

Simulação Computacional e Estudo Experimental da Transição do Escoamento
Estratificado para Intermitente em Tubos Horizontais

Antônio Salvador Neto

PROPOSTA DE PROJETO DE GRADUAÇÃO

Aprovada por:

Prof. Orientador, Jian Su, D.Sc.

Prof. Atila Pantaleão Silva Freire, Ph.D.

Prof. Juliana Braga Rodrigues Loureiro, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Março de 2013

Simulação Computacional e Estudo Experimental da Transição do Escoamento
Estratificado para Intermitente em Tubos Horizontais

Antônio Salvador Neto

PROPOSTA DE PROJETO DE GRADUAÇÃO

Aprovada por:

Prof. Orientador, Jian Su, D.Sc.

Prof. Atila Pantaleão Silva Freire, Ph.D.

Prof. Juliana Braga Rodrigues Loureiro, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Março de 2013

Neto, Antônio Salvador

Simulação Computacional e Estudo Experimental da
Transição do Escoamento Estratificado para Intermitente
em Tubos Horizontais /

Antônio Salvador Neto - Rio de Janeiro: UFRJ/

Escola Politécnica, 2013.

ix, 75p. 29,7cm.

Orientador: Su Jian, D.Sc.

Projeto de Graduação - UFRJ/Escola Politécnica/

Curso de Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas, p. 62.

1. Escoamento multifásico. 2. CFD. 3. Ultrassom.

Ao meu avô Antônio Salvador por ter me dado um nome e um exemplo de vida.

Agradecimentos

Agradeço aos profissionais do Instituto de Engenharia Nuclear por tornarem este trabalho possível.

Agradeço aos parentes, professores, colegas de quarto, amigos e amigas que me ajudaram direta e indiretamente com compreensão e paciência.

Agradeço Leonardo Abreu Jorge Justo por ter sido sempre inspiração para meus estudos.

Agradeço Amanda Briggs, Felipe Celestino e Lucilla Almeida pela ajuda inestimável e principalmente a José Luiz Horacio Faccini por tudo que tem me ensinado.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ESTUDO EXPERIMENTAL DA
TRANSIÇÃO DO ESCOAMENTO ESTRATIFICADO PARA INTERMITENTE
EM TUBOS HORIZONTAIS

Antônio Salvador Neto

Março/2013

Orientador: Su Jian

Curso: Engenharia Mecânica

Diversas formas de escoamentos envolvendo mais de uma fase podem ser observadas na natureza. Na prática de engenharia o estudo de escoamentos bifásicos são importantes para se estimar o comportamento mecânico do escoamento em reatores nucleares, no transporte de gás e óleo e alguns ciclos de refrigeração.

Estimar o tipo de regime de escoamento irá acontecer no interior da tubulação é algo difícil pois este tipo de fenômeno depende fortemente de parâmetros particulares.

A proposta deste trabalho é simular e realizar experimentos para caracterizar a transição entre os regimes de escoamento estratificado e intermitente usando um software comercial de CFD e técnica de medição de princípio ultrassônico em um tubo horizontal.

Palavras-chave: Escoamento multifásico, CFD, Experimental, Método ultrassônico .

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a requirement towards a degree in Mechanical Engineering

COMPUTATIONAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION
OF TRANSITION BETWEEN ESTRATIFIED AND INTERMITTENT FLOW IN
AN HORIZONTAL PIPE

Antônio Salvador Neto

Março/2013

Advisor: Su Jian

Course: Mechanical Engineering

We can observe many kinds of multiphase-flow in the nature. In engineering the study of two-phase flow is important for estimate the mechanical behavior mainly in nuclear reactors, gas-oils transport and refrigerators machines.

Estimate what kind of regime flow going happening in a pipe is difficult because this phenomenon depends strongly on the particular parameters.

The propose of this work is simulate and experiment the transition between the stratified and intermittent flow using a commercial CFD software and ultrasonic technique in a horizontal pipe.

Keywords: multiphase-flow, CFD, Ultrasonic measurement,

Sumário

Dedicatória	v
Agradecimento	vi
Resumo	vii
Abstract	vii
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xii
Lista de Símbolos	xiii
0.1 Letras Maiúsculas	xiii
0.2 Letras Minúsculas	xiv
0.3 Subscrito	xiv
1 Introdução	1
2 Fundamentos	3
2.1 Fundamentos de Escoamento Bifásico	3
2.1.1 Padrões de Escoamento	5
2.1.2 Mapas de Escoamento	6
2.2 Fundamentos de Ultrassom	7
2.3 Dinâmica dos Fluidos Computacional	10

3	Revisão Bibliográfica	18
3.1	Técnicas de Medição	18
3.1.1	Técnicas Ultrassônicas para Escoamentos Multifásicos	19
3.2	Modelo Teórico de Taitel e Dukler (1976) Para o Escoamento Estratificado e Transição para Intermitente	21
3.3	Modelo Experimental de Mandhane et al. (1974)	25
3.4	Abordagem e Modelos da Simulação Numérica	26
3.4.1	Equações do Modelo Euleriano	27
3.4.2	Discretização	29
4	Equipamento e Procedimento Experimental	30
4.1	Descrição Geral da Montagem do Equipamento	30
4.1.1	Seção Bifásica	31
4.1.2	Circuitos de Água e de Ar Comprimido	32
4.1.3	Sistema de Controle e Aquisição dos Dados	34
4.1.4	Sistema Ultrassônico	35
4.2	Procedimento Experimental	37
4.2.1	Operação da seção bifásica	37
4.2.2	Execução do Experimento	37
4.3	Tratamento dos Dados Experimentais	38
5	Procedimentos da Simulação	43
5.1	Geometria e Malha	43
5.2	Configurações	46
5.3	Processamento dos Resultados	46
6	Análise dos Resultados	48
6.1	Resultados dos Experimentos	48
6.2	Resultados da Simulação	55
7	Conclusões e Sugestões	59
	Referências Bibliográficas	61

Lista de Figuras

2.1	Padrões de escoamentos bifásicos em tubulações horizontais	7
2.2	Mapa de Padrão de escoamento baseado em dados experimentais (Mandhane)	8
2.3	Mapa de padrão de escoamento com base teorica (Taitel e Dukler) . .	8
2.4	Comportamento teórico da onda ultrassônica	10
3.1	Exemplo de sinal ultrassônico por técnica de pulso eco	21
3.2	Escoamento estratificado em equilíbrio	22
3.3	Instabilidade do regime estratificado	24
4.1	Esquema do sistema bifásico experimental.	30
4.2	Misturador água-ar.	31
4.3	Sistema de controle e aquisição de dados.	31
4.4	Circuito de água	33
4.5	Dados obtidos em um teste com ULS 0,1214 e UGS 1,0547	39
4.6	Histograma dos valores obtidos em um teste com ULS 0,1214 e UGS 1,0547	40
4.7	Exemplo de comportamento na região de transição	41
4.8	Exemplo de comportamento na região intermitente	42
5.1	Geometria	44
5.2	Geometria e Blocos	45
5.3	Malha	45
6.1	Mapa de padrão de escoamento com resultados dos experimentos . . .	50
6.2	ULS contra altura de líquido para UGS em torno de 1,0 m/s	50

6.3	ULS contra altura de líquido para UGS em torno de 1,3m/s	51
6.4	ULS contra altura de líquido para UGS em torno de 1,5m/s	51
6.5	Evolução de \tilde{h}_L em x para UGS em torno de 1,0 m/s	53
6.6	Evolução de \tilde{h}_L em x para UGS em torno de 1,3 m/s	54
6.7	Evolução de \tilde{h}_L em x para UGS em torno de 1,5 m/s	54
6.8	Fração volumétrica de líquido ao longo de x no plano de simetria. . .	55
6.9	Posição em x das linhas mostradas no gráfico 6.10	56
6.10	Fração volumétrica de líquido ao longo de y próximo da superfície de entrada.	56
6.11	Posição em x das linhas mostradas no gráfico 6.11	56
6.12	Fração volumétrica de líquido ao longo de y para vários valores de x .	57
6.13	Resultado com diâmetro da fase dispersa muito baixo.	58

Lista de Tabelas

4.1	incertezas	37
6.1	Resultados	49
6.2	incertezas	52

Lista de Símbolos

0.1 Letras Maiúsculas

A	Área da seção transversal
D	Diâmetro interno do tubo
F	Força
Fr	Número de Froude
g	Aceleração da gravidade
N	Número de amostras
Q	Vazão volumétrica
Re	Número de Reynolds
S	Comprimento
t	Tempo
UGS	Velocidade superficial da fase gasosa
ULS	Velocidade superficial da fase líquida
V	Volume
W	Trabalho

0.2 Letras Minúsculas

h	Altura
i	Vetor unitário na direção x
j	Vetor unitário na direção y
k	Vetor unitário na direção z
p	Pressão
q	Calor
s	Superfície
u	Velocidade

0.3 Subscrito

i	Interface
G	Fase gasosa
L	Fase líquida
W	Parede

Capítulo 1

Introdução

Na natureza podemos observar vários tipos de escoamentos envolvendo dois ou mais fluidos. Gotas de chuva caindo através do ar em movimento, ventos que agitam a superfície do mar, bolhas de vapor que emergem de fontes termais ou no fundo de uma panela com água fervente. Na verdade são poucos os exemplos de escoamentos, na natureza, envolvendo uma só fase.

Um escoamento multifásico é, fundamentalmente, mais complexo que um monofásico devido a distribuição que cada fase pode ter. O comportamento mecânico de um escoamento multifásico está diretamente ligado a essa configuração espacial e temporal, desconhecida a priori e difícil de quantificar. Em outras palavras é difícil saber a forma que o escoamento se desenvolve, por exemplo, em um escoamento bifásico com água e ar não sabemos, a priori, se o ar vai escoar na forma de pequenas bolhas espalhadas por toda água ou se vai formar grandes bolhas de ar.

Em particular o escoamento bifásico gás - líquido escoando no interior de um duto horizontal tem aplicação prática na engenharia de reatores nucleares, onde ocorrem normalmente em linhas de resfriamento de reatores de água pressurizada (PWR), linhas de óleo e gás, seja para transporte ou extração, equipamentos de refrigeração, entre outros. Por isso é importante prever com exatidão o comportamento mecânico do escoamento, como será seu gradiente de pressão, como evoluirá ao longo do tempo, etc. Para qualquer caso de aplicação do escoamento bifásico horizontal é fundamental, antes, caracterizar qual o regime de escoamento presente na tubulação. Entretanto, essa tarefa pode ser complicada caso o escoamento se

encontre em uma região de transição entre um tipo de escoamento e outro.

Devido a sua complexidade, os escoamentos bifásicos gás-líquido no interior de dutos horizontais tem seu comportamento mecânico fortemente dependente de vários parâmetros físicos. Isso restringe as tentativas de predição aplicáveis a casos particulares ou pouco abrangentes. Como exemplo pode-se citar as técnicas de fluidodinâmica computacional que possibilitam prever detalhadamente o comportamento mecânico do escoamento (como campos de velocidade e gradientes de pressão) para problemas de engenharia particulares.

A região de transição entre dois tipos de regime acontece quando, para uma dada combinação de vazões de líquido e gás, a distribuição das fases no interior do tubo pode alternar entre um regime de escoamento e outro como por exemplo, e o caso do presente trabalho, o escoamento pode hora ser caracterizado como estratificado hora como intermitente.

O objetivo desse trabalho é estudar a transição do escoamento bifásico, águar, estratificado para o intermitente em tubos horizontais através de simulação computacional e estudo experimental utilizando técnica de ultra-sônica.

A simulação em CFD, feita com a ajuda de softwares comerciais da ANSYS, será estudada e confrontada com dados experimentais obtidos em laboratório e cálculos de modelos de escoamento unidimensionais a fim de avaliar a eficácia do método computacional para este tipo específico de escoamento.

No capítulo fundamentos é feita uma abordagem sobre os conceitos mais básicos dos assuntos discutidos neste trabalho. Na revisão bibliográfica um apanhado sobre técnicas de medição, modelos de escoamento bifásico e dinâmica dos fluidos computacional mostram varias maneiras de se abordar o assunto e por que as abordagens feitas neste trabalho foram escolhidas. O capítulo quatro descreve o equipamento experimental o procedimento adotado para se realizar o experimento e o processamento dos dados. O capítulo cinco descreve os procedimentos para a simulação computacional. Por fim a análise dos resultados apresenta e discute o que foi obtido no experimento e na simulação e o último capítulo reúne o que pode ser concluído.

Capítulo 2

Fundamentos

Os escoamentos bifásicos líquido-gás podem ser caracterizados de muitas formas diferentes, dependendo do tipo de abordagem que se adota. A seguir é apresentado um resumo dos conceitos fundamentais sobre escoamento bifásico, técnicas ultrassônicas para medição deste tipo de escoamento e as equações básicas para CFD.

2.1 Fundamentos de Escoamento Bifásico

Uma fase é definida pela termodinâmica como uma porção de matéria totalmente homogênea. Escoamentos multifásicos são aqueles em que mais de uma fase podem ser observadas. Dentre os escoamentos multifásicos tem-se o escoamento bifásico gás-líquido que é um tipo de escoamento onde se observa uma fase líquida (água, óleo, fluido refrigerante, etc) e outra gasosa (ar, gás natural, vapor d'água, etc).

No estudo de escoamentos monofásicos internos a geometria do duto e número de Reynolds são parâmetros importantes para a descrição do perfil de velocidades e dos gradientes de pressão que se desenvolvem. No escoamento bifásico esses parâmetros não são o suficiente, pois a interação entre as fases envolvidas pode conferir propriedades mecânicas bem distintas dependendo de como o escoamento se desenvolver, isto é, de como as duas fases iram se distribuir espacialmente ao longo do tempo.

Boa parte da dificuldade de se caracterizar matematicamente um escoamento multifásico se deve a dificuldade de descrever matematicamente essa distribuição espacial e temporal, pois se trata de fases distintas o que implica em propriedades mecânicas variando descontinuamente nas interfaces entre as elas.

Para o escoamento bifásico gás-líquido é comum interpretar essa distribuição espacial de maneira mais geral através do conceito de fração de vazio α que é definida como a razão do volume da fase gasosa pelo volume total das duas fases no meio.

Alternativamente podemos escrever a fração de vazio em termos das áreas de uma seção transversal da tubulação:

$$\alpha = \frac{A_G}{A_G + A_L} \quad (2.1)$$

Assim sendo, um valor de $\alpha = 1$ representa uma seção transversal da tubulação completamente preenchida por ar enquanto $\alpha = 0$ uma seção transversal completamente preenchida de líquido.

As vazões volumétricas de líquido e gás são escritas em termos de velocidade superficial definidas por:

$$\alpha = \frac{UGS}{UGS + ULS}, \quad (2.2)$$

Velocidade superficial é definido para cada fase como

$$ULS = \frac{Q_L}{A} \quad (2.3)$$

$$UGS = \frac{Q_G}{A} \quad (2.4)$$

Para calculo do número de Reynolds o valor de comprimento geralmente usado em escoamentos monofásicos é o diâmetro da tubulação. Para o regime de escoamento estratificado é mais comum usar os diâmetros hidráulicos definidos por Agrawal et al. (1973) como:

$$D_L = \frac{4A_L}{S_L}, \quad (2.5)$$

e

$$D_G = \frac{4A_G}{S_L + S_G} \quad (2.6)$$

onde D_L e D_G são, respectivamente, os diâmetros hidráulicos da fase líquida e da fase gasosa. S_L é o perímetro que há entre a fase líquida e a parede, S_G , analogamente, é

o perímetro que há entre a fase gasosa e a parede e S_i , por sua vez, é o comprimento da interface formada pelas duas fases.

Chama-se altura da coluna de líquido h_L a distância entre a parte inferior do tubo até a linha formada pela interseção dos planos de interface líquido-gás e a seção transversal ao tubo. Supondo que a linha de nível seja horizontal as áreas da seção transversal ocupadas por líquido e gás são funções da altura da coluna de líquido através da relação geométrica a baixo:

$$A_L = \frac{D^2}{4} \left[\pi - \arccos(2h_L - 1) + (2h_L - 1)\sqrt{1 - (2h_L - 1)^2} \right] \quad (2.7)$$

$$A_G = \frac{D^2}{4} \left[\arccos(2h_L - 1) - (2h_L - 1)\sqrt{1 - (2h_L - 1)^2} \right] \quad (2.8)$$

Aplicando à definição da fração de vazio:

$$\alpha = \frac{R^2 \left[\pi - \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) \right] + (R-h)\sqrt{(2Rh) - h^2}}{R^2\pi} \quad (2.9)$$

2.1.1 Padrões de Escoamento

Em um escoamento de gás e líquido as fases podem adotar diferentes configurações no espaço. Chama-se padrão de escoamento, ou regime de escoamento, a classificação dessas configurações espaciais que o escoamento bifásico pode tomar.

Como a troca de massa e quantidade de movimento entre as fases dependem fundamentalmente da geometria interna e das áreas interfaciais é de se esperar que o comportamento global do escoamento bifásico, como perda de pressão ou transferência de calor, seja função também dessa configuração espacial. Por exemplo, a troca de calor de um escoamento onde a fase gasosa está dispersa em forma de pequenas bolhas pela fase líquida é diferente de quando a fase gasosa forma grandes bolhas que escoam com velocidade bem diferente da fase líquida.

