \left[\left(u_{V_o} \right)^2 + \left(u_V \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{C.34}$$

Assim, substituindo a Equação C.20 e a Equação C.29 na Equação C.34, têm-se a faixa de incerteza na medição de ε_o :

$$\pm 0,0088 < u_{\varepsilon_o} < \pm 0,0258 \quad \text{C.35}$$

Ou seja, a faixa de incerteza varia entre $\pm 0,88\%$ e $\pm 2,58\%$.

C.3 Perda de carga.

Considera-se a incerteza relativa para a queda de pressão, ΔP , a menor divisão de escala do manômetro tipo U utilizado para a calibração do transdutor de pressão. Assim a incerteza relativa é de $\pm 0,5\%$. De acordo com as medidas de perda de pressão realizadas, a incerteza na medição da queda de pressão bifásica, ΔP , e monofásica de água, ΔP_w , variou dentro da seguinte faixa, respectivamente:

$$\pm 0,002 < u_{\Delta P} < \pm 0,0172 \quad \text{C.43}$$

ou seja, $\pm 0.2\%$ para a maior e $\pm 1.72\%$ para a menor perda de pressão bifásica medida.

$$\pm 0,0021 < u_{\Delta P_w} < \pm 0,0128 \quad \text{C.44}$$

ou seja, $\pm 0,21\%$ para a maior e $\pm 1,28\%$ para a menor perda de pressão monofásica de água medida.

APÊNDICE D - PROGRAMA LABVIEW

D.1 Binariza e apara

D.2 Filtra e normaliza

D.3 Cálculo do comprimento e amplitude da onda.

D.4 Cálculo da celeridade da onda

APÊNDICE E - PROGRAMA PARA O TRATAMENTO DOS DADOS DE FRAÇÃO VOLUMETRICA IN SITU E PERDA DE CARGA

E.1 Interface plana(modelo de Rodriguez e oliemans (2006))

(*Nível da agua adimensional, perímetros molhados e áreas das fases*)

$$\begin{aligned} H[ha_] &:= 2ha - 1; Si[ha_] := Di\sqrt{1 - H[ha]^2}; \\ So[ha_] &:= DiArcCos[H[ha]]; \\ Sw[ha_] &:= Di(\pi - ArcCos[H[ha]]); \\ Ao[ha_] &:= \frac{1}{4}Di^2(ArcCos[H[ha]] - H[ha]\sqrt{1 - H[ha]^2}); \\ Aw[ha_] &:= \frac{1}{4}Di^2(-ArcCos[H[ha]] + H[ha]\sqrt{1 - H[ha]^2} + \pi); \end{aligned}$$

(*fração volumetrica das fases*)

$$Rw[ha_] := \frac{Aw[ha]}{\frac{\pi Di^2}{4}}; Ro[ha_] := \frac{Ao[ha]}{\frac{\pi Di^2}{4}};$$

(*velocidade in situ das fases*)

$$Uw[ha_ , Uws_] := \frac{Uws}{Rw[ha]}; Uo[ha_ , Uos_] := \frac{Uos}{1 - Rw[ha]};$$

(*diâmetro hidraulico*)

$$\begin{aligned} Dh_w[ha_ , Uws_ , Uos_] &:= \frac{4Aw[ha]}{Si[ha] + Sw[ha]} (1 + (1 + \exp[t(1 - s[ha, Uws, Uos])])^{-1} \frac{Si[ha]}{Sw[ha]}); \\ Dho[ha_ , Uws_ , Uos_] &:= \frac{4Ao[ha]}{So[ha]} (1 - (1 + \exp[t(1 - s[ha, Uws, Uos])])^{-1} \frac{Si[ha]}{So[ha] + Si[ha]}); \end{aligned}$$

(*n. de reynolds*)

$$\begin{aligned} Rew[ha_ , Uws_ , Uos_] &:= \frac{row * Dh_w[ha, Uws, Uos] * Abs[Uw[ha, Uws]]}{miw} \\ Reo[ha_ , Uws_ , Uos_] &:= \frac{roo * Dho[ha, Uws, Uos] * Abs[Uo[ha, Uos]]}{mio} \end{aligned}$$

