

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

ANTONIO AUGUSTO FRANCO NETO
VINÍCIUS SBEGHEN CHAGURI

ANÁLISE DE ESCOAMENTO LAMINAR DISPERSO ÁGUA-ÓLEO EM
TUBO HORIZONTAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

**ANTONIO AUGUSTO FRANCO NETO
VINÍCIUS SBEGHEN CHAGURI**

**ANÁLISE DE ESCOAMENTO LAMINAR DISPERSO ÁGUA-ÓLEO EM
TUBO HORIZONTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Ponta Grossa

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
Coorientador: Prof. Dr. André Damiani Rocha

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE ESCOAMENTO LAMINAR DISPERSO ÁGUA-ÓLEO EM TUBO HORIZONTAL

por

ANTONIO AUGUSTO FRANCO NETO E VINÍCIUS SBEGHEN CHAGURI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 26 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. André Damiani Rocha
Coorientador

Prof. Dr. Luís Maurício Martins de Resende
Membro Titular

Prof. Me. Marcos Vinícius Barbosa
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter nos dado saúde e força para superar as dificuldades.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbramos um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao Professor Dr. André Damiani Rocha, pelo empenho, oportunidade e apoio dedicado à elaboração deste trabalho.

Ao Professor Dr. Luiz Eduardo Melo Lima pela paciência e por todo o suporte prestado e também aos demais professores que nos auxiliaram no decorrer do curso.

Aos nossos pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E aos amigos Vitor Rosas Homem, Yuri Viveiros Souza e Marcio Custódio Adriano companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da nossa formação e que vão continuar presentes em nossas vidas com certeza.

RESUMO

NETO, Antonio Augusto Franco; CHAGURI, Vinícius Sbeghen. **Análise de escoamento laminar disperso água-óleo em tubo horizontal**. 2017. 94 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

É possível notar, ao acompanhar o ambiente industrial petrolífero, uma evolução no crescimento da extração de petróleo onde a presença de água em grandes quantidades nos poços de petróleo em fim de vida, fez com que os estudos dos escoamentos óleo-água em tubulações horizontais aumentassem, e obtivessem mais visibilidade para futuras pesquisas. O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento do fluxo simultâneo de óleo e água em tubos horizontais. Neste contexto, as simulações numéricas do fluxo disperso de duas fases em um tubo de 15m de comprimento, foram realizadas usando o pacote comercial *CFD ANSYS Fluent 15*, onde o modelo de mistura multifásico foi utilizado para resolução e análise. Apresentam-se e discutem-se os resultados numéricos em termos dos perfis de distribuição de fase, de suas velocidades e das concentrações interativas de óleo e água. Os resultados obtidos mostraram boa concordância qualitativa e quantitativa com os resultados experimentais prévios disponíveis na literatura, onde as simulações realizadas foram comparadas com as resoluções teóricas da literatura atual. Tratando-se especificamente de um modelo bifásico disperso, devido à falta de abordagem teórica, têm-se comparações tanto divergentes quanto convergentes dependendo da condição de deslizamento utilizada nas simulações.

Palavras-chave: Sistema de óleo-água. Fluxo homogêneo disperso. Modelo de mistura. Queda de pressão. Código CFD.

ABSTRACT

NETO, Antonio Augusto Franco; CHAGURI, Vinícius Sbeghen. **Analysis of water-oil dispersed laminar flow in horizontal tube**. 2017. 94 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2017.

It is possible to notice along the industrial petroleum environment, an evolution in the growth of oil extraction, where the presence of water in large quantities in the oil wells at the end of life has made the studies of the oil-water flows in horizontal pipes increase, and gain more visibility for future research. The objective of this work is to study the behavior of the simultaneous flow of oil and water in horizontal tubes. In this context, the transient numerical simulations of the dispersed two-phase flow in one 15 meter long tube were performed using the commercial CFD *ANSYS Fluent 15* package, where the multiphase mixing model was used for resolution and analysis. The numerical results are presented and discussed in terms of phase distribution profiles, their velocities and the interactive concentrations of oil and water. The results obtained in this work were found to be good qualitative and quantitative agreement with the previous experimental results available in the literature, where the simulations were compared with the theoretical resolutions of the current literature. Specifically for a dispersed biphasic model, due to the lack of theoretical approach, both divergent and convergent comparisons are obtained depending on the slip condition used in the simulations.