Assim sendo, a abordagem e as considerações feitas para cada tipo de escoamento em particular serão bem diferentes. Isso implica que os modelos físicos para cada tipo de escoamento pressupõem que as fases adotam uma configuração espacial previamente determinada. Dessa forma, o ponto de partida para se calcular um escoamento bifásico qualquer requer identificar o regime de escoamento que irá se estabelecer a partir de condições operacionais pré-estabelecidas.

Para escoamentos horizontais em tubos de seção transversal circular existem cinco padrões básicos recorrentes na literatura. São eles:

- Bolhas dispersas: A fase gasosa se encontra na forma de muitas bolhas pequenas e espalhadas pela fase líquida.
- Anular: Atingido somente para vazões da fase gasosa bem altas. Esse escoamento apresenta a fase líquida escoando nas extremidades radiais do tubo enquanto a fase gasosa escoar no centro.
- Estratificado: Por gravidade a fase líquida se separa da fase gasosa formando uma interface entre as fases no plano horizontal.
- Estratificado ondulado: Como estratificado, entretanto a fase gasosa escoar com uma velocidade mais alta gerando, dessa forma, ondas na interface entre as fases.
- Intermitente: "Trens" de bolhas e pistões de líquido escoam dentro do tubo. É comum se dividir o escoamento intermitente em dois outros subtipos "plug" e "slug".

Essa classificação (mostrada na figura 2.1) é a mesma adotada por Taitel e Dukler (1976). Muitos autores definem outros tantos tipos de escoamento. Cerca de cem diferentes nomes são usados para vários tipos de escoamentos, verticais e horizontais. Alguns são apenas nomes diferentes para uma mesma definição, outros são subdivisões mais detalhadas dos padrões de escoamento Whalley (1996).

2.1.2 Mapas de Escoamento

A fim de representar graficamente os tipos de escoamentos em função das vazões de gás e de líquido são construídos os mapas de fase, ou mapas de padrão de escoamento. Esses mapas, geralmente em escala logarítmica, podem ser baseados em conclusões teóricas (Taitel e Dukler (1976)) ou experimentais (Mandhane et al. (1974)). Na prática as regiões de transição entre um tipo de escoamento e outro são difíceis de se identificar, além de carregarem suas incertezas (se forem de origem

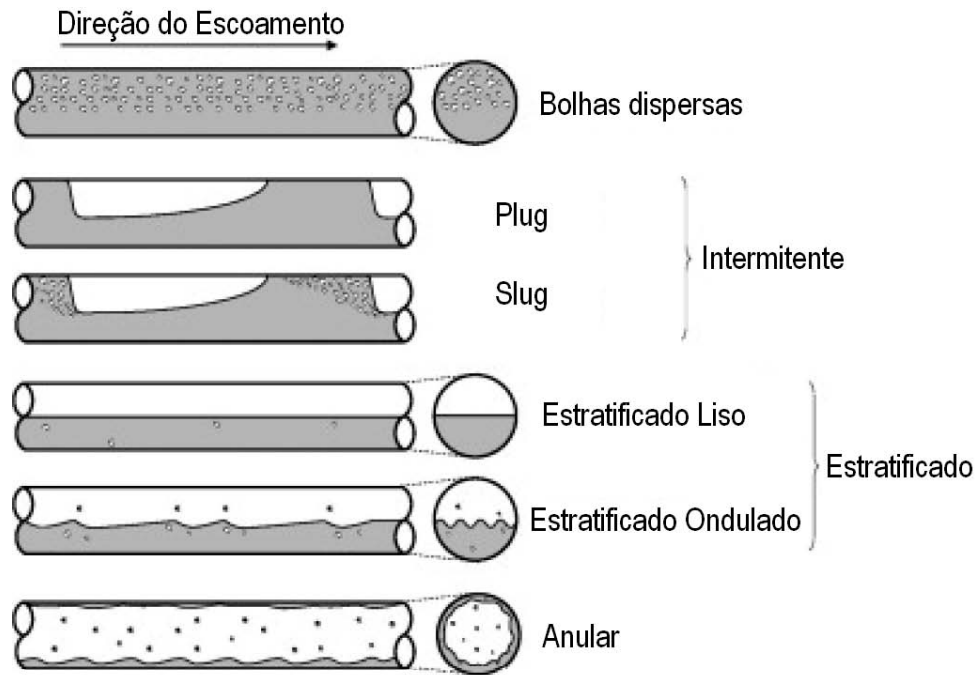


Figura 2.1: Padrões de escoamentos bifásicos em tubulações horizontais

experimental) ou aproximações (se forem de origem teórica). Para tornar os mapas de padrão de escoamento mais abrangentes as vazões de gás e líquido são escritos em termos de velocidades superficiais.

2.2 Fundamentos de Ultrassom

O som é uma onda mecânica de pressão que se propaga longitudinalmente por um meio material, dessa forma todos os conceitos fundamentais de onda como a relação entre velocidade, frequência e comprimento, fenômenos de interferência construtiva ou destrutiva e leis de propagação podem ser aplicadas.

A variação máxima de pressão que uma onda sonora pode causar é chamado "pressão acústica" (p).

Ultrassom é a denominação usada para ondas sonoras de alta frequência. Propriedades do meio onde a onda ultrassônica se propaga, como massa específica, temperatura e impedância acústica, são importantes para entender os possíveis problemas de medição que podem ocorrer. A impedância acústica definida como:

$$Z = \rho c \quad (2.10)$$

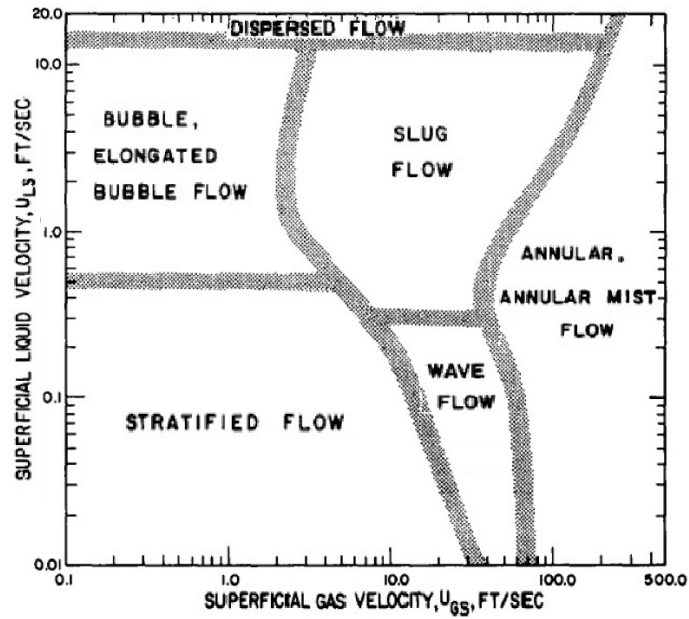


Figura 2.2: Mapa de Padrão de escoamento baseado em dados experimentais (Mandhane)

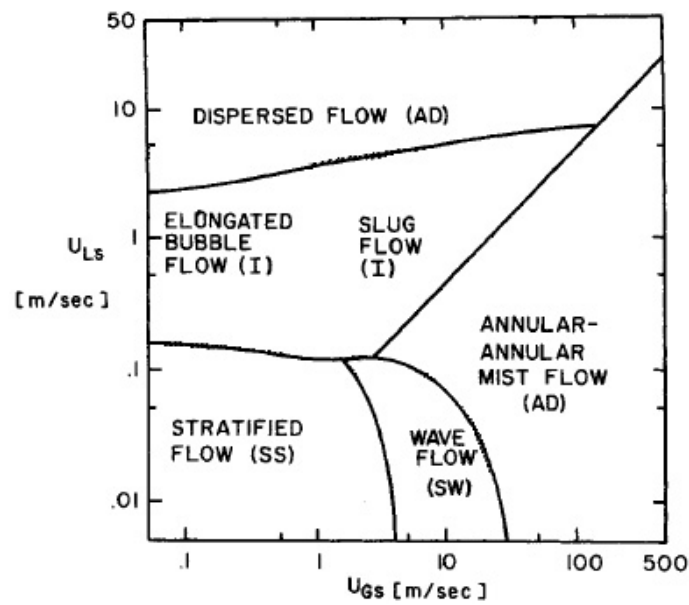


Figura 2.3: Mapa de padrão de escoamento com base teórica (Taitel e Dukler)

É uma das propriedades mais importantes para entender os fenômenos que ocorrem na interface entre dois meios com propriedades acústicas distintas. Considerando dois meios distintos, meio 1 e 2, quando uma onda sonora que viaja pelo meio 1 atinge a interface entre os dois meios parte da pressão acústica da onda é refletida de volta para o meio 1 e parte atravessa a interface para viajar, então, pelo meio 2. São definidos, segundo Krautkrämer, J. e Krautkrämer (1990), os coeficientes de reflexão (R) e transmissão (D) da onda na interface entre dois meios como:

$$\frac{p_r}{p_e} = R, \quad (2.11)$$

$$\frac{p_d}{p_e} = D, \quad (2.12)$$

onde os índices "r", "d" e "e" indicam respectivamente a parcela de pressão de onda refletida, a parcela transmitida e a pressão acústica original da onda incidente. Os índices R e D podem ser obtidos conhecendo a impedância acústica dos meios envolvidos através das equações:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (2.13)$$

$$D = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (2.14)$$

Duas observações são interessantes.

O valor de R pode ser negativo caso $Z_2 < Z_1$. O sinal negativo indica que a onda refletida está defasada em relação a onda incidente.

O valor de D pode ser maior que 1 quando $Z_1 < Z_2$. Em um primeiro momento isso pode parecer contradizer a lei da conservação de energia, pois implica que a pressão acústica transmitida é maior que a pressão acústica incidida. Na verdade isso não contradiz. A pressão da onda transmitida depende também da fase da onda refletida.

Para o caso específico da incidência de uma onda ultrassônica viajando pelo aço e incidindo sobre a interface com a água (caso 1) tem-se $R=-0,9368$ e $D=0,0631$, ou seja a onda refletida é defasada da incidida e a transmitida tem pressão acústica de aproximadamente 6 % da onda original. No caso inverso de uma onda que viaja na água e encontra a interface com o aço (caso 2) tem-se: $R=0,9369$ e $D=1,9369$. A

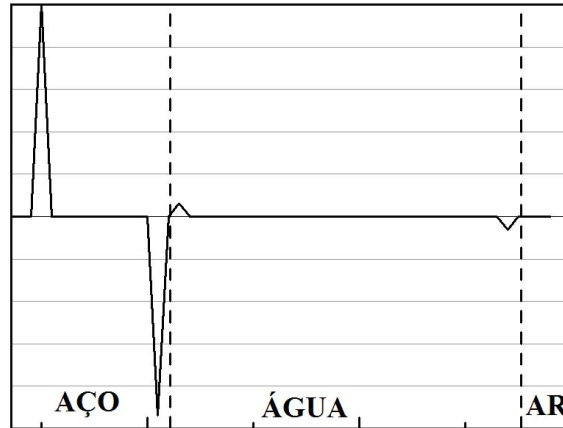


Figura 2.4: Comportamento teórico da onda ultrassônica

onda refletida retorna em fase com a incidida e a transmitida tem pressão acústica maior que a onda original. A impedância acústica do ar é muito menor que a do aço ou da água (aproximadamente $400Ns/m^3$). No caso de uma onda viajando pela água encontrar uma interface com o ar (caso 3) tem-se $R = -0,9995$ e $D = 0,0005$.

A figura 2.4 representa um pulso ultrassônico viajando pelos três materiais de maneira idealizada, sem considerar perdas durante a propagação ou espalhamento da onda. Supondo uma onda com pressão acústica "p". O primeiro pico representa o pulso inicial. O segundo pulso, de sinal negativo, representa o sinal refletido na primeira interface, aço ar $-0,94 p$. O terceiro pulso, bem menor que o primeiro, é o pulso transmitido do aço para a água com $0,063 p$ e o quarto representa como ficaria o pulso depois de refletir na interface com o ar $-0,063 p$. Quando a onda refletida na interface água ar retornar ao aço a sua pressão acústica aumentará, pois o índice D dessa interface é maior que 1, e finalmente voltará a origem com fase inversa a transmitida e $-0,1222 p$.

2.3 Dinâmica dos Fluidos Computacional

Uma das abordagens mais modernas na resolução de problemas de mecânica dos fluidos é a "Dinâmica dos Fluidos Computacional", ou CFD (Computational Fluid Dynamics) que consiste, basicamente, em resolver os complexos cálculos que envolvem a descrição do comportamento dos fluidos através de métodos numéricos

e cálculos computacionais. Os conceitos fundamentais na dinâmica dos fluidos são:

1. Conservação de massa.
2. Conservação do momentum (segunda lei de Newton).
3. Conservação de energia.

O fluido é considerado um meio contínuo, ou seja, pode ser dividido em porções infinitesimais. Na prática o fluido é um conjunto de partículas muito pequenas, como moléculas ou átomos, com grandes vazios entre elas. Dessa forma um elemento infinitesimal, na verdade, não pode ser tão pequeno quanto se queira, pois deve conter uma quantidade de partículas mínimas para que a propriedade do fluido como um todo possa ser descrita dentro daquele volume.

As equações que descrevem matematicamente os conceitos fundamentais citados acima partem desse princípio.

Conservação de massa: A matéria não pode ser criada nem destruída. Seja um volume de controle qualquer, com volume "V" e definido por uma superfície "s", que contenha uma porção de um dado fluido. Qualquer quantidade de matéria que passe para dentro do volume de controle aumenta a quantidade de massa que está contida pelo volume e qualquer quantidade que saia contribui para reduzir a massa no interior do mesmo. Dessa forma a taxa de acúmulo ou perda de massa depende fundamentalmente das quantidades de matéria que atravessam a superfície que contém o volume. Se o fluido atravessa o elemento com uma velocidade " \vec{u} " qualquer pode-se escrever:

$$\int \int_s \rho \vec{u} d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \int \int_V \rho dV. \quad (2.15)$$

Aplicando o teorema da divergência no lado esquerdo da igualdade e reorganizando os termos chega-se a

$$\int \int \int_V \nabla \cdot (\rho \vec{u}) dV + \int \int \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = 0. \quad (2.16)$$

Como se trata de um somatório de duas integrais definidas pelo mesmo volume pode-se reescrever a equação da seguinte forma

$$\int \int \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) dV = 0. \quad (2.17)$$

Na equação acima o integrando representa uma porção finita que se somada ponto a ponto dentro de um volume qualquer, definido pela integral, deve ser zero. O volume de controle definido pela integral pode ser desenhado arbitrariamente de modo que mesmo uma parcela infinitesimal de volume satisfaça a igualdade. Dessa forma se pode escrever a igualdade na forma diferencial

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0. \quad (2.18)$$

Segunda lei de Newton (equação de momentun): $\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{u})$

A segunda lei de Newton, talvez o mais importante axioma da física, se trata de uma relação matemática que descreve com precisão a maior parte dos fenômenos mecânicos macroscópicos.

As forças que atuam em um volume de fluido são, basicamente, três:

Forças de campo: Atuam diferencialmente em cada ponto do corpo através de um campo como o gravitacional ou o elétrico. Em muitos escoamentos monofásicos os efeitos da gravidade podem ser negligenciados, entretanto para escoamentos bifásicos, onde o gradiente de pressão devido a gravidade tem implicações diretas no tipo de regime de escoamento a ser estabelecido, o efeito gravitacional é muito importante. O campo magnético pode influenciar cada molécula de fluido em particular (principalmente a água por ter formação química polar), entretanto as forças de atuação deste campo dependem da posição e velocidade de cada partícula que compõe o fluido. Dessa forma, e pela própria definição de um volume infinitesimal feito acima, as forças de origem magnéticas devem se anular. Na prática não se observa efeitos macroscópicos do campo magnético na maioria dos escoamentos. Por esses motivos a única força considerada será a gravitacional. De maneira geral pode-se escrever essas forças da seguinte forma:

$$\vec{F}_{Camp} = \int \int \int_V \rho \vec{g} dV, \quad (2.19)$$

onde g é coeficiente do campo.

Forças de contato: Ocorre na fronteira do volume de controle. Dois tipos de forças são consideradas, a força devido à distribuição da pressão na superfície e as tensões normais e de cisalhamento que fazem o fluido escoar. A força provinda da

pressão na superfície do volume de controle definido por uma superfície "s"é:

$$\vec{F}_{Press} = - \int \int_s \rho d\vec{s}. \quad (2.20)$$

As forças devido as tenções normais e cisalhantes serão escritas como F_{visc} e tratadas mais detalhadamente adiante.

Finalmente a força na equação de momento é escrita como sendo resultante dessas três:

$$\vec{F} = \vec{F}_{Camp} + \vec{F}_{Press} + \vec{F}_{visc} \quad (2.21)$$

A derivada do momento no tempo se decompõe em duas parcelas:

$$\frac{d}{dt}(m\vec{u}) = \frac{dm}{dt}\vec{u} + \frac{du}{dt}m \quad (2.22)$$

A primeira parcela representa a mudança de momentum devido a mudança de massa no interior do volume de controle. Ao invés de escrever essa variação da massa no tempo pode-se, alternativamente, escrever que a variação de massa no interior do volume de controle é o somatório das massas que entram e saem do volume de controle. Assim temos:

$$\int \int_s (\rho\vec{u}ds)\vec{u} = G. \quad (2.23)$$

Dessa forma G (definido na expressão acima) representa a parcela da variação de massa dentro de um volume de controle na equação do momento.