(*fator de atrito de churchil*)

$$\begin{aligned} fw[ha_ , Uws_ , Uos_] &:= 8 \left(\left(\frac{1}{Rew[ha, Uws, Uos]} \right)^{12} + \left(\frac{1}{(A[ha, Uws, Uos] + B[ha, Uws, Uos])^2} \right)^3 \right)^{\frac{1}{12}}; \\ A[ha_ , Uws_ , Uos_] &:= (2.45 \log \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{Rew[ha, Uws, Uos]} \right)^{0.9} + 0.27 \left(\frac{e}{Dh_w[ha, Uws, Uos]} \right)} \right])^{16}; \\ B[ha_ , Uws_ , Uos_] &:= \left(\frac{37530}{Rew[ha, Uws, Uos]} \right)^{16}; \end{aligned}$$

fo[ha_, Uws_, Uos_]:

$$= 8 \left(\frac{8}{\text{Reo}[ha, Uws, Uos]} \right)^{12} + \left(\frac{1}{(\text{Ao}[ha, Uws, Uos] + \text{Bo}[ha, Uws, Uos])^{\frac{3}{2}}}} \right)^{\frac{1}{12}};$$

$$\text{Ao}[ha_, Uws_, Uos_] := (2.45 \text{Log}[\frac{7}{(\text{Reo}[ha, Uws, Uos])^{0.9} + 0.27(\frac{e}{\text{Dho}[ha, Uws, Uos]})}])^{16};$$

$$\text{Bo}[ha_, Uws_, Uos_] := (\frac{37530}{\text{Reo}[ha, Uws, Uos]})^{16};$$

(*tensão cisalhante*)

$$\text{tw}[ha_, Uws_, Uos_] := \text{fw}[ha, Uws, Uos] * \frac{\text{row} * (\text{Uw}[ha, Uws])^2}{8};$$

$$\text{to}[ha_, Uws_, Uos_] := \text{fo}[ha, Uws, Uos] * \frac{\text{roo} * (\text{Uo}[ha, Uos])^2}{8};$$

$$\begin{aligned} \text{ti}[ha_, Uws_, Uos_] &:= (\text{fw}[ha, Uws, Uos] * \text{row} * \frac{1}{8} ((\text{Uw}[ha, Uws] - \text{Uo}[ha, Uos]) \\ &* \text{Abs}[(\text{Uw}[ha, Uws] - \text{Uo}[ha, Uos])])) /; \text{Uw}[ha, Uws] \geq \text{Uo}[ha, Uos]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ti}[ha_, Uws_, Uos_] &:= (\text{fo}[ha, Uws, Uos] * \text{roo} * \frac{1}{8} ((\text{Uw}[ha, Uws] - \text{Uo}[ha, Uos]) \\ &* \text{Abs}[(\text{Uw}[ha, Uws] - \text{Uo}[ha, Uos])])) /; \text{Uw}[ha, Uws] < \text{Uo}[ha, Uos]; \end{aligned}$$

(*função pra predição das frações volumétricas in situ*)

$$\begin{aligned} \text{feq}[ha_, Uws_, Uos_, \text{beta}_]: &= - \frac{\text{tw}[ha, Uws, Uos] * \text{Sw}[ha]}{\text{Aw}[ha]} + \frac{\text{to}[ha, Uws, Uos] * \text{So}[ha]}{\text{Ao}[ha]} \\ &- \text{ti}[ha, Uws, Uos] * \text{Si}[ha] * (\frac{1}{\text{Aw}[ha]} + \frac{1}{\text{Ao}[ha]}) - (\text{row} - \text{roo}) * g \\ &* \text{Sin}[\text{beta}]; \end{aligned}$$