Keywords: Oil–water system. Homogeneous dispersed flow. Mixture model. Pressure drop. CFD Code.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Transições de regime misturado para regime estratificado e posteriormente regime com bolhas, com velocidade fixa e relativamente alta da água.	21
Figura 2 - Transição do regime estratificado para o regime com bolhas. A razão óleo/água é diminuída gradualmente com velocidade da água constante.	21
Figura 3 - Mudança no padrão de escoamento com a diminuição gradual da velocidade superficial do óleo (ft/s), mantendo-se constante a velocidade superficial da água a 0,1 ft/s.....	22
Figura 5 - Mudança no padrão de escoamento com a diminuição gradual da velocidade superficial do óleo (em ft/s), mantendo-se constante a velocidade superficial da água a 2,04 ft/s.....	23
Figura 4 - Mudança no padrão de escoamento com a diminuição gradual da velocidade superficial do óleo (em ft/s), mantendo-se constante a velocidade superficial da água a 0,682 ft/s.....	23
Figura 6 - Padrões de escoamentos encontrados por Trallero, Sarica e Brill (1997)	24
Figura 7 - Diagrama de padrões de escoamento em função das velocidades superficiais	26
Figura 8 - Diagrama de padrões de escoamento em função da fração de água e velocidade da mistura	27
Figura 9 - Padrões de escoamento observados por Elseth (2001)	28
Figura 10 - Fenômeno da inversão de fase.....	30
Figura 11 - Demonstração do pico de viscosidade apresentado do ponto de inversão de fase	31
Figura 12 - Gradiente de pressão experimental para óleo de 6,29 cp como função da razão óleo/água e velocidade da água.....	34
Figura 13 Gradiente de pressão experimental para óleo de 6,29 cp como função da razão água/óleo e velocidade do óleo.....	34
Figura 14 - Gradiente de pressão para escoamentos em baixas velocidades	35
Figura 15 - Gradiente de pressão para escoamentos em altas velocidades.....	35
Figura 16 - Comparação da queda de pressão realizada experimentalmente e utilizando o modelo de escoamento homogêneo.	36
Figura 17 - Malha 2-D com 8 colunas e 4 linhas.	39
Figura 18 - Planos de simetria.....	44
Figura 19 - Axissimetria em torno do eixo x	44
Figura 20 – Gráfico residuals	54
Figura 21- Fluxograma para simulações	57
Figura 22 - Geometria em 3 dimensões	59
Figura 23 - Geometria plana.....	59
Figura 24 - Aresta esquerda: "inlet".....	61
Figura 25 - Aresta direita: "outlet".....	61
Figura 26 - Aresta inferior: "axis".....	62