Para o mesmo volume de controle finito a variação total do momentum é a soma da variação dos momentos de cada porção infinitesimal dentro do mesmo. Assim:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \int \int_V \rho\vec{u}dV = H \quad (2.24)$$

Analogamente H representa a variação de momentum no volume de controle devido a mudança de velocidade global no interior do volume.

Assim:

$$\frac{d}{dt}(m\vec{u}) = G + H = \int \int_s (\rho\vec{u}d\vec{s}) + \frac{\partial}{\partial t} \int \int \int_V \rho\vec{u}dV \quad (2.25)$$

Escrevendo a equação da segunda lei com os desenvolvimentos acima temos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \int \int_V \rho\vec{u}dV + \int \int_s (\rho\vec{u} \cdot d\vec{s})\vec{u} = - \int \int_s p d\vec{s} + \int \int \int_V \rho\vec{g}dV + \vec{F}_{visc}. \quad (2.26)$$

Aplicando o teorema do gradiente na primeira parcela do lado esquerdo da igualdade e passando a derivação no tempo da ultima parcela do lado esquerdo para dentro da equação temos:

$$\int \int \int_V \frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} dV + \int \int_s (\rho\vec{u} \cdot d\vec{s})\vec{u} = - \int \int \int_V \nabla p dV + \int \int \int_V \rho\vec{g} dV + \vec{F}_{visc}. \quad (2.27)$$

Usando a notação vetorial, $u = u_x i + u_y j + u_z k$, a equação é desmembrada em três e, dessa forma, o teorema divergente pode ser aplicado no segundo termo (que corresponde à força de campo). Feito isso todos os termos da igualdade são integrais triplas definidas pelo mesmo volume. Organizando a igualdade chega-se a:

$$\int \int \int_V \left[\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) + \frac{\partial p}{\partial x} - \rho g_x - (F_x)_{visc} \right] dV = 0. \quad (2.28)$$

onde g_x e $(F_x)_{visc}$ são, respectivamente, a constante da força de campo e a força viscosa na direção x . Analogamente temos a mesma expressão para as direções y e z .

Como feito anteriormente na dedução da equação da continuidade a equação para a segunda lei de Newton pode ser escrita na forma diferencial:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + (F_x)_{visc}, \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + (F_y)_{visc}, \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + (F_z)_{visc}. \quad (2.31)$$

Newton define que a força feita para cisalhar um elemento de fluido é proporcional ao gradiente de velocidade ao qual o fluido é submetido. A constante que regula a proporção da força é chamada de viscosidade e é diferente para cada fluido. Um fluido que se comporta da maneira descrita por Newton é chamado de fluido newtoniano. Muitos fluidos na natureza são newtonianos (como o ar ou a água) e isso acentua a importância desse conceito. Stokes definiu matematicamente as tensões devido a viscosidade da seguinte forma:

$$\tau_{xx} = \lambda (\nabla \cdot \vec{u}) + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad (2.32)$$

$$\tau_{yy} = \lambda (\nabla \cdot \vec{u}) + 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad (2.33)$$

$$\tau_{zz} = \lambda (\nabla \cdot \vec{u}) + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad (2.34)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right], \quad (2.35)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left[\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right], \quad (2.36)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left[\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right], \quad (2.37)$$

onde μ é a viscosidade molecular e λ é o segundo coeficiente de viscosidade definido, também por Stokes, como $\lambda = -2/3\mu$.

Substituindo as equações das tensões (2.32, 2.33, 2.34, 2.35, 2.36 e 2.37) nas equações de momentum (2.29, 2.30 e 2.31) chega-se a forma final da equação do momento na forma diferencial. É conveniente escrever essas três equações usando notação matricial:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2.38)$$

Conservação da energia: Energia não pode ser criada ou destruída, mas apenas modificada ou transferida.

Energia é um conceito termodinâmico muito importante que perpassa por várias áreas da física. Graças a esse conceito é possível equacionar e prever fenômenos da natureza que se relacionam com mais de uma área do conhecimento. Uma forma sucinta de definir energia é "a capacidade de produzir um efeito"(Van Wylen). Devido a interdisciplinaridade deste conceito muitas nomenclaturas surgem na literatura. Para aplicações em CFD duas formas de energia são importantes a mecânica, que está relacionada ao trabalho que o fluido pode realizar, e a térmica, relacionada aos efeitos macroscópicos da temperatura. Assim para um elemento de fluido finito "V" definido por uma superfície "s" a soma das taxas de energia térmica e mecânica que entram no volume de controle têm que ser iguais a taxa de acúmulo de energia em seu interior. Chamando de B_1 a taxa de calor adicionado ao fluido contido no volume de controle através da superfície do volume, B_2 de taxa de trabalho realizado sobre o fluido e B_3 de taxa de mudança de energia do fluido que escoar através do volume de controle é válida a relação:

$$B_1 + B_2 = B_3 \quad (2.39)$$

A taxa de calor que entra no fluido é escrita como:

$$B_1 = \int \int \int_V \dot{q} \rho dV + \dot{q}_{visc}. \quad (2.40)$$

O termo \dot{q}_{visc} representa a entrada de calor no volume de controle devido a ação da viscosidade do fluido.

A taxa de trabalho feito sobre o fluido no volume de controle devido a pressão em sua vizinhança é:

$$B_2 = - \int \int_s p \vec{u} \cdot d\vec{s} + \int \int \int_V \rho (\vec{f} \cdot \vec{u}) dV + \dot{W}_{visc}. \quad (2.41)$$

Novamente o termo \dot{W}_{visc} representa o trabalho das forças viscosas do fluido.

Para definir a taxa de energia agregada ou perdida pelo elemento de fluido que perpassa o volume de controle, B_3 na equação 2.39, é preciso descrever a taxa de energia que o volume de controle ganha ou perde devido ao fluxo de massa através de sua superfície e a taxa de energia acumulada ou perdida ao longo do tempo no interior do seu volume.

$$B_3 = \frac{\partial}{\partial t} \int \int \int_V \rho \left(e + \frac{\vec{u} \cdot \vec{u}}{2} \right) dV + \int \int_s (\rho \vec{u} \cdot d\vec{s}) \left(e + \frac{\vec{u} \cdot \vec{u}}{2} \right). \quad (2.42)$$

onde e é a energia interna por unidade de massa. Essa energia provem do movimento aleatório das moléculas do fluido no interior do volume de controle. A parcela da esquerda diz respeito a mudança global de energia no interior do volume já a parcela da direita representa a energia que atravessou a fronteira devido a transferência de massa.

Por fim temos:

$$\begin{aligned} \int \int \int_V \dot{q} \rho dV + \dot{q}_{visc} - \int \int_s p \vec{u} \cdot d\vec{s} + \int \int \int_V \rho (\vec{f} \cdot \vec{u}) dV + \dot{W}_{visc} = \\ \frac{\partial}{\partial t} \int \int \int_V \rho \left(e + \frac{\vec{u} \cdot \vec{u}}{2} \right) dV + \int \int_s \rho \left(e + \frac{\vec{u} \cdot \vec{u}}{2} \right) \vec{u} \cdot d\vec{s}. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Aplicando o teorema da divergência e reorganizando os termos escreve-se a equação acima na forma diferencial como já foi feito para as equações de continuidade e de momentum. Assim:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{\vec{u} \cdot \vec{u}}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{\vec{u} \cdot \vec{u}}{2} \right) \vec{u} \right] = \rho \dot{q} - \nabla \cdot (p \vec{u}) + \rho (\vec{f} \cdot \vec{u}) + \dot{q}'_{visc} + \dot{W}'_{visc}. \quad (2.44)$$

Por fim foi montado um sistema de equações diferenciais que não possui solução analítica. A prática de CFD consiste em transformar esse sistema de equações diferenciais em um sistema algébrico através da discretização espacial e temporal do fenômeno. Isso pode ser feito pelo método de diferenças finitas ou pelo método de volumes finitos.

O software ANSYS FLUENT usa o método de volumes finitos. Nesse método as equações diferenciais analíticas são aplicadas a volumes de controle finitos.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

A seguir é apresentado um apanhado geral sobre as técnicas de medição aplicáveis a escoamento multifásicos, os modelos, teórico e experimental, que serão usados como comparação dos resultados e a abordagem numérica para a simulação.

3.1 Técnicas de Medição

Como dito anteriormente um escoamento multifásico no interior de tubulações pode se desenvolver de formas diferentes dependendo das vazões de cada fase e da geometria da tubulação. Isso dificulta a medição de grandezas pertinentes ao escoamento de forma que é preciso, antes, saber que tipo de escoamento se quer medir e que grandezas queremos medir. Por exemplo para o escoamento estratificado é importante medir a altura da coluna de líquido (h_L), mas essa grandeza não faz sentido em um escoamento do tipo bolhas dispersas. Sendo assim não existe uma única técnica de medição que cubra toda a gama de escoamentos multifásicos.

Uma técnica de medição deve medir os parâmetros influenciados pela deformação das interfaces entre as fases, flutuações temporais das propriedades físicas e complicações geométricas do sistema, segundo Jones (1975) para que a técnica funcione bem em um determinado padrão de escoamento.

Atualmente muitos tipos de medidores dedicados aos mais diversos tipos de padrão de escoamento são comercializados ou desenvolvidos em laboratórios. Os mais diversos tipos de princípios físicos são aplicados a fim de se medir com clareza

e de forma prática as grandezas pertinentes.

Segundo Goldstein (1983) as técnicas de medição estão divididas em três grupos: Técnicas de resposta mecânica (como seção porosa de amostragem), técnicas de resposta elétrica (como os dispositivos condutores e capacitivos) e técnicas não intrusivas (como raio x e raio gama).

Rouhani e Sohal (1983) classificaram as técnicas de medição em dois grupos, as de medida direta cuja resposta da técnica é a forma como o escoamento se configura no espaço (visualização direta através de trecho transparente, raio-x, raio-gama, sensores ópticos) e as de medida indireta que depende da interpretação de sinais de outras grandezas (pressão estática, detectores de raio-x e nêutrons térmicos e sensores ultrassônicos).

Masala (2004) classifica as técnicas em sete tipos: condutivas, capacitivas, óticas, raios-gama, raios-X, neutrongrafia e ultrassônicas.

3.1.1 Técnicas Ultrassônicas para Escoamentos Multifásicos

A aplicação de técnicas de ultrassom para medição de escoamentos começou tão quanto se inventou o sonar. Inicialmente a motivação para a criação do sonar era o desenvolvimento de uma técnica para auxiliar a navegação. As técnicas de ultrassom ganharam força com o avanço da eletrônica e da descoberta do efeito piezoelétrico sendo usado de diversas formas como medição de micro-trincas, navegação de submarinos, medidores de velocidade, entre outros.

A primeira patente de um medidor ultrassônico de vazão para utilização em tubulações comerciais é atribuída a Rütten em 1928 na Alemanha (Faccini et al. (2004)), mas somente nos anos 70 foram produzidos os primeiros medidores industriais. Atualmente os medidores de vazão de princípio ultrassônico estão bastante difundidos por uma série de vantagens:

- Medidas confiáveis com boa linearidade e estabilidade
- Não é intrusivo e não causa perda de pressão na linha
- Exequível em uma grande faixa de vazão;

- Excelente resolução e tempo de resposta;
- Curto espaço de montagem;
- Baixa abrasão;
- Pode operar em ácidos, metais líquidos, entre outros fluidos com propriedades físicas e químicas difíceis de lhe dar.

Os medidores ultrassônico portáteis são indicados para aplicações de plantas com medição automatizada por ter um custo energético baixo, serem leves e exigirem pouca manutenção. O maior limitante para esse tipo de medidor é a temperatura que pode gerar grandes gradientes de velocidade para a onda sonora na tubulação prejudicando a medida.

Muitos métodos de medição podem ser aplicados com o princípio ultrassônico, dentre eles o método de tempo de transito do pulso (conhecido como pulso eco) que consiste, basicamente, em medir o tempo que um pulso ultrassônico demora para fazer um certo trajeto. Sabendo-se a velocidade do som no meio transmitido é possível se obter a distância que o pulso percorreu através da expressão:

$$d = \frac{ct}{2}. \quad (3.1)$$

Esse método surgiu durante a primeira guerra mundial com o intuito de se localizar objetos submersos, se tornou a principal ferramenta de visualização submarina e posteriormente passou a ser usada em ensaios não destrutivos. O princípio físico dessa técnica é o mesmo do sistema de localização dos morcegos.

Na prática é muito importante entender que tipo de sinal o transdutor ultrassônico pode receber dependendo de como a onda pode viajar e interagir com o sistema e o que esse sinal representa ou pode dizer sobre o sistema. Por exemplo parte de um pulso emitido de uma extremidade da tubulação pode ser refletido de volta por um obstáculo (como uma bolha de ar) antes de atingir o outro lado do tubo. A onda sonora refletida pelo obstáculo chegará antes da que atingiu o lado oposto. A amplitude da onda refletida dependerá do tamanho do obstáculo e da distância em que ele se situa do transdutor. Além de obstáculos existem também

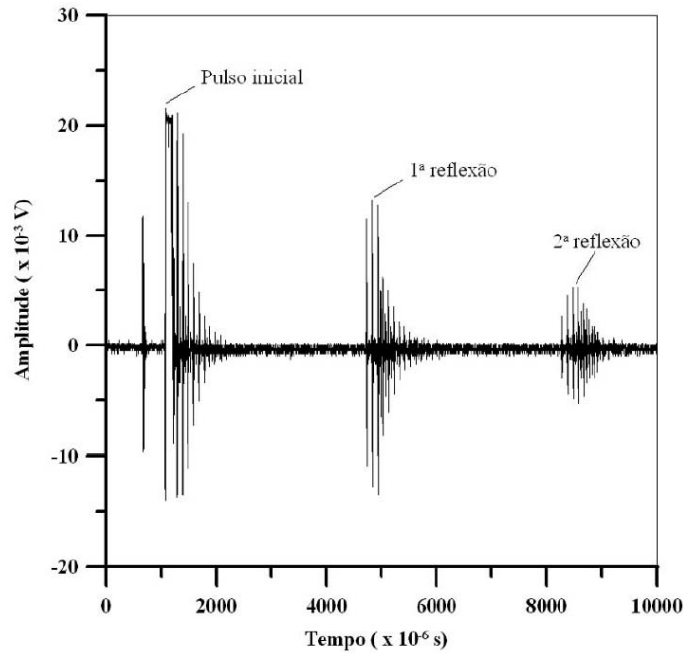


Figura 3.1: Exemplo de sinal ultrassônico por técnica de pulso eco

as ondas que são refletidas e transmitidas nas interfaces dos materiais. Seguindo essa linha de raciocínio é possível imaginar o tipo de onda de resposta o transdutor ultrassônico acusará, isto é, podemos identificar as ondas que representam o tempo de viagem através do trajeto desejado. A figura 3.1 mostra um típico sinal captado pelo transdutor ultrassônico através método de pulso eco. Goldstein (1983) apresenta uma série de métodos e aparelhos eletrônicos para o processamento e armazenamento dos sinais obtidos por essa técnica.

3.2 Modelo Teórico de Taitel e Dukler (1976) Para o escoamento Estratificado e Transição para Intermitente

Segundo Taitel e Dukler (1976) o processo de análise da transição entre os regimes de escoamento parte da condição de um regime estratificado.

No escoamento estratificado liso ou "suave" a interface entre as duas fases é bem definida. A altura da coluna de líquido e as vazões de cada fase são dados

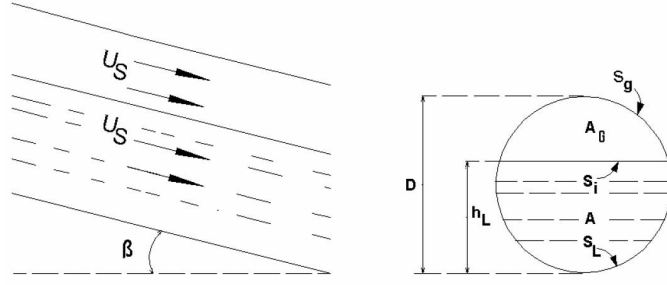


Figura 3.2: Escoamento estratificado em equilíbrio

importantes para esse tipo de escoamento, pois, com elas, é possível determinar a área da seção transversal ocupada por cada fase, a fração de vazio e as velocidades de cada uma das fases. A figura 3.2 representa um escoamento estratificado

Supondo que em um regime de escoamento estratificado as duas fases estão em equilíbrio mecânico tem-se:

$$-A_L \left(\frac{dp}{dx} \right) - \tau_{WL} S_L + \tau_i S_i + \rho_L A_L g \sin(\theta) = 0. \quad (3.2)$$

A queda de pressão nas duas fases é igualada e é assumido desprezível o gradiente de pressão na fase líquida.