(*Calculo da altura da camada de agua adimensional (hafinal = hfinal / Di) em funcao das velocidades superficiais das fases*)

$$\begin{aligned} \text{hafinal}[Uws_, Uos_, \text{beta}_] &:= \text{FindRoot}[\text{feq}[x, Uws, Uos, \text{beta}] = \\ &= 0.000001, \{x, \text{hamin}, \text{hamax}\}][[1, 2]] \end{aligned}$$

(*frações volumétricas in situ*)

$$\text{Rw}[\text{hafinal}[0.15, 0.05, 20]]$$

(*gradiente de perda de carga bifásica*)

$$\begin{aligned} \text{dpdxw}[ha_, Uws_, Uos_, \text{beta}_]: &= \frac{1}{\text{Aw}[ha]} (\text{tw}[ha, Uws, Uos] \text{Sw}[ha] + \text{ti}[ha, Uws, Uos] \text{Si}[ha] \\ &+ \text{rowAw}[ha] g \text{Sin}[\text{beta}]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{dpdxo}[ha_, Uws_, Uos_, \text{beta}_]: &= \frac{1}{\text{Ao}[ha]} (\text{to}[ha, Uws, Uos] \text{So}[ha] - \text{ti}[ha, Uws, Uos] \text{Si}[ha] \\ &+ \text{rooAo}[ha] g \text{Sin}[\text{beta}]) \end{aligned}$$

E.2 Interface curva (modelo proposto por essa pesquisa)

(*Nível da água adimensional considerando o ângulo de contato e a interfase curva, perímetros molhados e áreas das fases*)

$$\text{road}[\text{ha}_-] := (\text{A1} - \text{B1} \exp[\frac{-\text{Eo}}{\text{C11}}]) \exp[\text{D11}(\text{g1}[\text{ha}](\text{a1} - \text{ha}) + (1 - \text{g1}[\text{ha}])(\text{ha} + \text{b1}))];$$

$$\text{A1} = 0.2226 + 1.0538 \exp[-\frac{\text{Sin}[\text{tetarad}]}{0.2644}];$$

$$\text{B1} = 0.218 + 2.176 \exp\left[-\frac{\text{Sin}[\text{tetarad}]}{0.1565}\right];$$

$$\text{C11} = 62.2645 - 14.896 \exp[-\frac{\text{Sin}[\text{tetarad}]}{0.5337}];$$

$$\text{D11} = 3.5553 + 0.0002725 \exp[\frac{\text{Sin}[\text{tetarad}]}{0.0996}];$$

$$\text{g1}[\text{ha}_-] := \frac{1}{1 + \exp[-\text{t1}(\frac{\text{ha}}{\text{halim}} - 1)]} /. \text{t1} \rightarrow 50;$$

$$\text{halim} = 0.9054 - \frac{0.8108}{1 + e^{3.8462(-1.5708 + \text{tetarad})}};$$

$$\text{a1} = 1.7722 - \frac{0.7823}{1 + e^{9.2132(-1.88 + \text{tetarad})}};$$

$$\text{b1} = -0.0096 + \frac{0.7829}{1 + e^{9.2132(-1.2594 + \text{tetarad})}};$$

$$\text{Sw}[\text{ha}_-] := 2(\text{Di}/2)\text{phi}[\text{ha}];$$

$$\text{So}[\text{ha}_-] := 2(\text{Di}/2)(\pi - \text{phi}[\text{ha}]);$$

$$\text{Si}[\text{ha}_-] := 2(\text{road}[\text{ha}]\text{Di})\text{phiastpi}[\text{ha}];$$

$$\text{Aw}[\text{ha}_-] := \text{Di}^2 \left(\frac{1}{4} (\text{phi}[\text{ha}] - 0.5 \text{Sin}[2\text{phi}[\text{ha}]]) + \text{road}[\text{ha}]^2 (\text{phiastpi}[\text{ha}] - 0.5 \text{Sin}[2\text{phiastpi}[\text{ha}]]) \right) /; 0.01 \leq \text{ha} < \text{halim};$$