Figura 27 - Aresta superior: "wall"	62
Figura 28 - Malha 900x40 uniforme.....	63
Figura 29 - Malha 900x40 não uniforme.....	64
Figura 30 - Diagrama de padrões de escoamento	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVO GERAL	12
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 ESCOAMENTO INTERNO, VISCOSO, INCOMPRESSÍVEL DE UM FLUIDO MONOFÁSICO.....	14
2.1.2 Perfil de velocidade	15
2.2 ESCOAMENTO INTERNO BIFÁSICO LÍQUIDO-LÍQUIDO EM TUBULAÇÕES HORIZONTAIS.....	17
2.2.1 Definições em escoamentos Líquido-líquido	18
2.2.2 Padrões de escoamento.....	20
2.2.3 Inversão de Fase	29
2.2.4 Gradiente de Pressão em escoamentos dispersos.....	32
2.3 CFD - ANSYS FLUENT	37
2.3.1 Introdução ao CFD.....	37
3 METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO	56
3.1 INTRODUÇÃO.....	56
3.2 VALIDAÇÃO - GEOMETRIA.....	58
3.3 VALIDAÇÃO - MALHAS.....	60
3.4 VALIDAÇÃO – SOLUCIONADOR	64
3.4.1 Escolhendo o método de acoplamento Pressão-Velocidade.....	64
3.4.2 Discretização espacial	64
4 MÉTODOLOGIA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO.....	72
4.1 METODOLOGIA - GEOMETRIA.....	72
4.2 METODOLOGIA - MALHA.....	72
4.3 METODOLOGIA - SOLUCIONADOR	72
4.3.1 Opções gerais do Solucionador	73
4.3.2 Modelos	73
4.3.3 Materiais	74
4.3.4 Condições de Contorno	75
4.3.5 Métodos de Solução	76
4.3.6 Monitoramento	77
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1 VISÃO GERAL.....	80
5.2 TESTE 1	81
5.3 TESTE 2	84

5.4 TESTE 3	85
5.5 TESTE 4	87
6 CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

O escoamento líquido-líquido disperso está presente em muitos processos industriais e, particularmente, na produção de petróleo. A presença de água em grandes quantidades nos poços de petróleo em fim de vida e técnicas de recuperação de óleo por injeção de água ou de diluentes, fez com que os estudos dos escoamentos óleo-água em tubulações com longos deslocamentos horizontais aumentassem, e obtivessem mais visibilidade para futuras pesquisas. O transporte de dois líquidos imiscíveis em uma condução horizontal dá origem a padrões de fluxo diferentes, dependendo da velocidade, fração de volume e propriedades químicas das fases envolvidas (RODRIGUEZ, 2009).

A maioria destes regimes de fluxo tem sido estudada em laboratórios, isto é, por injeção da entrada das fases líquidas, sendo separadas ou dispersas (POUPLIN, 2009). Entender as transições entre regimes de fluxo continua a ser um problema em aberto que não será discutido aqui. Sendo escolhido apenas um regime de escoamento a ser analisado.

Escoamentos dispersos líquido-líquido compreendem idealmente gotas de um líquido dispersas em outro líquido. Geralmente, os regimes de fluxo para o fluxo de duas fases em tubos horizontais diferem devido ao papel desempenhado pela diferença de massa específica. As previsões do gradiente de pressão e da retenção em fluxo disperso bifásico tem sido estudadas por décadas. Muitas correlações empíricas sobre a queda de pressão com base nas condições de fluxo para análise das características do mesmo têm sido relatadas na literatura (WALWEKAR, 2009).

Devido à complexidade das medições de queda de pressão do líquido em alta fração de fase e velocidades, fluxos líquido-líquido dispersos não tem sido estudados em detalhes e poucos estudos numéricos são descritos na literatura. A revisão da literatura disponível mostra que os resultados da simulação do fluxo de duas fases horizontal são muito escassos. O presente trabalho visa contribuir com informações sobre este tema na literatura. Os programas comerciais de finalidade geral (por exemplo, *Fluent*, *Flow 3-D*, *Phoenix*) também estão disponíveis para simular fluxos de duas fases. Em virtude da complexidade nas medições dos parâmetros deste tipo de sistema, especialmente, com velocidades de mistura elevadas e frações de volume de fase, o presente trabalho centra-se na dinâmica de

fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD). As simulações CFD podem resultar em grandes benefícios para operação e equipamentos de refino de petróleo permitindo que os engenheiros entendam e aperfeiçoem os processos. O uso da física computacional na refinaria tornou possível analisar problemas de maior complexidade, como os que envolvem reações, fluxos multifásicos e geometrias complicadas, etc (WALWEKAR, 2009).