As tensões cisalhantes são escritas da maneira convencional:

$$\tau_{WL} = f_L \frac{\rho_L u_L^2}{2}, \quad (3.3)$$

$$\tau_{WG} = f_G \frac{\rho_G u_G^2}{2}, \quad (3.4)$$

$$\tau_i = f_i \frac{\rho_G (u_G - u_L)^2}{2}. \quad (3.5)$$

E os fatores de fricção são definidos como:

$$f_L = C_L \left(\frac{D_L u_L}{\nu_L} \right)^{-n}, \quad (3.6)$$

$$f_G = C_G \left(\frac{D_G u_G}{\nu_G} \right)^{-m}. \quad (3.7)$$

Segundo Gazley (1948) um escoamento estratificado apresenta $f_i \approx f_G$.

Os parâmetros C_L , C_G , n e m são determinados empiricamente. São eles:

Para regime turbulento: $C_L = C_G = 0.046$ e $n = m = 0.2$.

Para regime laminar: $C_L = C_G = 16$ e $n = m = 1$.

Usando a relação geométrica entre h_L , A_L e A_G e adimensionalizando a equação 3.2 obtemos:

$$X^2 \left[(\tilde{u}_L \tilde{D}_L)^{-n} \tilde{u}_L^2 \frac{\tilde{S}_L}{\tilde{A}_L} \right] - \left[(\tilde{u}_G \tilde{D}_G)^{-m} \tilde{u}_G^2 \left(\frac{\tilde{S}_G}{\tilde{A}_G} + \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{A}_L} + \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{A}_G} \right) \right] - 4Y = 0, \quad (3.8)$$

onde

$$X^2 = \frac{\frac{4C_L}{D} \left(\frac{ULSD}{\nu_L} \right)^{-n} \frac{\rho_L(ULS)^2}{2}}{\frac{4C_G}{D} \left(\frac{UGSD}{\nu_G} \right)^{-m} \frac{\rho_G(UGS)^2}{2}} = \frac{|(dp/dx)_{Ls}|}{|(dp/dx)_{Gs}|}, \quad (3.9)$$

e

$$Y = \frac{(\rho_L - \rho_G)g \text{sen} \alpha}{\frac{4C_G}{D} \left(\frac{UGSD}{\nu_G} \right)^{-m} \frac{\rho_G(UGS)^2}{2}} = \frac{|(dp/dx)_{Ls}|}{|(dp/dx)_{Gs}|}. \quad (3.10)$$

Os valores de referencia usados na adimensionalização são os seguintes:

D Diâmetro do tubo para qualquer grandeza de comprimento.

D^2 Quadrado do diâmetro do tubo para qualquer medida de área.

ULS Velocidade superficial do líquido (equação 2.3) para valores de velocidade do líquido.

UGS Velocidade superficial do gás (equação 2.4) para valores de velocidade do gás.

Essas equações permitem calcular a altura da coluna de líquido para uma dada vazão de líquido e gás sabendo-se antes as propriedades físicas das fases e o diâmetro da tubulação de seção transversal circular. O termo X lembra o termo introduzido por Lockart e Martinelli (1949) e representa a razão entre as perdas de pressão do líquido e do gás no escoamento caso cada fase ocupasse o interior do tubo só.

Se a vazão de líquido for aumentada, mantendo-se a vazão de gás constante a altura de líquido também aumenta. A altura de líquido pode ser aumentada até um limite em que o escoamento deixa de ser estratificado e passa a ser intermitente. Dukler e Hubbard (1975) sugerem um mecanismo de transição de regime onde uma onda proveniente de uma perturbação na interface entre as fases alcança a parte superior do tubo, obstruindo a passagem de ar ocasionando uma readequação das transferências de momento entre as fases, assim o ar passa a escoar na forma de bolhas empurrando os pistões de líquido. A figura 3.3 mostra um desenho esquemático de uma onda solitária viajando pela interface entre as fases.

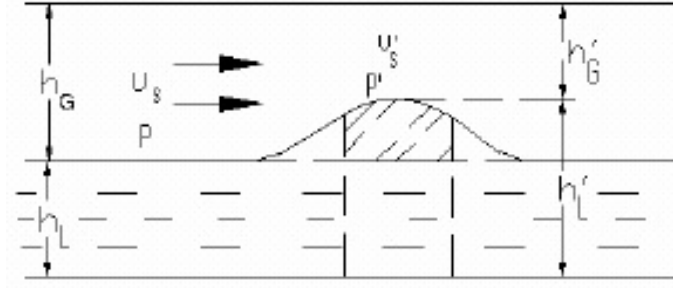


Figura 3.3: Instabilidade do regime estratificado

Quando uma onda, por menor que seja, passa pela superfície interfacial o ar acima dela é forçado a escoar mais rapidamente e isso causa uma queda na pressão que pode ocasionar a mudança de regime de escoamento. A condição para a transição entre os regimes foi descrita por Milne-Thomson (1968) através teoria de Kelvin-Helmholtz como

$$u_G > \sqrt{\frac{g(\rho_L - \rho_G)h_G}{\rho_G}} \quad (3.11)$$

Reescrevendo a condição a cima em termos de grandezas adimensionais, já introduzidas, chega-se a

$$Fr^2 \left[\frac{1}{C_2^2} \frac{\tilde{u}_G d\tilde{A}_L/d\tilde{h}_L}{\tilde{A}_G} \right] \geq 1 \quad (3.12)$$

onde Fr é o número de Froud originalmente definido como sendo a velocidade da onda na interface do escoamento sobre a velocidade do som no líquido. O número de Froud pode ser escrito como

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G)}} \frac{UGS}{\sqrt{Dg\cos\alpha}} \quad (3.13)$$

O termo C_2 na equação 3.12 é a razão entre a área ocupada pelo gás na seção transversal onde está a onda e a área ocupada pelo gás sem a presença da onda. Como a onda teoricamente pode ter amplitude infinitesimal o valor de C_2 é difícil determinar, assim o termo é escrito de forma aproximada como

$$C_2 = 1 - \tilde{h}_L \quad (3.14)$$

Por fim o termo $(d\tilde{A}_L/d\tilde{h}_L)$ da equação 3.12 é escrito como

$$\frac{d\tilde{A}_L}{d\tilde{h}_L} \sqrt{1 - (2\tilde{h}_L - 1)^2} \quad (3.15)$$

Usando as equações 3.13, 3.14 e 3.15 na condição 3.12 é possível determinar se um dado escoamento é estratificado ou intermitente.

3.3 Modelo Experimental de Mandhane et al. (1974)

Muitos estudos experimentais já propuseram numerosas formas teorias ou correlações a respeito do desenvolvimento dos regimes de escoamento multifásico entre gás e líquido. Mandhane et al. (1974) englobou diversos resultados experimentais com um tratamento estatístico para construir um mapa de padrão de escoamento. O autor divide os padrões de escoamento em seis tipos:

- Plug;
- Estratificado;
- Ondulado;
- Slug;
- Anular;
- Bolhas dispersas.

O modelo teórico de Taitel e Dukler (1976) não faz distinção entre os padrões "Plug" e "Slug" que são ambos caracterizados como intermitentes. Para construir as linhas de transição entre os padrões de escoamento primeiramente são calculados os parâmetros de Govier e Aziz (1972) para correção das propriedades físicas definidas da seguinte forma:

$$X1 = \left(\frac{\rho_G}{0,0808} \right)^{0,2} \left(\frac{\rho_L}{62,4} \frac{72,4}{\sigma} \right)^{0,25} \left(\frac{\mu_G}{0,018} \right)^{0,2}, \quad (3.16)$$

$$Y1 = \left(\frac{\rho_L}{62,4} \frac{72,4}{\sigma} \right)^{0,25} (\mu_L)^{0,2}, \quad (3.17)$$

onde σ é a tensão superficial entre as fases expressa em dyne/cm (1dyne/cm = 1mN/m). As entradas de ρ_L e ρ_G devem ser expressas em $lb./ft^3$ e μ_L e μ_G em

centipoise. Essas correções das propriedades físicas devem ser aplicadas aos valores de ULS e UGS durante a construção do mapa de padrão de escoamento. A forma como devem ser aplicados esses valores depende da região de transição.

3.4 Abordagem e Modelos da Simulação Numérica

A simulação numérica para escoamentos multifásicos apresenta algumas complicações que não se verificam para o escoamento monofásico. O problema fundamental é a dificuldade de se calcular a interação entre uma fase e outra. Primeiramente é preciso assumir uma abordagem, Euleriana ou Lagrangeana para cada fase. É possível que uma fase seja abordada de uma forma e outra de outra forma, por exemplo em um escoamento de líquido com bolhas dispersas é conveniente a abordagem Euleriana para a fase líquida e Lagrangeana para a fase gasosa. Neste trabalho foi utilizado a abordagem Euleriana para ambas as fases.

Assumindo a abordagem para cada fluido ainda é preciso escolher um modelo para o escoamento multifásico. O software oferece três opções de modelo para uma abordagem Euleriana das fases:

Volume de fluido (VOF): Esse modelo trata cada fluido separadamente através de uma técnica que localiza a superfície de interfase entre eles. O modelo discrimina as regiões dentro da geometria que estão sendo ocupadas por um fluido ou outro e resolve a equação de momento e continuidade para cada um como se fosse monofásico. Dessa forma apenas um campo de velocidade é resolvido para cada região da geometria. Esse modelo é indicado para simulação dos efeitos de superfície entre as fases de um escoamento multifásico, como por exemplo, a formação de ondas.

Modelo de mistura: Esse modelo assume que os fluidos podem se misturar de forma tal que é possível tratar o escoamento como se fosse um único fluido. As propriedades da mistura dos fluidos são calculadas segundo a fração volumétrica de cada um deles. Dos tipos de escoamentos descritos na seção 2.2 o regime de bolhas dispersas pode ser tratado através deste modelo se as bolhas forem pequenas e numerosas o suficiente.

Modelo Euleriano: Não confundir com a abordagem Euleriana adotada para

cada fluido. Esse modelo é mais complexo e abrangente que os outros dois descritos acima. Cada fluido é tratado individualmente, com sua própria solução para as equações de conservação e momentum, entretanto alguns termos são adicionados para descrever a interação entre cada fluido, como força de sustentação das fases dispersas na equação de momento, por exemplo.

O modelo de mistura não é o mais indicado para o regime de escoamento estratificado, já que as fases se separam naturalmente e desenvolvem cada uma seus campos de velocidades específicos. O modelo indicado pelo manual da ANSYS FLUENT para a simulação do regime estratificado é o VOF, entretanto esse modelo não é indicado para a simulação da separação das fases no interior do tubo. Desta forma optou-se pelo modelo Euleriano.

3.4.1 Equações do Modelo Euleriano

O modelo Euleriano para escoamento multifásico permite simular uma quantidade qualquer de fases. A limitação para o número de fases é apenas a memória e capacidade de processamento do computador.

A solução se baseia em alguns princípios:

- Todas as fases compartilham o mesmo campo de pressão.
- As equações de momento e de continuidade são resolvidas particularmente para cada fase.

As equações a seguir são apresentadas para duas fases, líquido (L) e gás (G).

A equação da continuidade, desenvolvida na seção 2.3, passa por algumas modificações e é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_L \rho_L) + \nabla \cdot (\alpha_L \rho_L \vec{u}_L) = (\dot{m}_{GL} - \dot{m}_{LG}) + S_L. \quad (3.18)$$

A equação da conservação de momento é escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} &(\partial/\partial t)(\alpha_L \rho_L \vec{u}_L) + \nabla \cdot (\alpha_L \rho_L \vec{u}_L \vec{u}_L) = -\alpha_L \nabla p \\ &+ \nabla \cdot \vec{\tau}_L + \alpha_L \rho_L \vec{g} + (R_{GL}^{\vec{}} + \dot{m}_{GL} \vec{u}_{GL} - \dot{m}_{LG} \vec{u}_{LG}) + (\vec{F}_L + \vec{F}_{lift,L} + \vec{F}_{vm,L}) \end{aligned} \quad (3.19)$$

onde $\bar{\tau}_{LL}$ é o tensor de tensões da fase líquida definido por:

$$\bar{\tau}_L = \alpha_L \mu_L (\nabla \vec{u}_L + \nabla \vec{u}_L^T) + \alpha_L (\lambda_L - 2/3 \mu_L) \nabla \cdot \vec{u}_L \bar{I}, \quad (3.20)$$

os termos do tensor de tensões viscosas foram discutidos no capítulo de fundamentos. Os termos \vec{F}_L , $\vec{F}_{lift,L}$ e $\vec{F}_{vm,L}$ representam, respectivamente, as forças externas que podem atuar na mostra de fluido, a força de sustentação e a força devido a massa virtual. A parcela \vec{R}_{GL} é uma força de interação entre a fase líquida e gasosa. Aplicando o terceiro axioma de Newton $\vec{R}_{GL} = -\vec{R}_{LG}$. Cada fase compõe um sistema de modo que $\vec{R}_{LL} = 0$ ou $\vec{R}_{GG} = 0$, quando a força é exercida de uma fase para outra é calculado da seguinte forma:

$$\vec{R}_{GL} = K_{GL}(\vec{u}_L - \vec{u}_G) \quad (3.21)$$

A força de sustentação e de massa virtual não entraram no modelo para o regime simulado, assim $\vec{F}_{lift,L} = 0$ e $\vec{F}_{vm,L} = 0$.

O coeficiente de troca entre as fases é:

$$K_{GL} = \frac{\alpha_L \alpha_G \rho_G f}{\tau_G}, \quad (3.22)$$

onde f é função do arrasto e τ_G é definido por:

$$\tau_G = \frac{\rho_G d_G^2}{18 \mu_L}, \quad (3.23)$$

onde d_G é o diâmetro da fase dispersa.

Nota-se que um acréscimo no d_G faz τ_G aumentar quadraticamente o que implica em uma diminuição no coeficiente de troca entre as fases K_{GL} e isso se traduz, por fim, na equação do momentum através do termo \vec{R}_{GL} .

O fator de arrasto "f" é definido pelo modelo de Schiller e Naumann como:

$$f = \frac{C_D Re}{24}, \quad (3.24)$$

onde C_D é função do número de Reynolds que é definido por:

$$Re = \frac{\rho_L |\vec{u}_G - \vec{u}_L| d_G}{\mu_L}. \quad (3.25)$$

3.4.2 Discretização

Como dito anteriormente a simulação computacional de dinâmica dos fluidos consiste em transformar um sistema de equações diferenciais em um sistema algébrico para resolve-lo numericamente e isso é feito através do método de volumes finitos.

O método de discretização é a forma com que o software vai lidar com as descontinuidades dos valores discretizados, isto é, como irá integrar as grandezas de cada volume de controle. O método padrão de discretização utilizado pelo software é o "upwind" que faz com que o valor da face de um volume de controle derive das propriedades do centro do volume a montante do escoamento.

O ANSYS FLUENT dispõe de métodos de discretização "upwind" de primeira e segunda ordem, "power law" e QUICK.

O esquema "upwind" de primeira ordem atribui um valor de uma dada grandeza calculada no centro do elemento de uma malha a face do elemento a montante do escoamento. A discretização "upwind" de segunda ordem faz uma interpolação linear entre o centro do elemento de malha e a face a montante.

Capítulo 4

Equipamento e Procedimento Experimental

Este capítulo descreve o equipamento utilizado para a execução do experimento, a metodologia aplicada e o tratamento dos dados obtidos.

4.1 Descrição Geral da Montagem do Equipamento

Para o estudo experimental dos escoamentos bifásicos horizontais água-ar estratificados, utilizou-se a montagem apresentada na figura 4.1.

A seção de testes contém a mistura água-ar proveniente do misturador (figura 4.2). É formada por um tubo horizontal reto com um trecho transparente, que

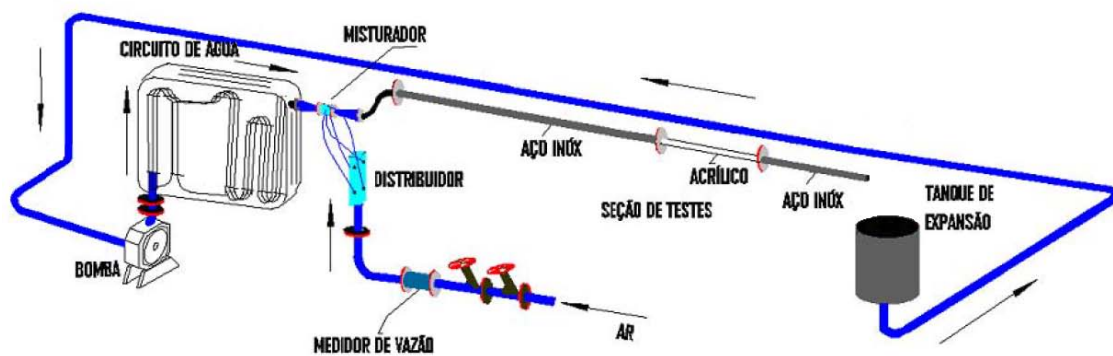


Figura 4.1: Esquema do sistema bifásico experimental.