$$\text{Aw}[\text{ha}_-] := \text{Di}^2 \left(\frac{1}{4} (\text{phi}[\text{ha}] - 0.5 \text{Sin}[2\text{phi}[\text{ha}]]) - \text{road}[\text{ha}]^2 (\text{phiastpi}[\text{ha}] - 0.5 \text{Sin}[2\text{phiastpi}[\text{ha}]]) \right) /; \text{halim} \leq \text{ha} \leq 0.99;$$

$$Ao[ha_] := \frac{\pi Di^2}{4} - Aw[ha];$$

$$phiastpi[ha_]:= ArcSin[\frac{1}{2road[ha]} Sin[phi[ha]]];$$

$$hageo[ha_ , phi_] := 0.5(1 - Cos[phi]) + road[ha](1 - Cos[ArcSin[\frac{1}{2road[ha]} Sin[phi]]])/; 0.01 \leq ha < halim;$$

$$hageo[ha_ , phi_] := 0.5(1 - Cos[phi]) - road[ha](1 - Cos[ArcSin[\frac{1}{2road[ha]} Sin[phi]]])/; halim \leq ha \leq 0.99;$$

$$phicalc[ha_ , phi_]:= ha - hageo[ha, phi];$$

$$phi1[ha_]:= Module[{s, res1}, s = FindRoot[phicalc[ha, phi] = 0.000001, {phi, 0.01, 3.1416}][[1, 2]]; res1 = s]$$

(*equação para o valor de Ck*)

$$ampli1[ha_ , Ck1_ , beta_ , ampli_]:= Ck1 * \frac{ampli}{Di};$$

(*tensão interfacial proposta*)

$$ti[ha_ , Uws_ , Uos_ , Ck1_ , beta_ , ampli_] := (fw[ha, Uws, Uos] * (1 + ampli1[ha, Ck1, beta, ampli])) * row * \frac{1}{8} ((Uw[ha, Uws] - Uo[ha, Uos]) * Abs[(Uw[ha, Uws] - Uo[ha, Uos])])/; Uw[ha, Uws] \geq Uo[ha, Uos];$$

$$ti[ha_ , Uws_ , Uos_ , Ck1_ , beta_ , ampli_]: = (fo[ha, Uws, Uos] * (1 + ampli1[ha, Ck1, beta, ampli])) * roo * \frac{1}{8} ((Uw[ha, Uws] - Uo[ha, Uos]) * Abs[(Uw[ha, Uws] - Uo[ha, Uos])])/; Uw[ha, Uws] < Uo[ha, Uos];$$

(*os outros parâmetros não considerados nesta seção são calculadas como no modelo de Rodriguez e Oliemans*)

(*Calculo da altura da camada de agua adimensional (hafinal = hfinal / Di) em funcao das velocidades superficiais das fases*)

$$\begin{aligned}
& \text{feq}[ha_ , Uws_ , Uos_ , Ck1_ , beta_ , ampli_]: \\
& = - \frac{tw[ha, Uws, Uos] * Sw[ha]}{Aw[ha]} + \frac{to[ha, Uws, Uos] * So[ha]}{Ao[ha]} \\
& - ti[ha, Uws, Uos, Ck1, beta, ampli] * Si[ha] * \left(\frac{1}{Aw[ha]} + \frac{1}{Ao[ha]} \right) - (row \\
& - roo) * g * Sin[beta];
\end{aligned}$$

(*Calculo da altura da camada de agua adimensional (hafinal = hfinal / Di) em funcao das velocidades superficiais das fases*)

$$\begin{aligned}
& hafinal[Uws_ , Uos_ , Ck1_ , beta_ , ampli_]: = \text{FindRoot}[feq[x, Uws, Uos, Ck1, beta, ampli] = \\
& = 0.000001, \{x, hamin, hamax\}][[1,2]]
\end{aligned}$$