1.1 JUSTIFICATIVA

É possível notar, ao acompanhar o ambiente industrial petrolífero, uma evolução no crescimento da extração de petróleo onde a presença de água em grandes quantidades nos poços de petróleo em fim de vida, fez com que os estudos dos escoamentos óleo-água em tubulações horizontais aumentassem, e obtivessem mais visibilidade para futuras pesquisas. Há razões econômicas que visam uma porcentagem maior de óleo em relação à água.

Com a finalidade de se obter mais informações que possam ser utilizadas pela indústria petrolífera na produção de petróleo o assunto abordado neste trabalho auxiliará a entender um pouco mais sobre o comportamento do escoamento bifásico disperso líquido-líquido que tanto se mostra presente nas tubulações de extração de petróleo.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho de conclusão de curso é de explorar o modelo teórico-numérico de um escoamento interno bifásico de óleo-água e os compará-lo com os resultados numéricos obtidos, por meio de simulações computacionais, com a utilização da ferramenta ANSYS Fluent.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Esta proposta tem como objetivos específicos:

- Calcular a queda de pressão do escoamento bifásico óleo-água;

- Comparar modelos propostos pela literatura;
- Testar a abrangência do modelo teórico para escoamento disperso homogêneo;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

As principais características e modelos de escoamento monofásico e bifásico, assim como os fatores relevantes no programa de simulação, ANSYS Fluent, serão abordadas a seguir:

2.1 ESCOAMENTO INTERNO, VISCOSO, INCOMPRESSÍVEL DE UM FLUIDO MONOFÁSICO

É parte deste trabalho utilizar de malhas e geometria para simulações no programa ANSYS Fluent. Esta validação só é possível por meio de modelos físicos fundamentados e estabelecidos, como o regime de escoamentos monofásicos. Por este motivo, esta seção apresenta os principais embasamentos teóricos utilizados na validação.

2.1.1 - Introdução e número de Reynolds

Um escoamento em que o fluido encontra-se completamente delimitado por uma superfície sólida é chamado escoamento interno. É o caso de fluidos escoando em canos, dutos, válvulas, bocais, etc.

No escoamento interno, a ocorrência de regime laminar ou turbulento é primordialmente uma função do seu número de Reynolds, que por sua vez é função da massa específica, velocidade média, comprimento característico e viscosidade. O experimento de Reynolds demonstrou qualitativamente a diferença entre os dois tipos de escoamento: laminar e turbulento. Neste experimento, água foi colocada a escoar em um tubo transparente e de clara visualização. Durante o escoamento, uma fina camada de tinta era injetada à montante, ampliando o aspecto visual das linhas de corrente. Em baixas vazões, a camada de tinta continuava apenas como um filamento ao longo do tubo, mostrando que havia pouca dispersão de tinta, dando ao escoamento o caráter laminar. Com o aumento da vazão, o filamento de tinta foi se tornando instável até se romper, causando um movimento totalmente aleatório das partículas de fluido; característica típica de um escoamento turbulento. Este comportamento é devido à pequenas flutuações de velocidade superimpostas

entre si, causando agitação das camadas adjacentes do fluido, e com isso a dispersão da tinta. Esta transição de regime laminar para turbulento dentro do tubo ocorre para $Re = \rho.v.D/\mu \approx 2300$ (FOX, 2003).

Para um escoamento laminar em um tubo de seção transversal circular, a velocidade na entrada é uniforme e se desenvolve ao longo do escoamento. Graças à condição de não deslizamento nas paredes, sabe-se que nela a velocidade é nula ao longo de todo o tubo. Uma camada limite começa a se desenvolver adjacente às paredes. A superfície sólida exerce uma força de cisalhamento que retarda o escoamento perto da parede. Este efeito é sentido sucessivamente ao longo do tubo, moldando um perfil de velocidade parabólico.

Em escoamentos incompressíveis, a conservação da massa requer que, com o decréscimo da velocidade perto das paredes, a velocidade na região central sem atrito sofra um acréscimo para compensar, e com isso uma pequena perda de pressão, graças à equação de Bernoulli. Para satisfazer o princípio de conservação da massa, a velocidade média em qualquer seção transversal de um tubo com diâmetro constante deve ser igual à velocidade de entrada.