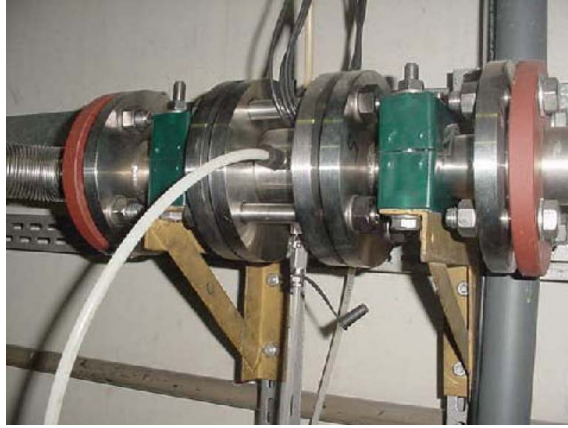


Figura 4.2: Misturador água-ar.

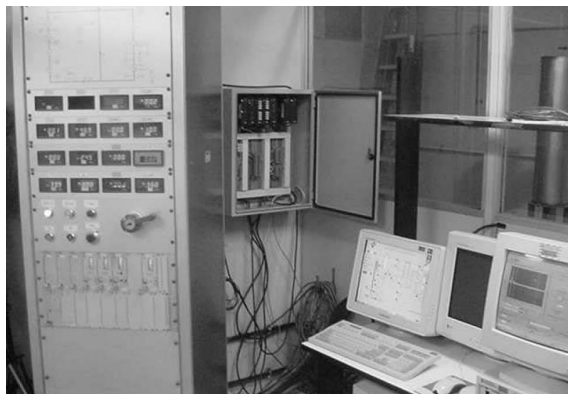


Figura 4.3: Sistema de controle e aquisição de dados.

permite a visualização dos escoamentos. O sistema de alimentação abastece a seção de testes com as quantidades necessárias de água e ar para obtenção dos regimes de escoamentos.

O sistema de controle e aquisição de dados, figura 4.3, permite o controle da velocidade de rotação da bomba e a obtenção das pressões, temperaturas e vazões de água e de ar; e da altura de líquido e fração de vazio na mistura água-ar.

4.1.1 Seção Bifásica

Na entrada da seção de testes existe um misturador do tipo venturi, onde a água e o ar provenientes, respectivamente, dos circuitos de água e ar comprimido se misturam.

O ar entra no misturador por quatro conexões, distribuídas radialmente e

defasadas de 90° entre si, situadas em uma câmara anular de 63 mm de comprimento com diâmetro interno de 63 mm. A entrada de água é feita através de um bocal convergente até um tubo com diâmetro interno de 20 mm, cujo eixo axial coincide com o da câmara, com um trecho de tela por onde a mistura água-ar é realizada. Seguindo por um bocal divergente, a mistura vai para um tubo horizontal reto de aço inoxidável AISI 316 com diâmetro nominal de 50,8 mm, schedule 5S e cerca de 6 m de comprimento, conectado ao misturador por um tubo flexível de aço inoxidável e juntas de expansão de borracha. Depois, segue para um trecho de acrílico extrudado transparente, com o mesmo diâmetro interno do tubo de aço inoxidável e cerca de 0,6 m de comprimento. O tubo de acrílico possui uma escala linear graduada com divisões de 1,0 mm, colocada na posição horizontal ao longo do eixo axial e na parte de baixo do tubo, com a finalidade de servir como referência para avaliação dos escoamentos filmados.

Após o trecho de acrílico a mistura bifásica passa por outro tubo horizontal reto, idêntico ao primeiro, com 3 m de comprimento indo então para um tanque de expansão, também em aço inoxidável e medindo 1 m de comprimento por 250 mm de diâmetro. A distância desse tanque até a extremidade do tubo de acrílico é suficiente para evitar efeitos de perturbação no escoamento nesse local. A saída do tanque de expansão está conectada em uma tubulação de PVC, com diâmetro nominal de 50,8 mm, que conduz a mistura até um tanque de separação onde a água é separada do ar por gravidade, retornando ao circuito de água. O ar é exaurido para o ambiente.

4.1.2 Circuitos de Água e de Ar Comprimido

O circuito de água consiste de uma tubulação em aço inoxidável DIN de diâmetro nominal 50 mm, ao longo da qual estão dispostos válvulas e medidores de pressão, temperatura e vazão. Por meio de uma bomba centrífuga KSB, modelo CPK - Cm 50 - 200, acionada por um motor elétrico Baumüller, modelo GNV 132M TE14 com velocidade variável, a água é impulsionada ao longo da tubulação, passando primeiramente por um trocador de calor do tipo duplo tubo em contracorrente. Depois, segue em direção à seção de medição de vazão composta de um

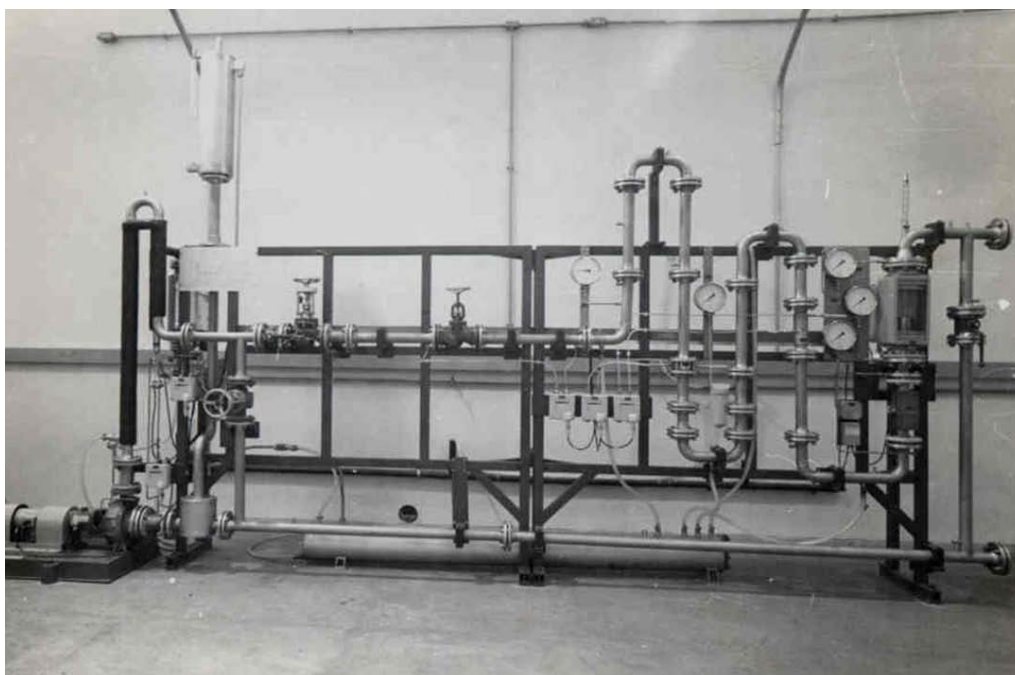


Figura 4.4: Circuito de água

medidor tipo turbina Thermo Measurement - Flow Automation, modelo 6500, um medidor ultrassônico Ultraflux, modelo MiniSonic 600 e um rotâmetro Conaut modelo 440. A seguir a água passa por uma válvula reguladora de vazões altas (acima de 1,0 m³/h) do tipo globo reta KSB, modelo ND 10/16 DIN 3791, antes de entrar no misturador. Em vazões baixas (abaixo de 1,0 m³/h, como as dos experimentos realizados para este trabalho) a água é desviada na direção do rotâmetro, por meio de válvulas Worcester de 1/2" de diâmetro do tipo esfera, indo depois para o misturador. A figura 4.4 mostra o circuito de água.

No eixo da bomba centrífuga existe um tacômetro HBM, modelo T2, que mede a velocidade de rotação. Na saída do trocador de calor a temperatura da água é dada por um termômetro de resistência de platina Hartmann & Braun, tipo Pt100-0oC, ligado a um transmissor de temperatura Fieldbus da SMAR, modelo TT302. Antes da entrada da água na válvula reguladora de vazão existe um termômetro de expansão Arma Therm e um manômetro tipo Bourdon OTA, modelo DIN 16070 que medem, respectivamente, a temperatura e a pressão nesse local.

O ar comprimido é proveniente da rede predial que é abastecida por dois compressores alternativos ligados em paralelo. O circuito de ar é formado por uma

tubulação em aço carbono galvanizado de diâmetro nominal 12,7 mm (1/2"), um sistema de filtragem - secagem, medidores de pressão e vazão, válvulas e distribuidor de vazão, e um controlador - regulador de pressão. O ar comprimido passa, primeiramente, por um equipamento de filtragem - secagem HB Domnick - Hunter, modelo DPR 0020, objetivando a retirada de umidade, gotículas de óleo e partículas sólidas. Segue então para uma seção de regulagem, controle e medição de pressão, temperatura e vazão formada por: um regulador - controlador de pressão FESTO, modelo LR - 1/2 - D - MIDI, uma tubulação em aço inoxidável AISI 316 de diâmetro nominal 3/4" schedule 5S (medidor coriolis), um manômetro padrão tipo Bourdon da marca Terbrasma, um medidor Coriolis de vazão mássica fabricado por Endress-Hauser, ligado a um conversor de corrente Fieldbus da SMAR, modelo IF302. Antes de entrar no misturador, o ar passa por um distribuidor equipado com um manômetro de precisão tipo Bourdon da marca FAMABRAS, e válvulas reguladoras de vazão do tipo FESTO GRA - $\frac{1}{4}$ - B.

4.1.3 Sistema de Controle e Aquisição dos Dados

O sistema de controle e aquisição de dados é composto pelo equipamento de controle e aquisição de dados dos circuitos de água e ar comprimido e por um equipamento ultrassônico. O equipamento automático de controle e aquisição de dados dos circuitos de água e ar comprimido, obedece o padrão Fieldbus Foundation da SMAR. É constituído de um microcomputador com processador AMD K5 500 MHz, 128 Mb de memória RAM e sistema operacional Windows NT. Possui ainda uma interface PCI, uma fonte de alimentação PS-302, uma fonte de impedância PSI-302-2, um terminador BT-302 e um controlador lógico programável LC-700. No microcomputador ficam instalados o programa SYSCON, responsável pela configuração da rede de instrumentação e pela configuração funcional de cada instrumento individualmente; e o programa de monitoração em tempo real da operação dos circuitos, AIMAXWIN. O programa de monitoração é um sistema supervisorio que permite acompanhar as condições de operação normal dos circuitos, as eventuais ocorrências de desvios e não conformidades da instrumentação. A informação transmitida por um instrumento chega ao sistema supervisorio depois de passar por ajustes, fil-

tragem de ruídos, conversão analógica e digital de sinais e conversão a unidades de engenharia. O equipamento possui ainda uma unidade "nobreak" com estabilizador de tensão e proteção contra sub-tensão e sobre-tensão, capaz de suportar a operação da rede Fieldbus dos circuitos por pelo menos 30 (trinta) minutos.

A bomba do circuito de água é controlada através de um painel de controle que consiste de um módulo tipo "rack" onde estão a chave geral do circuito, o controle de velocidade de rotação da bomba - que permite a variação linear contínua da rotação - e as leituras dos medidores de vazão tipo turbina e do medidor de rotação. Por meio de pré-amplificadores, circuitos lógicos, etc., cada medida pode ser lida em unidades tradicionais de engenharia.

O equipamento ultrassônico emprega a técnica de pulso-eco descrita na seção 3.1.1, sendo constituído por um microcomputador com processador Pentium 4, 2,6 GHz, 1,0 Gb de memória RAM e sistema operacional Windows XP; uma placa geradora-multiplexadora de sinais ultrassônicos Ultratek, com conversor A/D de 100 MHz, modelo DSPUT5000; quatro transdutores de ultrassom do tipo monocristal, ondas longitudinais e contato direto Panametrics de 10 MHz e 6 mm de diâmetro, modelo V112, conectores e cabos de transmissão de sinais. No microcomputador está instalado um programa de aquisição de sinais ultrassônicos em tempo real, em linguagem LabView da National Instruments, com tela gráfica semelhante à de um osciloscópio. Os pulsos ultrassônicos, descarregados pela placa geradora-multiplexadora nos transdutores, são capturados e enviados ao microcomputador onde o programa lê, calcula e grava os valores dos tempos de trânsito para posterior análise.

4.1.4 Sistema Ultrassônico

O programa de aquisição de sinais ultrassônicos é um software desenvolvido em ambiente LabView da National Instruments. Ele identifica a amplitude máxima do pulso de excitação (ou pulso inicial), e a amplitude máxima da primeira reflexão na interface gás-líquido (eco). Ele permite o ajuste de alguns parâmetros para a construção final do sinal recebido pelo transdutor ultrassônico, são eles:

- Atraso do trigger: números de aquisições feitas inicialmente pelo transdutor que serão descartadas. Esse ajuste elimina os primeiros sinais e permite, assim, eliminar o sinal da onda transmitida e a primeira reflexão na parede inferior da tubulação. O valor para esse parâmetro foi de 1920.
- Ganho: Ganho em decibéis aplicado ao sinal lido pelo ultrassom. Aumenta a amplitude do sinal. O valor usado para desse parâmetro foi de 33db.
- Filtros passa alta: Valor de frequência mínima a ser admitida sem grandes atenuações da amplitude pelo filtro. 1,8 MHz.
- Filtro passa baixa: Valor de frequência máxima a ser admitida sem que grandes atenuações sejam feitas pelo filtro. 6,7 MHz
- Comprimento de bufer: Número de aquisições feitas pelo transdutor que serão gravadas após o disparo (ao fim de um número de ciclos igual ao atraso do trigger).

Para cada valor de altura de líquido esperada foi feita uma nova regulagem do comprimento de buffer (entre 3000 e 5500) de modo a evitar uma leitura de múltipla reflexão indesejada. Para os pares de vazão água-ar onde a transição entre os tipos de escoamentos eram observadas o comprimento do buffer foi fixado em 7500 de modo a permitir a captura das reflexões na parede interna oposta do tubo, isto é, o comprimento de buffer era um pouco maior que o necessário para que o sistema capturasse o tempo de trânsito da onda ultrassônica viajando pela água até a parede oposta do tubo e retornando ao transdutor ultrassônico.

O sistema ultrassônico é composto por um emissor de pulso (pulser/receiver) Panametrics modelo 500PR, um osciloscópio digital (100MHz, 1, 25GS/s) Tektronix modelo TD53012 e dois transdutores Panametrics: (a) modelo A541S (diâmetro 12,7mm (1/2"), frequência 5 MHz) e (b) modelo V112 (diâmetro 6, 35mm - (1/4"), frequência 10MHz).

Quatro transdutores ultrassônico foram usados cada um em um trecho do tubo.

Tabela 4.1: incertezas

Transdutor	Posição, m
1	0,86
2	1,85
3	4,73
4	6,97

4.2 Procedimento Experimental

4.2.1 Operação da seção bifásica

Inicia-se a operação da seção bifásica abrindo-se um registro tipo globo localizado logo após o bocal de saída, no fundo do tanque de armazenamento de água. A água enche o circuito de água e a seção bifásica por gravidade, podendo-se acompanhar o enchimento pelo trecho de acrílico da seção bifásica e por um visor de nível do circuito de água. A medida que a água enche as tubulações, o ar vai sendo deslocado para os pontos mais altos e sairá através de purgadores. O ar que restar será retirado no tanque de separação assim que a água começar a circular. A seguir são ligados a torre de refrigeração, o equipamento de controle e aquisição de dados dos circuitos de água e de ar comprimido e o equipamento ultrassônico. A bomba do circuito de água é posta em marcha iniciando a circulação da água pela seção bifásica. A rotação vai sendo aumentada de forma suave até que não seja observada a presença de bolhas de ar passando pelo trecho transparente da seção bifásica. A partir de então, com a vazão constante, a água é mantida circulando por pelo menos 30 minutos.

4.2.2 Execução do Experimento

Os objetivos principais dos experimentos realizados neste trabalho foram a obtenção da altura de líquido (hl) e a determinação das vazões de água e ar na condição de transição entre os padrões de escoamentos estratificados e intermitentes.

Inicialmente o valor da vazão de água era ajustado em um valor pouco abaixo

de $1 \text{ m}^3/h$, atuando no controle de rotação da bomba. A pressão da água na entrada do misturador era mantida em $\pm 1,1$ bar para impedir que o ar comprimido entrasse no circuito de água. A seguir as válvulas reguladoras de vazão de ar comprimido eram abertas uma de cada vez até o valor desejado da vazão de ar para o experimento (o valor inicial da vazão foi $8 \text{ m}^3/h$ para todos os experimentos). Atuando na válvula de esfera situada na entrada do rotâmetro de água e na rotação da bomba a vazão de água era ajustada para o valor desejado sem que a pressão na entrada do misturador ficasse abaixo de 1,1 bar. Logo após, a vazão de ar era ajustada atuando-se nas válvulas de ar na saída do distribuidor e no controlador de pressão situado na saída do secador de ar, a fim de se obter a vazão desejada com uma pressão de 1,0 bar no manômetro a jusante do medidor Coriolis. O valor desta pressão foi usado posteriormente no cálculo do valor da vazão volumétrica de ar. Foi mantido um período de espera nunca inferior a 10 minutos para cada nova vazão de ar imposta à seção bifásica, mantendo-se a mesma vazão de água, a fim de se garantir a estabilização da vazão e da pressão de ar correspondente. Se dentro desse período fosse observado uma alteração na leitura de pressão ou na vazão de ar o sistema era regulado mais uma vez através da atuação nas mesmas válvulas e um novo intervalo de 10 minutos era aguardado. Da mesma forma foi mantido um período de espera nunca inferior a 2 minutos para cada nova vazão de água imposta à seção bifásica para a mesma vazão de ar.