(*frações volumétricas in situ*)

$$Rw[hafinal[Uws_ , Uos_ , Ck1_ , beta_ , ampli_]]$$

(*gradiente de pressão bifasico*)

$$\begin{aligned}
& dpdxo[ha_ , Uws_ , Uos_ , Ck1_ , beta_ , ampli_]: \\
& = \frac{1}{Ao[ha]} (to[ha, Uws, Uos]So[ha] - ti[ha, Uws, Uos, Ck1, beta, ampli]Si[ha] \\
& + rooAo[ha]gSin[beta])
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& dpdxw[ha_ , Uws_ , Uos_ , Ck1_ , beta_ , ampli_]: \\
& = \frac{1}{Aw[ha]} (tw[ha, Uws, Uos]Sw[ha] + ti[ha, Uws, Uos, Ck1, beta, ampli]Si[ha] \\
& + rowAw[ha]gSin[bet
\end{aligned}$$

(*calculo para encontrar o valor da constante Ck – holdup *)

$$\text{errortotNEW1}[Ck1 \]$$

$$:= \text{Sum} \left[\left(\left(Rw \left[hafinal \left[uws[[i]], uos[[i]], Ck1, beta2[[i]], ampli[[i]] \right] \right] - Rwexp[[i]] \right) / Rwexp[[i]] \right)^2, \right. \\
\left. \{i, 1, \text{Length}[Rwexp]\} \right]$$

$$\text{teste1} = \text{Table}[\text{errortotNEW1}[Ck1], \{Ck1, 0, 1000, 100\}]$$

$$ck1list1 = \text{Table}[i, \{i, 0, 1000, 100\}];$$

$$\text{erromin1} = \text{Transpose}[\{ck1list1, teste1\}];$$

(*calculo para encontrar o valor da constante Ck – gradiente de pressão bifasico *)

```

errortotNEW2[Ck1_]
:= Sum[(dpdxw[hafinal[uws[[i]], uos[[i]], Ck1, beta2[[i]], ampli[[i]]], uws[[i]], uos[[i]], Ck1, beta2[[i]],
      ampli[[i]] - dpdxwexp[[i]])^2,
{i, 1, Length[dpdxwexp]]]

teste2 = Table[errortotNEW2[Ck1], {Ck1, 0, 1000, 100}]

ck1list2 = Table[i, {i, 0, 100, 10}];

erromin2 = Transpose[{ck1list2, teste2}];

```

E.3 Equação de instabilidade do escoamento estratificado

(*derivadas*)

```

fRw[Uws_, Uos_, Ck1_, beta_, ampli_] := Module[{DD}, {DD
= hafinal[Uws, Uos, Ck1, beta, ampli]};  $\frac{1}{0.0001}$  (feq[DD
+  $\frac{0.0001}{2}$ , Uws, Uos, Ck1, beta, ampli] - feq[DD
-  $\frac{0.0001}{2}$ , Uws, Uos, Ck1, beta, ampli])];

```

```

fUws[Uws_, Uos_, Ck1_, beta_, ampli_] := Module[{FF}, {FF
= hafinal[Uws, Uos, Ck1, beta, ampli]};

```

```

 $\frac{1}{Uws0.001}$  (feq[FF,  $\frac{0.001Uws}{2}$  + Uws, Uos, Ck1, beta, ampli] - feq[FF, Uws
-  $\frac{Uws0.001}{2}$ , Uos, Ck1, beta, ampli])];

```

```

fUos[Uws_, Uos_, Ck1_, beta_, ampli_] := Module[{GG}, {GG
= hafinal[Uws, Uos, Ck1, beta, ampli]};  $\frac{1}{Uos0.001}$  (feq[GG, Uws, Uos
+  $\frac{Uos0.001}{2}$ , Ck1, beta, ampli] - feq[GG, Uws, Uos
-  $\frac{Uos0.001}{2}$ , Ck1, beta, ampli])];