A certa distância da entrada do tubo, a camada limite em desenvolvimento começa a chegar à linha de centro. A partir do momento em que o perfil de velocidade não muda mais, tem-se o que é chamado de escoamento completamente desenvolvido. Esta distância que o fluido percorreu até se desenvolver completamente é a chamada região (ou comprimento) de entrada X_{fd} . Para escoamento laminar em tubos circulares, o comprimento de entrada tem valor aproximado de $X_{fd} \approx 0,06 D.Re$ (FOX, 2003).

2.1.2 Perfil de velocidade

Como discutido na seção anterior, escoamentos internos, cujo número de Reynolds é menor que 2300, são de caráter laminar, e, se o tubo for suficientemente longo, o escoamento se tornará completamente desenvolvido a uma certa distância a partir da região de entrada. Para a análise do perfil de velocidade atuante, foi considerado um escoamento permanente, incompressível, laminar, na região completamente desenvolvida de um tubo reto e circular (ÇENGEL, 2014).

No escoamento laminar completamente desenvolvido cada uma das partículas de fluido se move a uma velocidade na direção axial, com intensidade constante ao longo da linha de corrente e não há movimento na direção radial, logo, o perfil de velocidade é inalterado, representado por $u(r)$. A partir da análise de um elemento diferencial de volume em formato circular com raio r , espessura dr e comprimento dx , obtem-se a equação da quantidade de movimento aplicando um balanço de momento neste elemento diferencial. O elemento envolve apenas efeitos da pressão e da viscosidade, logo, as forças de pressão e de cisalhamento (devida à viscosidade) devem se contrabalancear. Realizando um balanço de forças no elemento de volume voltado na direção do escoamento, tem-se:

$$(2\pi r dr P)_x - (2\pi r dr P)_{x+dx} + (2\pi r dx \tau)_r - (2\pi r dx \tau)_{r+dr} = 0 \quad (1)$$

Dividindo a Equação (1) por $(2\pi dr dx)$, tem-se:

$$r \frac{P_{x+dx} - P_x}{dx} + \frac{(r\tau)_{r+dr} - r\tau_r}{dr} = 0 \quad (2)$$

Aplicando o limite para $dr, dx \rightarrow 0$:

$$r \frac{dP}{dx} + \frac{d(r\tau)}{dr} = 0 \quad (3)$$

Substituindo $\tau = -\mu(du/dr)$, dividindo por r e considerando μ constante, tem-se:

$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} r \frac{du}{dr} = \frac{dP}{dx} \quad (4)$$

Isolando $u(r)$ e integrando duas vezes (condições de contorno de simetria e não-deslizamento) tem-se:

$$u(r) = -\frac{R^2}{4\mu} \frac{dP}{dx} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (5)$$

Portanto, o perfil de velocidade na região de escoamento completamente desenvolvido é parabólico, com seu valor máximo na linha de centro e valor mínimo

nas paredes. Nota-se, também, que a velocidade axial u é positiva para r , portanto, o gradiente de pressão axial dP/dx deve ser sempre negativo, o que faz sentido, já que a pressão deve diminuir ao longo do escoamento devido aos efeitos viscosos.

Para definir o perfil de velocidade em função da velocidade média, utiliza-se a definição:

$$V_m = \int_0^R \rho u(r) 2\pi r dr = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r) r dr \quad (6)$$

Substituindo a Equação (5) na Equação (6) e isolando $u(r)$:

$$u(r) = 2V_m \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (7)$$

Esta é a forma mais convencional de se escrever a equação de perfil de velocidade, uma vez que se pode retirar a velocidade média a partir da vazão, desde que seja conhecida.

Como a velocidade é máxima na linha de centro ($r = 0$), temos então:

$$u_{max} = 2V_m \quad (8)$$

Conclui-se que a velocidade máxima em um escoamento interno, laminar, completamente desenvolvido, é o dobro da velocidade média (ÇENGEL, 2014).