4.3 Tratamento dos Dados Experimentais

O sinal ultrassônico é apresentado na forma de uma série de valores de tempo (da ordem de micro segundos) que são os tempos de viagem de ida e de volta da onda ultrassônica na água.

Mesmo com as regulagens descritas na seção anterior (4.1) o método pode apresentar erro na medição quando a primeira reflexão na interface, a que se deseja captar, pode ser desviada e não atingir de volta o transdutor.

Esses erros são fáceis de notar quando observados em um gráfico, pois geram medidas bem afastadas da média, podendo, em alguns casos, serem da ordem do

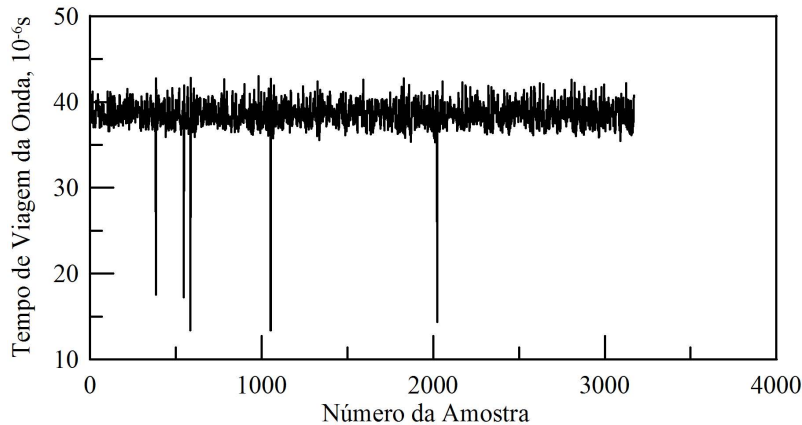


Figura 4.5: Dados obtidos em um teste com ULS 0,1214 e UGS 1,0547

dobro da média. A fim de se excluir esses sinais anômalos foi utilizado um tratamento estatístico simples largamente usado em avaliações experimentais, o critério de Chauvenet elimina qualquer resultado que apresente probabilidade menor que $\frac{1}{2N}$ de ocorrer segundo os resultados medidos. A figura 4.5 mostra um resultado das medidas de altura de líquido. Os erros de medida são facilmente notados pois se afastam muito da média da altura de líquido medida. A figura 4.6 mostra em um histograma a distribuição dos valores medidos. Uma rotina de programação em MatLab foi desenvolvida para calcular e excluir os valores segundo o critério de Chauvenet.

A velocidade do som na água em função da temperatura foi calculada segundo um polinômio do 2º. grau, obtido a partir de resultados experimentais .

Conhecidos os tempos de trânsito e a velocidade de propagação do som na água, a altura de líquido pôde ser determinada pela equação 3.1.

Calculou-se a média da altura de líquido medido pelo ultrassom e o desvio padrão supondo uma distribuição normal (figura 4.6). Foi escolhido um valor de três vezes o desvio padrão como sendo a incerteza de medição devido a oscilações inerentes ao fenômeno estudado. Isso abrange uma faixa de 99,7% dos valores que podem ser medidos sobre as mesmas condições. Além da incerteza estatística do fenômeno há também a incerteza de medição do sistema de medição estimada em 0.005m. A incerteza final da medida de altura do líquido através do ultrassom foi considerada a soma quadrática dos dois valores de incerteza. Os cálculos da veloci-

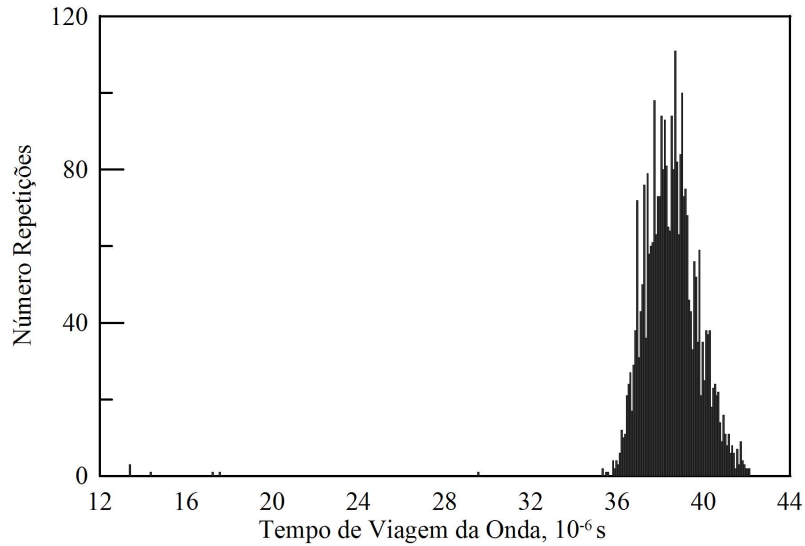


Figura 4.6: Histograma dos valores obtidos em um teste com ULS 0,1214 e UGS 1,0547

dade do som em função da temperatura, da altura do líquido em função do tempo de viagem da onda e as incertezas foram feitas através de rotinas implementadas no programa MatLab.

Determinação das vazões de ar comprimido

O ar foi tratado como gás ideal, deste modo a vazão volumétrica de ar pode ser determinada através da equação

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dm}{dt} \frac{R_{ar} T}{p}, \quad (4.1)$$

onde R é a constante do gás ideal específica para o ar, T é a temperatura do ar em graus Kelvin e p a pressão ao qual o ar está submetido. O valor da vazão mássica aplicada a equação foi a média dos valores de vazão.

Determinação das vazões de água

Para determinar a vazão de água dois casos foram considerados:

1. Se a vazão foi igual ou inferior a 1000 l/h a medição foi feita pelo rotâmetro. O valor da vazão foi o mesmo valor lido no rotâmetro. Não foram feitas correções já que as pressões e temperaturas durante os experimentos foram próximas às do ambiente. As leituras feitas foram convertidas de l/h para m^3/s .

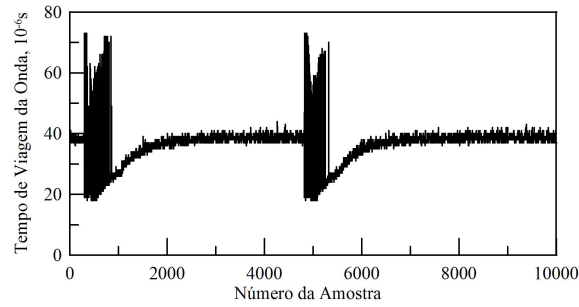


Figura 4.7: Exemplo de comportamento na região de transição

2. Se a vazão foi superior a 1000 l/h a medição foi feita pelo medidor de vazão ultrassônico monofásico. O valor da vazão foi a média dos valores dados pelo medidor ultrassônico. Pela mesma razão não foram feitas correções nas vazões lidas.

Os valores das velocidades superficiais foram calculados a partir das vazões volumétricas da água e do ar obtidas e com o valor nominal do diâmetro interno da tubulação do experimento segundo a equação 2.3 e 2.4.

Também implementado em MatLab o cálculo das alturas de líquido, a partir das velocidades superficiais de líquido e de gás, foi realizado segundo o modelo unidimensional de Taitel e Dukler 3.8. A equação foi resolvida numericamente com o método de Newton e Raphson de modo a calcular o valor de altura de líquido dado as velocidade superficial de líquido e gás.

Os experimentos feitos com pares de vazões água-ar na região de transição apresentaram alternância entre os regimes de escoamento estratificado e intermitente. Isso exigiu um tempo de aquisição maior durante o experimento e um tratamento de dados diferente dos demais, que não apresentaram alternância entre os padrões de escoamento. A figura 4.7 mostra o comportamento do da altura de líquido para o escoamento na região de transição, já a figura 4.8 mostra o comportamento intermitente. Foram identificados quais experimentos estavam na região de transição. Isso foi feito através da observação do comportamento da altura de líquido.

Para esses experimentos, onde se verificou a transição entre o regime estratificado e o intermitente, os dados obtidos passaram por um tratamento onde se removeu os trechos que apresentavam intermitência (golfadas). Esse tratamento foi

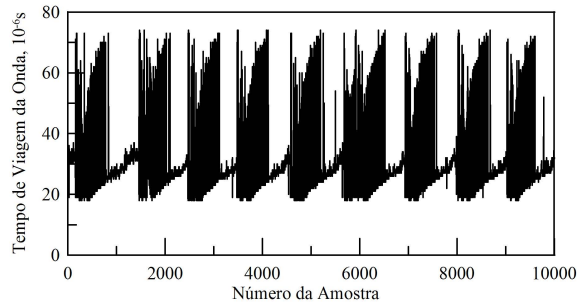


Figura 4.8: Exemplo de comportamento na região intermitente

feito com o auxílio de um programa implementado em LabView.

Os dados restantes obtidos do tratamento dos dados foram então processados como se o escoamento fosse estratificado, gerando valores de altura de líquido. Também foi calculado a altura de líquido teórica segundo modelo de Taitel e Dukler para essas medidas de vazões.

Cálculo das incertezas.

A incerteza máxima do rotâmetro de água foi considerada 3% do valor lido, segundo o manual do fabricante. A incerteza do medidor Coriolis foi de 0,05 kg/h (referência) e de 0,01 para os valores de temperatura, também medidas pelo Coriolis.

A incerteza da vazão volumétrica do ar foi calculada da seguinte forma:

$$\delta V = \left(\frac{R}{p}\right)(\delta mT + \delta Tm) \quad (4.2)$$

onde dm é a incerteza da medição da vazão mássica e dT a incerteza da temperatura do ar.

Em seu trabalho Taitel e Dukler (1976) comparam seus resultados teóricos com os resultados do trabalho de Mandhane et al. (1974) no que diz respeito as linhas de transição entre regimes de escoamento. Para tal os autores escolhem parâmetros particulares necessários para resolver as equações de seu modelo teórico como diâmetro da tubulação $D = 0.025m$ e fases com propriedades de água e ar a $25^{\circ}C$ e 1 atm. As propriedades físicas do ar e da água são semelhantes as características assumidas para a simulação, entretanto o valor do diâmetro é bem diferente. A linha de transição do regime estratificado para o intermitente segundo o modelo de Taitel e Dukler (1976) também foi construída para um diâmetro de $D = 0.025m$.

Capítulo 5

Procedimentos da Simulação

Este capítulo descreve como foi feita a simulação computacional do fenômeno estudado, quais as técnicas aplicadas e como foram processados os resultados.

5.1 Geometria e Malha

A simulação consiste na tubulação horizontal de aproximadamente duas polegadas no qual foram realizados os experimentos. Usando a característica de simetria do fenômeno (Faccini et al. (2006)) a malha pode ser reduzida pela metade para poupar tempo de simulação e memória do computador. A geometria e a malha foram construídas com o software ICEM CFD 12.0.1 seguindo os passos a seguir:

- Foram criados os pontos de referência.
- Através dos pontos de referencia as curvas foram desenhadas.
- Usando as curvas como base as superfícies foram desenhadas.
- Foi determinado um ponto de referência para o corpo do volume.
- Cada superfície foi discriminada como INLET, OUTLET, WALL e SYMMETRY.

Com o sólido formado a malha pôde ser desenvolvida. O método utilizado foi o de blocos e, para respeitar as características da geometria em questão, foi utilizado

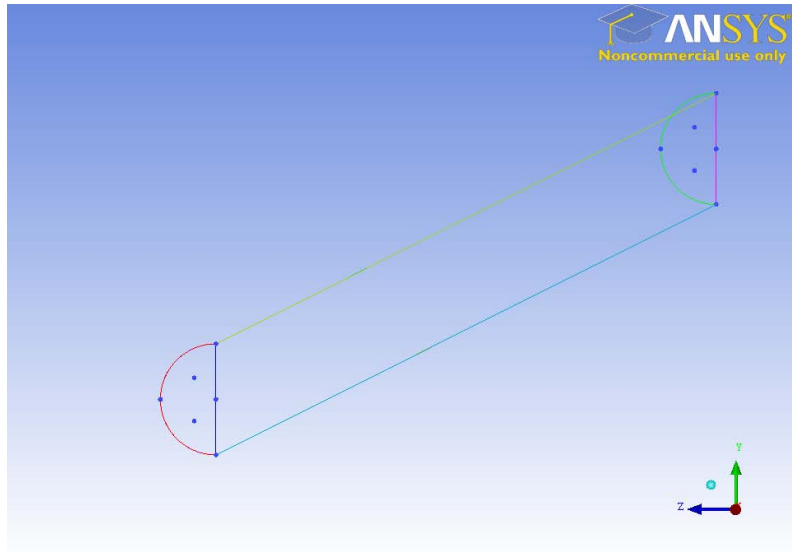


Figura 5.1: Geometria

a técnica de Ogrid. Essa técnica consiste em dividir o bloco principal em blocos menores com arestas que passam próximas à diagonal do bloco principal a fim de respeitas as características radiais da geometria.

A malha foi gerada seguindo os passos a seguir:

- Foi criado o bloco principal contendo toda a geometria.
- O Ogrid foi aplicado faceando as superfícies SYMMETRY, INLET e OUTLET.
- Foram aplicadas as divisões em cada aresta dos blocos gerados. Nesta etapa procurou-se obter elementos de malha com tamanhos semelhantes na medida do possível e as divisões foram maiores perto da parede a fim de captar melhor os fenômenos que ocorrem na camada limite.
- Foi gerada a malha segundo as divisões estabelecidas.
- A malha foi exportada em arquivo .MSH para ser carregada posteriormente no ANSYS FLUENT.

Dois tamanhos diferentes de tubos foram utilizados no decorrer das simulações, 4m e 12m. O tamanho do tubo foi estendido para tentar sanar um problema de convergência.

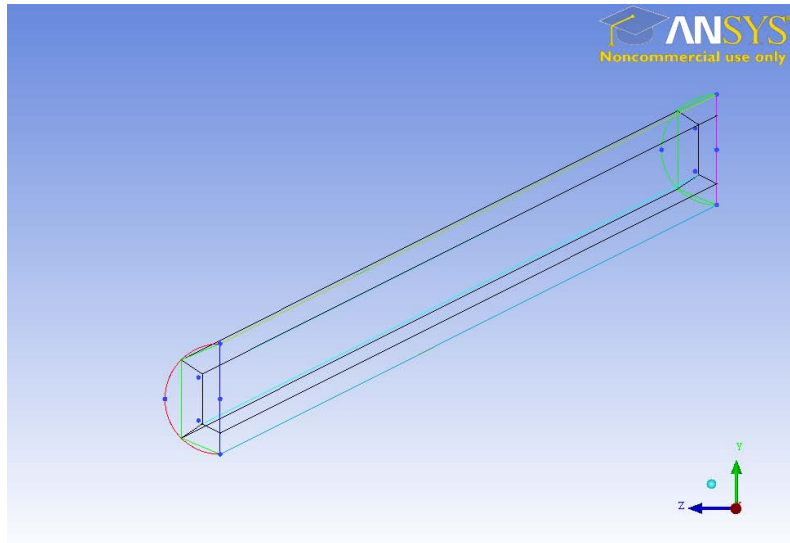


Figura 5.2: Geometria e Blocos

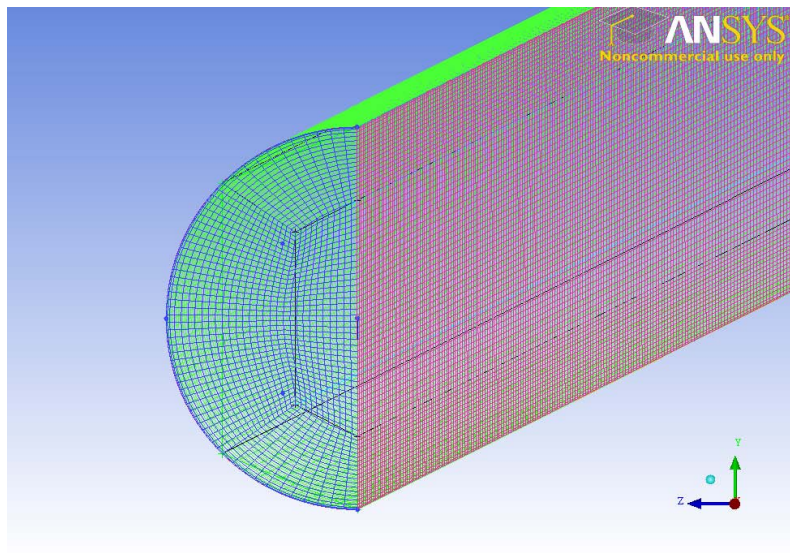


Figura 5.3: Malha

5.2 Configurações

Foi escolhido o modelo Euleriano implícito para ambas as fases. O modelo de turbulência utilizado foi o κ - ϵ . Foi definido duas fases, a líquida (liq) com água e a gasosa (gas) com ar ambos com propriedades a 25°C e incompressíveis. A fase líquida foi considerada a primária e a fase gasosa secundária. As condições de contorno são apresentadas a seguir para cada superfície:

INLET Velocidade prescrita para cada fase (liq=0,1m/s e gas=0,9). A fração de vazio também foi definida na entrada como $\alpha = 0,9$.