```

(*celeridade da onda cinemática*)

$$\begin{aligned}
h[Uws_ , Uos_ , Ck1_ , beta_ , ampli_] &:= \text{Module}[\{CC\}, \{CC \\
&= \text{hafinal}[Uws, Uos, Ck1, beta, ampli]; (\frac{(\pi Di^2) fRw[Uws, Uos, Ck1, beta, ampli]}{4Si[CC]} \square \\
&- Uw[CC, Uws] fUws[Uws, Uos, Ck1, beta, ampli] \square \\
&+ Uo[CC, Uos] fUos[Uws, Uos, Ck1, beta, ampli] \square / (fUos[Uws, Uos, Ck1, beta, ampli] \\
&- fUws[Uws, Uos, Ck1, beta, ampli])
\end{aligned}$$

(*coeficientes da equação 4.24*)

(*M*)

$$\text{eme}[ha_] := \sigma * ((\pi Di^2 / 4) / Si[ha]);$$

(*N*)

$$n[ha_] := \frac{\text{row}}{Rw[ha]} + \frac{\text{roo}}{Ro[ha]};$$

(*E*)

$$\begin{aligned}
\text{ecf}[ha_ , Uws_ , Uos_ , jw_ , jo_] &:= \\
&= \frac{1}{2} * (\frac{\text{row}Uw[ha, Uws]}{Rw[ha]} (1 + Kw[Uws, Uos, jw]) + \frac{\text{roo}Uo[ha, Uos]}{Ro[ha]} (1 \\
&+ Ko[Uws, Uos, jo]));
\end{aligned}$$

$$\text{ecftra} \left[ha_{, Uws, Uos} \right] := \frac{\text{row}Uw[ha, Uws]}{Rw[ha]} + \frac{\text{roo}Uo[ha, Uos]}{Ro[ha]}$$

(*F*)

$$\begin{aligned}
f[ha_ , Uws_ , Uos_ , jw_ , jo_] &:= \\
&= \frac{\text{row}Uw[ha, Uws]^2}{Rw[ha]} (Kw[Uws, Uos, jw] \\
&- ((\pi Di^2 / 4) / Si[ha]) Rw[ha] dkwd[Uws, Uos, jw]) \\
&+ \frac{\text{roo}Uo[ha, Uos]^2}{Rw[ha]} (\frac{Rw[ha]}{Ro[ha]} Ko[Uws, Uos, jo] \\
&+ ((\pi Di^2 / 4) / Si[ha]) Rw[ha] dkod[Uws, Uos, jo]) - ((\pi Di^2 / 4) / Si[ha]) ((\text{row} \\
&- \text{roo}) gCos[beta] (* - \text{rof}[ha, Uws, Uos] (Uw[ha, Uws] \\
&- Uo[ha, Uos])^2 C_{ss} Si[ha] (\frac{1}{Aw[ha]} + \frac{1}{Ao[ha]}) *) - C_{tt} \frac{\sigma}{(\text{road}[ha] Di)^2}
\end{aligned}$$

ftra[ha_, Uws_, Uos_]:

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{rowUw[ha, Uws]}^2}{\text{Rw[ha]}} + \frac{\text{rooUo[ha, Uos]}^2}{\text{Ro[ha]}} - ((\pi \text{Di}^2/4)/\text{Si[ha]})(\text{row} \\
 &\quad - \text{roo})g\text{Cos[beta]}(* - \text{rof[ha, Uws, Uos]}(\text{Uw[ha, Uws]} \\
 &\quad - \text{Uo[ha, Uos]})^2\text{CssSi[ha]}(\frac{1}{\text{Aw[ha]}} + \frac{1}{\text{Ao[ha]}})^*) - \text{Ctt}\frac{\sigma}{(\text{road[ha]Di})^2});
 \end{aligned}$$

(*G*)

gcf[Uws_, Uos_, Ck1_, beta_, ampli_] := fUos[Uws, Uos, Ck1, beta, ampli] - fUws[Uws, Uos, Ck1, beta, ampli]

$$\text{vo[ha_, Uws_, Uos_, jw_, jo_]} := \frac{\text{ecf[ha, Uws, Uos, jw, jo]}}{n[\text{ha}]}$$

$$\text{votra[ha_, Uws_, Uos_]} := \frac{\text{ecftra[ha, Uws, Uos]}}{n[\text{ha}]}$$