2.2 ESCOAMENTO INTERNO BIFÁSICO LÍQUIDO-LÍQUIDO EM TUBULAÇÕES HORIZONTAIS

É comum na produção e extração de petróleo haver presença de água escoando juntamente com o óleo. A presença da água modifica a maneira com que este fluido, agora uma mistura imiscível, se transporta dentro das tubulações. Estas tubulações muitas vezes possuem vários quilômetros de comprimento, fato que aumenta a preocupação com fatores como bombeamento, perdas de carga e padrões de escoamento. Dependendo da velocidade da mistura e fração de cada fluido, o padrão de escoamento (ou regime de escoamento) será diferente, e consequentemente o entendimento de fatores que o interferem também irão se

alterar, como por exemplo a potência de bombeamento ou atrito nas paredes no tubo (RODRIGUEZ, 2009).

Outro fenômeno relevante no estudo de escoamentos bifásicos líquido-líquido é a inversão de fase. Em parcelas baixas de água, esta será a fase dispersa em forma de bolhas em meio à fase contínua (geralmente óleo), mas a medida em que a porcentagem de água aumenta, esta pode se tornar a fase contínua, e o óleo passa a se comportar como a fase dispersa. Esta mudança na continuidade de uma fase para a outra é a chamada inversão de fase. A importância deste fenômeno dá-se graças às condições particulares que ocorrem no escoamento quando se encontra perto do ponto de inversão, como mudança na viscosidade da água em dispersão e conseqüentemente aumento no gradiente de pressão no duto, fato que deve ao máximo ser evitado (ELSETH, 2001).

2.2.1 Definições em Escoamentos Líquido-líquido

É importante definir alguns conceitos básicos da literatura anteriormente à análise de fatores como regime de escoamento, perda de carga e inversão de fase.

Considerando então um escoamento água-óleo, em um duto com área de seção transversal A e cada uma das fases com vazões volumétricas diferentes: Q_w para vazão volumétrica da água e Q_o para vazão volumétrica do óleo. Então a parcela (fração volumétrica) de cada fase é definida como:

$$C_o = \frac{Q_o}{Q_o + Q_w} \quad C_w = \frac{Q_w}{Q_o + Q_w} \quad (9)$$

Com base nas vazões volumétricas, pode-se calcular a velocidade superficial do óleo e da água, respectivamente:

$$U_{so} = \frac{Q_o}{A} \quad U_{sw} = \frac{Q_w}{A} \quad (10)$$

Combinando as Equações (9) com a Equação (10), temos a relação:

$$\frac{C_o}{C_w} = \frac{U_{so}}{U_{sw}} \quad (11)$$

A Equação (11) demonstra a relação entre velocidades superficiais e a frações volumétricas de cada fase. Esta relação presume que cada fase passa por uma seção transversal A, porém, em escoamentos bifásicos, cada fase ocupa diferentes áreas da seção transversal. A velocidade real de cada fase, chamada também de velocidade *in-situ*, é diferente da velocidade superficial, pois considera que cada fase passa por uma área menor que a área total da seção transversal. Chamando a área da seção transversal que passa o óleo de A_o e a área da seção transversal que passa a água de A_w , pode-se relacionar individualmente cada velocidade *in-situ*:

$$U_o = \frac{Q_o}{A_o} \quad U_w = \frac{Q_w}{A_w} \quad (12)$$

Com as Equações (12), define-se a fração volumétrica real ou *in-situ* do óleo e da água:

$$\varepsilon_o = \frac{A_o}{A} \quad \varepsilon_w = \frac{A_w}{A} \quad (13)$$

É possível relacionar então as velocidades reais e superficiais de cada fase através da fração volumétrica *in-situ*.