OUTLET Out Flow. Essa condição de contorno regula a pressão na superfície de saída de modo a simular uma abertura.

WALL Condição de não escorregamento.

SYMMETRY Condição de simetria $\partial\phi/\partial r = -\partial\phi/\partial r$ onde r é uma coordenada espacial qualquer.

O passo no tempo foi ajustado em 0,0001s, o número máximo de iterações por passo n o tempo foi de 20.

As simulações fracassadas foram registradas a fim de não serem repetidas.

O esquema de discretização upwind de primeira e segunda ordem foram testados para as geometrias com 4m e 12m de extensão. Também foram testados valores de $d_G = 0.00001$, $d_G = 0.0001$ e $d_G = 0.001$ para o diâmetro da fase dispersa.

5.3 Processamento dos Resultados

Os resultados obtidos na simulação foram tratados através do software CFD Post 12.0 da ANSYS. A altura de líquido foi visualizada na própria geometria por discriminação de cores da fração volumétrica de líquido na superfície de simetria ou por outra superfície determinada manualmente, esse método é bom para a visualização, mas não fornece nenhum valor numérico da altura. Para isso foi avaliado a evolução da fração volumétrica de líquido ao longo de uma linha traçada arbitrariamente no centro da tubulação (plano de simetria no desenho) ao longo da direção y

como mostra a figura 6.9 e 6.11 (as linhas são mostradas em amarelo). Dessa forma foi determinado a altura de líquido como sendo o valor de y que apresenta mudança da fração volumétrica de líquido de zero para um (vide 6.10 e 6.12).

Capítulo 6

Análise dos Resultados

6.1 Resultados dos Experimentos

Os resultados para as velocidades superficiais da fase líquida e da fase gasosa, as medidas de alturas de líquido na forma adimensional, a altura de líquido pelo modelo de Taitel e Dukler adimensional e o número de Reynolds para os pares de água e ar são mostrados a na tabela 6.1. Os números de Reynolds calculados ficaram entre 1616 e 6305 para a água e entre 2096 e 3568 para o ar, ou seja, boa parte dos pares de vazões apresentaram escoamento na zona de transição entre laminar e turbulento. A tabela 6.2 mostra as incertezas calculadas e o desvio percentual do modelo teórico que é a razão da diferença entre o valor medido e calculado pelo diâmetro do tubo.

A partir desses dados e com a construção das curvas de transição do modelo teórico (Taitel e Dukler (1976)) e experimental (Mandhane et al. (1974)) foram construídos os gráficos a seguir.

A incerteza de ULS é maior para as medidas mais elevadas que foram feitas com o ultrassom e não com o rotâmetro. Também é notável o aumento da incerteza da medida de altura de líquido quando ULS é maior.

A curva que delimita a transição obtida pelo modelo teórico ficou bem afastado da curva experimental, Os resultados deste experimentos foram mais condizentes com a curva experimental

O modelo de Taitel e Dukler (1976) utilizado para calcular a altura do líquido

Tabela 6.1: Resultados

ULS, m/s	UGS, m/s	\tilde{h}_L 1	\tilde{h}_L 2	\tilde{h}_L 3	\tilde{h}_L 4	\tilde{h}_L teo	ReL	ReG
0,0270	1,0575	0,2733	0,2806	0,2370	0,2456	0,3841	1616	2096
0,0405	1,0579	0,3411	0,3476	0,2937	0,3016	0,4460	2215	2179
0,0540	1,0615	0,3919	0,3949	0,3359	0,3409	0,4901	2785	2256
0,0675	1,0537	0,4417	0,4482	0,3784	0,3792	0,5258	3328	2304
0,0810	1,0568	0,4814	0,4860	0,4138	0,4117	0,5531	3863	2366
0,0944	1,0640	0,5142	0,5182	0,4451	0,4412	0,5753	4390	2432
0,1079	1,0527	0,5438	0,5468	0,4762	0,4695	0,5965	4895	2458
0,1214	1,0547	0,5661	0,5667	0,5017	0,4933	0,6132	5402	2507
0,1349	1,0534	0,5898	0,5907	0,5275	0,5177	0,6282	5901	2546
0,1627	1,0544	0,6070	0,6086	0,5429	0,5339	0,6537	6914	2627
0,0270	1,3113	0,2750	0,2873	0,2350	0,2485	0,3524	1699	2555
0,0405	1,3238	0,3336	0,3421	0,2879	0,2989	0,4114	2326	2667
0,0540	1,3078	0,3842	0,3882	0,3309	0,3383	0,4577	2907	2715
0,0675	1,3091	0,4305	0,4386	0,3707	0,3756	0,4922	3472	2787
0,0810	1,3118	0,4714	0,4775	0,4066	0,4092	0,5201	4022	2855
0,0944	1,3073	0,5025	0,5079	0,4374	0,4382	0,5443	4555	2904
0,1079	1,3061	0,5290	0,5334	0,4652	0,4652	0,5646	5081	2956
0,1214	1,3041	0,5516	0,5546	0,4901	0,4893	0,5823	5598	3002
0,1349	1,2998	0,5731	0,5773	0,5145	0,5140	0,5983	6106	3041
0,1697	1,2723	0,5811	0,5845	0,5215	0,5211	0,6338	7375	3095
0,0270	1,5760	0,2707	0,2832	0,2306	0,2463	0,3262	1776	3030
0,0405	1,5754	0,3284	0,3379	0,2826	0,2971	0,3851	2420	3125
0,0540	1,5826	0,3756	0,3808	0,3233	0,3366	0,4282	3028	3222
0,0675	1,5725	0,4203	0,4297	0,3632	0,3729	0,4637	3604	3279
0,0810	1,5752	0,4593	0,4678	0,3976	0,4061	0,4918	4168	3352
0,0944	1,5828	0,4897	0,4964	0,4264	0,4346	0,5149	4723	3430
0,1079	1,5746	0,5154	0,5214	0,4532	0,4610	0,5362	5257	3474
0,1214	1,4875	0,5359	0,5420	0,4775	0,4860	0,5627	5728	3361
0,1349	1,5674	0,5399	0,5468	0,4716	0,4803	0,5707	6305	3568

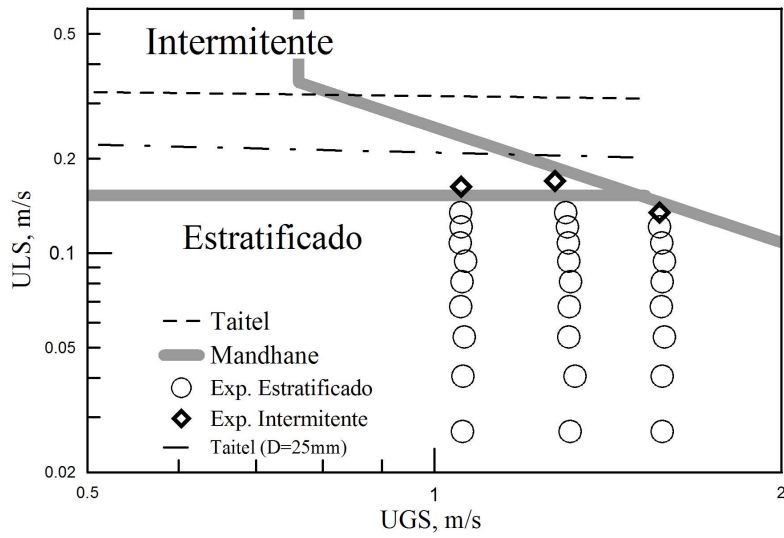


Figura 6.1: Mapa de padrão de escoamento com resultados dos experimentos

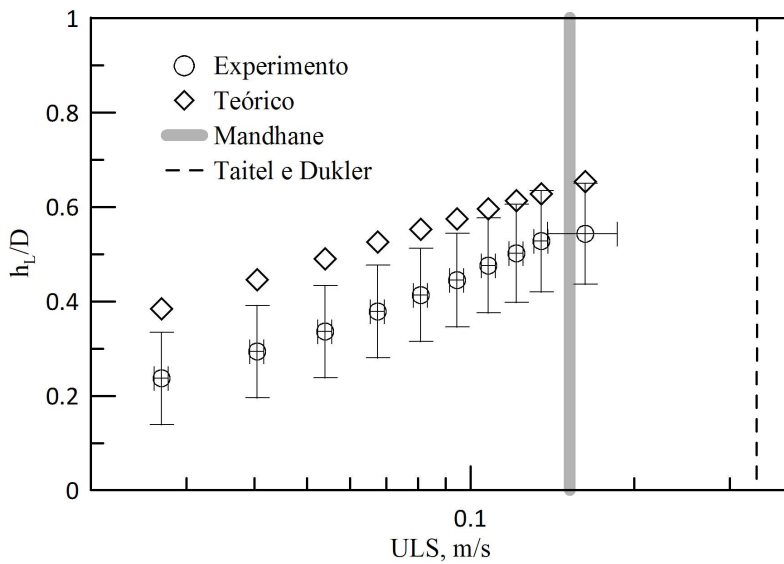


Figura 6.2: ULS contra altura de líquido para UGS em torno de 1,0 m/s

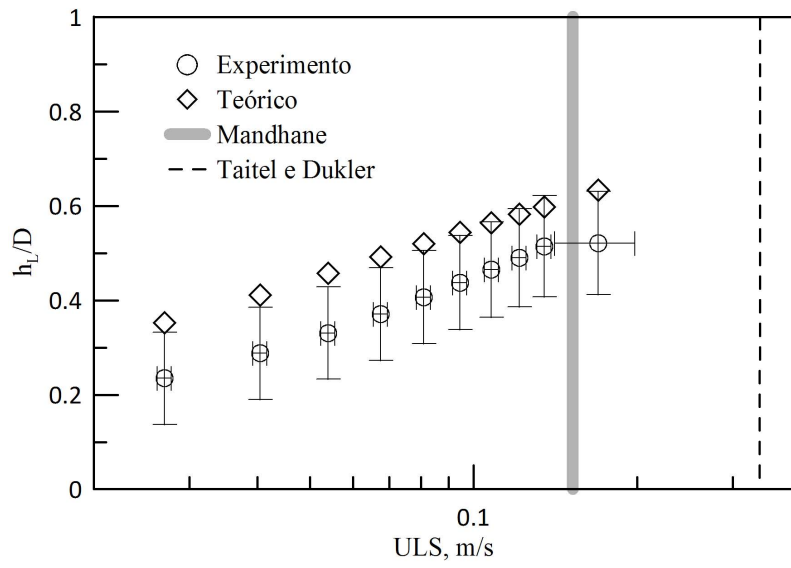


Figura 6.3: ULS contra altura de líquido para UGS em torno de 1,3m/s

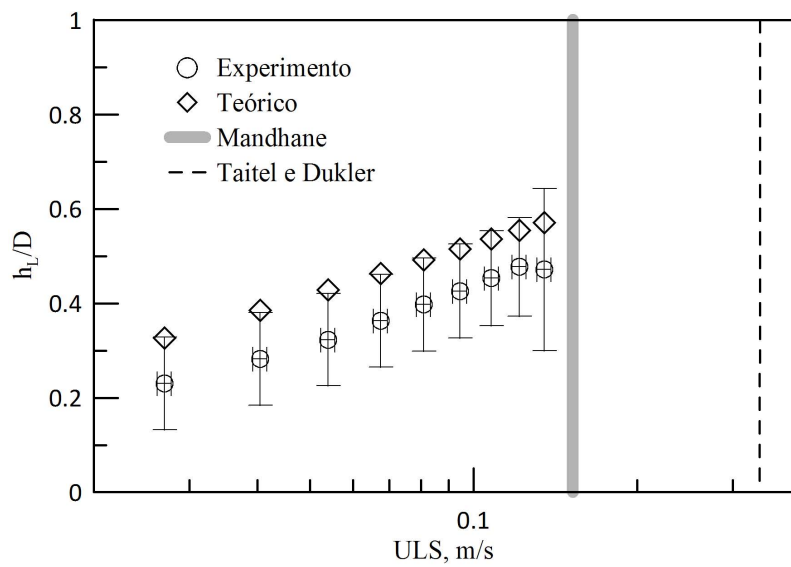


Figura 6.4: ULS contra altura de líquido para UGS em torno de 1,5m/s

Tabela 6.2: incertezas

δULS	δUGS	$\tilde{\delta h}_{L1}$	δh_{L1}	$\tilde{\delta h}_{L1}$	δh_{L1}	%desvio
0,0008	0,0795	0,0993	0,1024	0,0977	0,0983	15
0,0012	0,0749	0,1006	0,0986	0,0978	0,0978	15
0,0016	0,0780	0,1009	0,1003	0,0979	0,0980	15
0,0020	0,0854	0,1038	0,1000	0,0982	0,0982	15
0,0024	0,0768	0,1048	0,1002	0,0985	0,0984	14
0,0028	0,0714	0,1054	0,1015	0,0991	0,0988	13
0,0032	0,0736	0,1081	0,1058	0,1007	0,1001	12
0,0036	0,0788	0,1118	0,1120	0,1043	0,1031	11
0,0040	0,0971	0,1186	0,1154	0,1075	0,1055	10
0,0239	0,0785	0,1130	0,1131	0,1069	0,1053	11
0,0008	0,0747	0,1005	0,1057	0,0977	0,0977	12
0,0012	0,0778	0,1003	0,0991	0,0978	0,0978	12
0,0016	0,0879	0,1010	0,0998	0,0979	0,0980	13
0,0020	0,0832	0,1038	0,1015	0,0983	0,0984	12
0,0024	0,0775	0,1051	0,1010	0,0987	0,0986	11
0,0028	0,0849	0,1062	0,1032	0,0995	0,0991	11
0,0032	0,0798	0,1093	0,1074	0,1012	0,1007	10
0,0036	0,0763	0,1126	0,1118	0,1039	0,1028	9
0,0040	0,0870	0,1248	0,1157	0,1073	0,1057	8
0,0287	0,0820	0,1202	0,1169	0,1092	0,1085	11
0,0008	0,0915	0,1009	0,1060	0,0978	0,0978	10
0,0012	0,0766	0,1008	0,0995	0,0978	0,0978	10
0,0016	0,0796	0,1013	0,0997	0,0980	0,0980	10
0,0020	0,0711	0,1037	0,1025	0,0983	0,0984	10
0,0024	0,0785	0,1061	0,1025	0,0988	0,0988	9
0,0028	0,0727	0,1068	0,1046	0,0997	0,0994	9
0,0032	0,0737	0,1086	0,1073	0,1010	0,1004	8
0,0036	0,0793	0,1134	0,1123	0,1042	0,1030	9
0,0040	0,0784	0,1535	0,1604	0,1719	0,1704	10

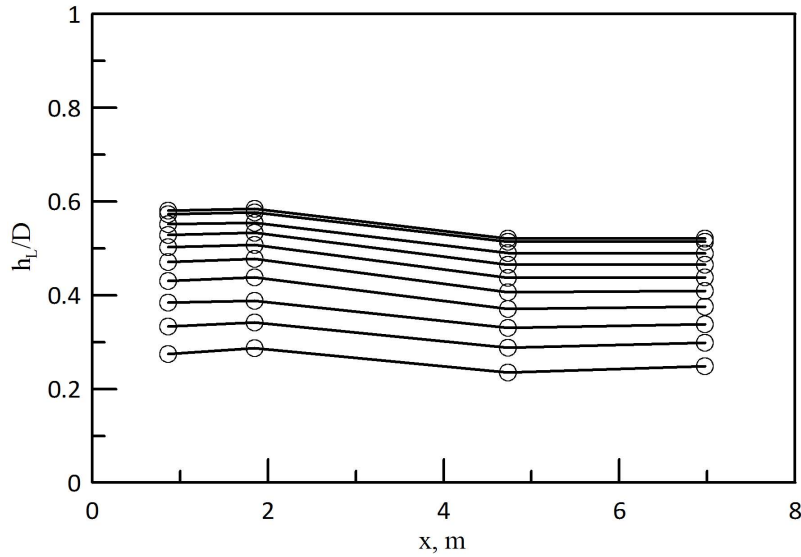


Figura 6.5: Evolução de \tilde{h}_L em x para UGS em torno de 1,0 m/s

se mostrou mais eficiente para vazões maiores tanto de água quanto de ar. Se forem desconsiderados as seis primeiras medidas, que apresentam combinações de ULS e UGS mais baixas as demais alturas de líquido calculadas através do modelo ficaram dentro da faixa de incerteza. O modelo de Taitel e Dukler (1976) se baseia em correlações empíricas para o cálculo do fator de atrito (equações 3.6 e 3.7) o que torna o modelo função do tipo de escoamento desenvolvido (laminar ou turbulento). Como mostrado na tabela 6.1 os Reynolds de cada fase estão em torno da faixa de transição o que pode ocasionar desvios dos valores calculados.