Inserindo as Equações (10) nas Equações (12) e o resultado delas com a Equação (13) encontra-se as relações:

$$U_o = \frac{U_{so}}{\varepsilon_o} \quad U_w = \frac{U_{sw}}{\varepsilon_w} \quad (14)$$

Ainda, a velocidade da mistura, é definida como a soma das vazões de cada fase, escoando pela área da seção transversal, ou simplesmente a soma de cada velocidade superficial (ELSETH, 2001):

$$U_m = \frac{Q_o + Q_w}{A} = U_{so} + U_{sw} \quad (15)$$

2.2.2 Padrões de Escoamento

De um ponto de vista prático, a maior dificuldade em se lidar com escoamentos multifásicos é a fato de que fatores como massa, quantidade de movimento e transferência de energia são bem sensíveis à distribuição geométrica do escoamento, sendo que esta pode afetar fortemente por exemplo, a área disponível para troca de massa e quantidade de movimento entre as fases. Portanto, reconhece-se que existe uma dificuldade no acoplamento entre duas características de um escoamento multifásico. A complexidade deste acoplamento representa um grande desafio no estudo e entendimento dos escoamentos multifásicos.

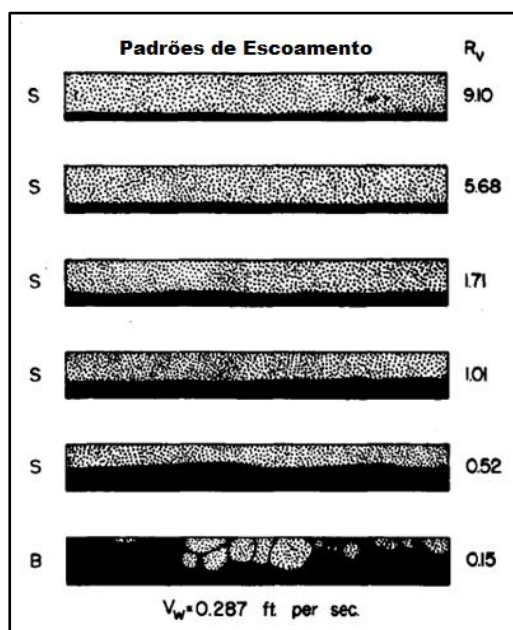
Portanto, um ponto de partida adequado seria o estudo destas distribuições geométricas, ou padrões de escoamento que são comumente observados em escoamentos multifásicos. Existe um número substancial de artigos, experimentos e pesquisas feitas para mapear os diferentes regimes de escoamento, porém, existem várias dificuldades em padronizar um modelo para todos eles. A transição de um regime ao outro pode ser bem inconstante dependendo de características de escoamento como densidade das substâncias e rugosidade da tubulação, por exemplo, portanto, muitos padrões são apenas válidos em determinadas condições específicas (BRENNEN, 2005).

Na tentativa de validar um padrão para regimes de escoamento, Russell, Hodgson e Govier (1959) foram um dos pioneiros a examinarem através de experimentos em tubos horizontais, utilizando óleo e água como mistura, o comportamento e distribuição geométrica de cada uma das fases. Russell, Hodgson e Govier (1959) classificaram três tipos de padrões de escoamento a partir de resultados experimentais: misturado (M), estratificado (S) e com bolhas (B). As condições do escoamento foram investigadas para quocientes de volume óleo/água variando de 0,1 a 10 e velocidade superficial da água em um intervalo entre 0,116

ft/s e 3,55 ft/s (0,035 m/s a 1,08 m/s). A tubulação de teste era transparente com 1 polegada de diâmetro interno (0,025 m) e 35 pés de comprimento (10 m), porém, a seção utilizada para escoar tinha aproximadamente 28 pés (8,5 m). O óleo utilizado foi um óleo comercial com viscosidade de 18 cp (0,018 Pa.s) e gravidade específica de 0,834. A água possuía uma viscosidade de 0,894 cp e o escoamento tinha uma temperatura de 77 °F (25 °C).