Como os quatro transdutores ultrassônicos foram distribuídos ao longo do tubo foi possível visualizar a evolução da altura de líquido em função da distância relativa ao misturador. Os gráficos 6.5, 6.6 e 6.7 mostram o comportamento da altura de líquido ao longo do tubo para todos os pares de vazão. Cada gráfico mostra o comportamento da altura de líquido ao longo do tubo para as vazões impostas de 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 e 12000 l/h para a água com exceção do 6.7 que não apresenta valores para 12000 l/h. Os valores de \tilde{h}_L são mais baixos para as ULS mais baixos em todos os casos.

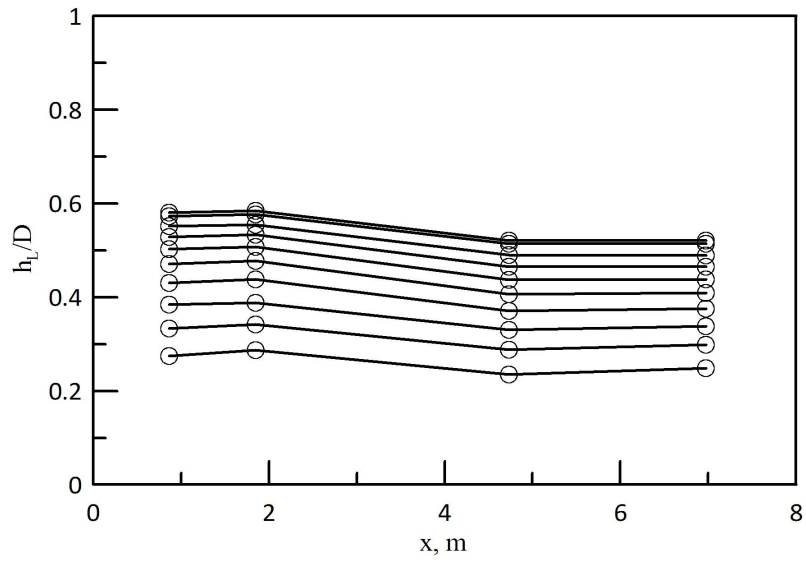


Figura 6.6: Evolução de \tilde{h}_L em x para UGS em torno de 1,3 m/s

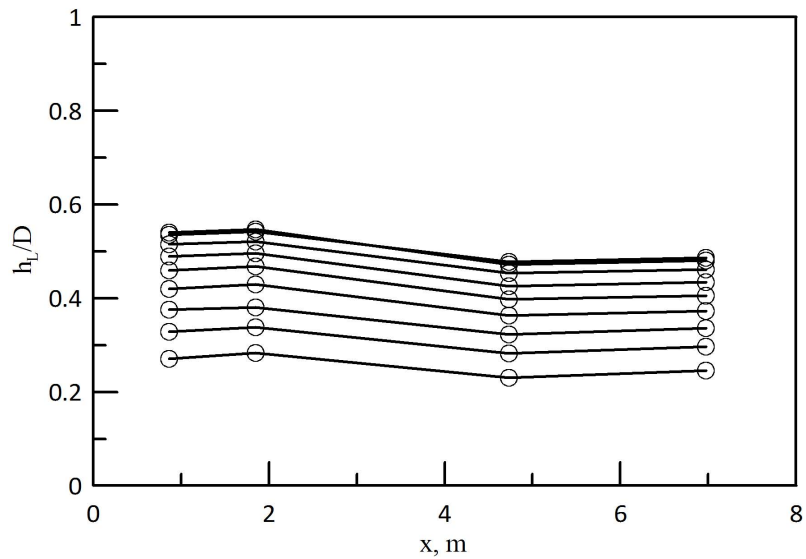


Figura 6.7: Evolução de \tilde{h}_L em x para UGS em torno de 1,5 m/s

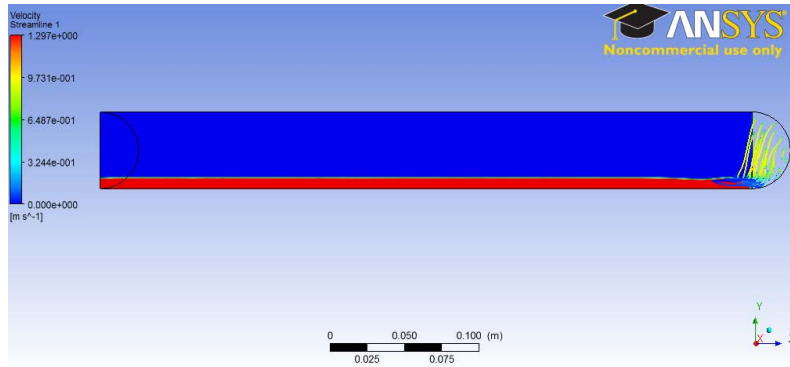


Figura 6.8: Fração volumétrica de líquido ao longo de x no plano de simetria.

6.2 Resultados da Simulação

As simulações com equações de discretização de primeira ordem apresentaram melhor tendência a convergência. Os resíduos são bastante sensíveis ao tamanho do passo no tempo escolhido, sendo menores para passos no tempo menores e isso implica em um menor número de iterações requeridas para a convergência em cada passo no tempo. O diâmetro da fase dispersa influencia na convergência da simulação e no resultado final.

O desenvolvimento do escoamento estratificado se dá rapidamente em termos de fração volumétrica de cada fase. A altura do líquido, identificada pelo salto no valor de fração volumétrica da fase, se estabiliza ao longo do eixo x rapidamente, entretanto é preciso lembrar que a simulação mais longa não passou de 2s em tempo de simulação. As figuras ?? e 6.8 mostram isso.

A altura de líquido pode ser mais bem caracterizada através de um gráfico. Foi feito um gráfico de fração volumétrica por posição no eixo y para alguns valores de x . a figura 6.9 mostra a posição dessas linhas em x e o gráfico 6.10 é o resultado. A face INLET encontra-se em $x = 12m$.

A evolução da altura da coluna de líquido ao longo de x se mantém constante rapidamente quando se afasta da superfície de entrada. É o que mostra o gráfico 6.11 onde as linhas traçadas se sobrepõem. A figura 6.12 mostra a evolução da fração volumétrica de líquido ao longo de y para regiões mais próximas da superfície de saída.

O valor do diâmetro da fase dispersa para os resultados apresentados até aqui

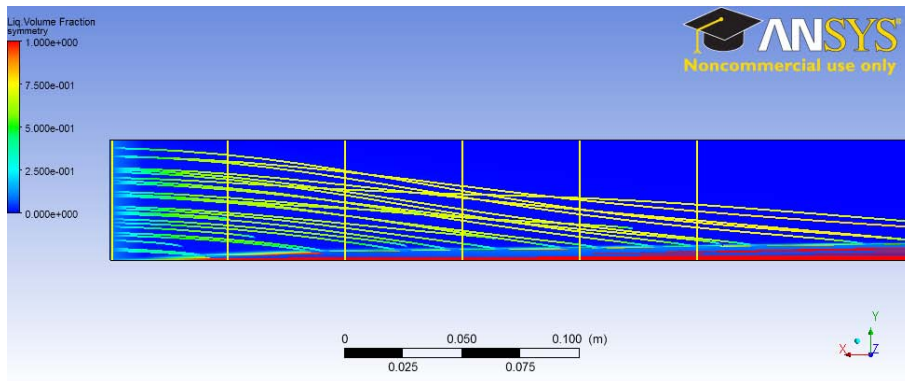


Figura 6.9: Posição em x das linhas mostradas no gráfico 6.10

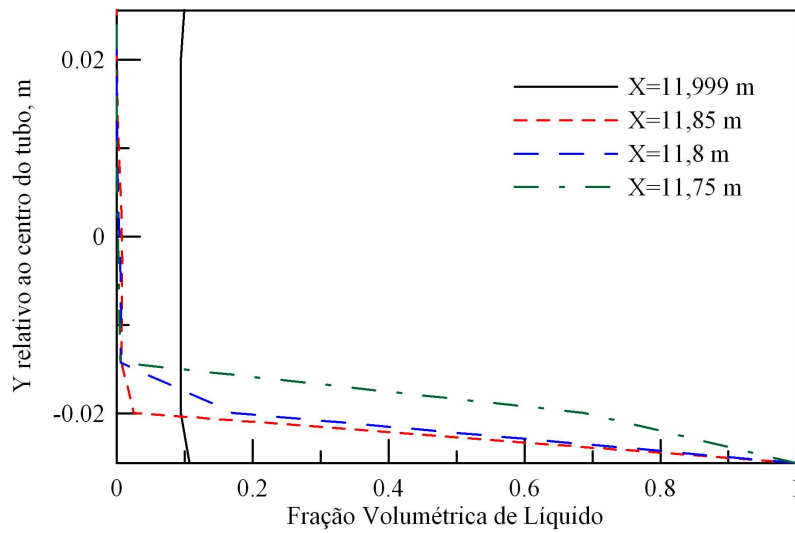


Figura 6.10: Fração volumétrica de líquido ao longo de y próximo da superfície de entrada.

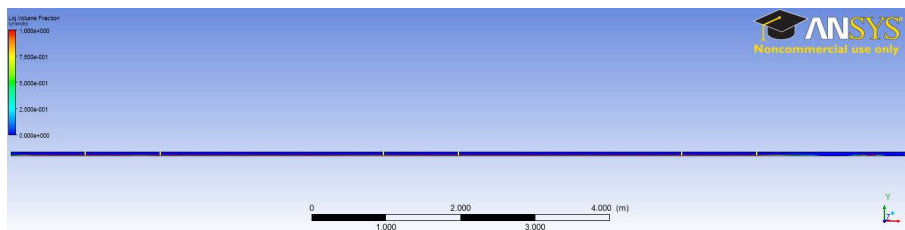


Figura 6.11: Posição em x das linhas mostradas no gráfico 6.11

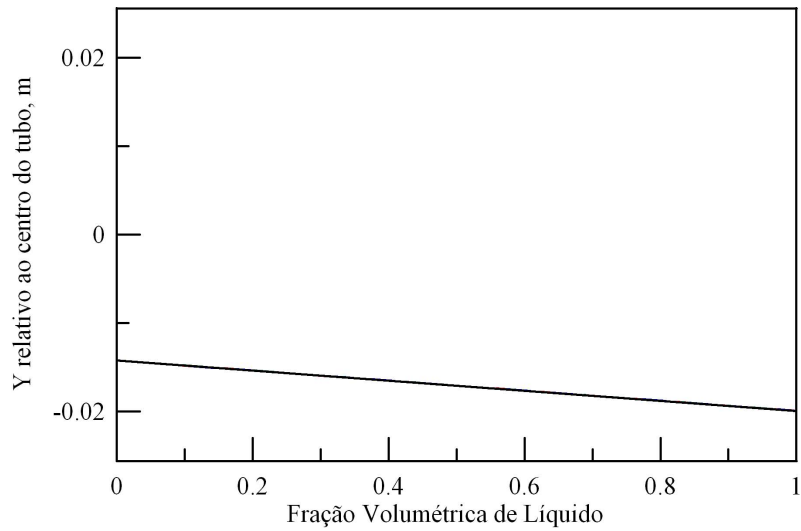


Figura 6.12: Fração volumétrica de líquido ao longo de y para vários valores de x são de $d_G = 0.001$. A figura 6.13 mostra um resultado com um minuto e meio em tempo de simulação com $d_G = 0.00001$.

Nota-se que a altura do líquido é menor e a interface entre as fases não é bem definida.

O resultado que apresentou a altura de líquido mais próxima do que se foi medido experimentalmente foi de $\tilde{h}_L = 0,2266$, o que é baixo levando em conta os valores U_{LS} e U_{GS} . O modelo de Taitel e Dukler (1976) mostra um $\tilde{h}_L = 0,6537$ para os mesmos valores.

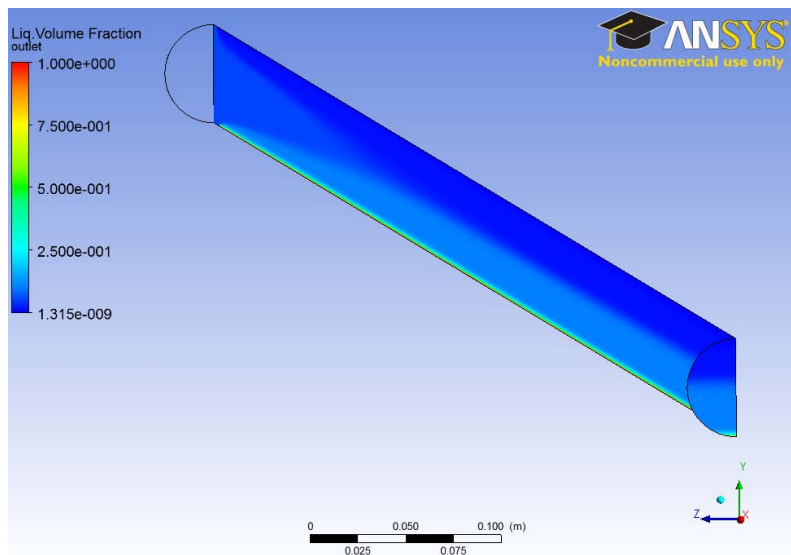


Figura 6.13: Resultado com diâmetro da fase dispersa muito baixo.

Capítulo 7

Conclusões e Sugestões

O modelo teórico apresentou resultados condizentes de altura de líquido se comparados ao medido experimentalmente com a maioria deles dentro das faixas de incerteza das medidas de altura, mesmo assim não se mostrou um bom modelo, neste caso, para predizer a região de transição para o regime intermitente. O modelo experimental se mostrou bastante apropriado para prever a região de transição entre estratificado e intermitente.

Taitel e Dukler (1976) apresentam um mapa de padrão de escoamento com linhas de transição entre regimes bem próxima do mapa experimental de Mandhane et al. (1974), mas esses valores não dependem somente de ULS e UGS, mas também das propriedades dos fluidos e do diâmetro da tubulação. Outro fator que pode ter atrapalhado o modelo teórico é o fato de ambas as fases apresentarem número de Reynolds próximo a faixa de transição.

A altura de líquido apresentou uma queda ao longo do eixo x em todas as combinações de vazão. As medidas de \tilde{h}_L obtidas na zona de transição não apresentaram anomalias com relação as outras medidas feitas na região de escoamento estratificado.

A simulação em CFD apresentou resultados mais condizentes com os experimentos quando o diâmetro da fase secundaria foi acrescido, entretanto essa mudança prejudicou a convergência.

Mesmo tendo aumentado o comprimento do tubo na simulação para melhorar a convergência não houve indícios de que isso tenha sido decisivo. Abordagens

mais cuidadosas com metodologias neste sentido poderiam demonstrar o efeito do comprimento do tubo no desenvolvimento do escoamento, mas isso só seria válido depois de acertado o valor do diâmetro da fase secundária e se fosse verificado tempos de simulação maiores.

O fator que mais influenciou o resultado foi a qualidade da malha e os esquemas de discretização escolhidos. O esquema upwind de primeira ordem apresentou o melhor resultado.

Referências Bibliográficas

- Agrawal, S. S., Gregory, G. A., e Govier, G. W. (1973). Analysis of horizontal stratified 2 phase flow in pipes. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 51(3):280–286.
- Dukler, A. E. e Hubbard, M. G. (1975). A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. *Industrial. Engineering Chemistry Fundamentals*, 14:337–347.
- Faccini, J. L. H., Harvel, G. D., Su, J., e Chang, J. S. (2004). An advanced ultrasonic technique for flow and void fraction measurements of two-phase flow. *Proc. of ICONE12*.
- Faccini, J. L. H., Sampaio, P. A. B., e Su, J. (2006). Experimental study of horizontal plug flow by ultrasonic and visualization techniques. *Proc. of ENCIT*.
- Gazley, C. (1948). *Interfacial Shear and Stability in Two Phase Flow*. PhD thesis, University of Delaware, Newark.
- Goldstein, R. J. E. (1983). *Fluid Mechanics Measurement*. Hemisphere, Washington.
- Govier, G. W. e Aziz, K. (1972). *The Flow of Complex Mixtures in Pipes*. Van Nostrand-Reinhold, New York.
- Jones, O. C. (1975). The Interrelation Between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow. 2(1971):273–306.
- Krautkrämer, J. e Krautkrämer, H. (1990). *Physical principles of ultrasonic testing of materials*. Springer-Verlag.

- Lockart, R. W. e Martinelli, R. C. (1949). Proposed correlation of data for isothermal 2-phase, 2-component flow in pipes. *Chemical Engineering Progress*, 45:39–48.
- Mandhane, J. M., Gregory, G. A., e Aziz, K. (1974). A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1:537–553.
- Masala, T. (2004). High-speed ultrasonic pulse-echo for two phase flow measurement. Master's thesis, McMaster University.
- Milne-Thomson, L. M. (1968). *Theoretical Hydrodynamics*. MacMillan.
- Rouhani, S. Z. e Sohal, M. (1983). Two-Phase Flow Patterns: A Review of Research Results. *Progress in Nuclear Energy*, 11(3).
- Taitel, Y. e Dukler, A. E. (1976). A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22:47–55.
- Whalley, P. (1996). *Two-Phase Flow and Heat Transfer*. Oxford Science, Oxford.