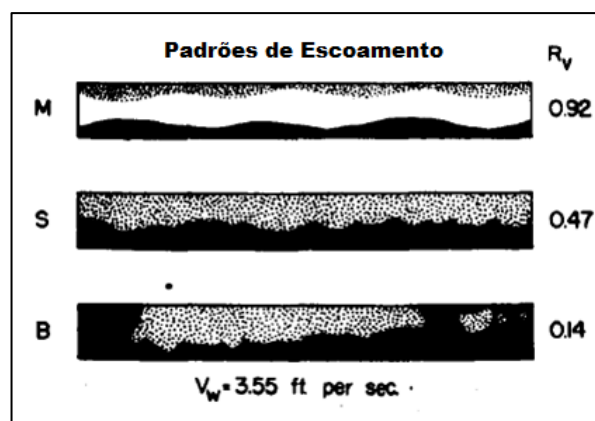
Através de observação e desenhos, foram definidos os padrões de escoamento conforme Figuras 1 e 2:

Figura 2 - Transição do regime estratificado para o regime com bolhas. A razão óleo/água é diminuída gradualmente com velocidade da água constante.



Fonte: Russell, Hodgon e Govier (1959)

Figura 1 - Transições de regime misturado para regime estratificado e posteriormente regime com bolhas, com velocidade fixa e relativamente alta da água.



Fonte: Russell, Hodgon e Govier (1959)

As três distribuições geométricas das fases ocorreram em regimes de escoamento laminar e turbulento. Apesar de não haver um número de Reynolds definido para onde ocorre esta transição, utilizou-se a relação proposta por Walker para placas planas paralelas, onde a transição ocorre em valores de Reynolds próximos a 2000 (RUSSELL; HODGON; GOVIER, 1959)

Anos depois em 1961, Charles se reúne com Hodgon e Govier para realizarem um estudo semelhante. Óleo e água são postos para escoar

simultaneamente em uma tubulação transparente de 1,04 polegadas de diâmetro (0,0264 m) e 24 pés de comprimento na seção de teste (7,3 m).

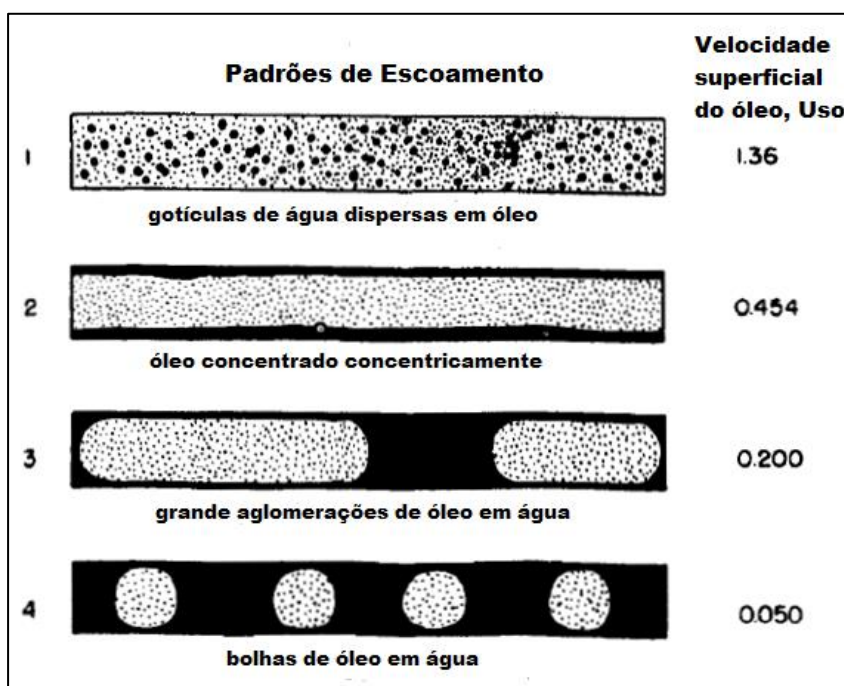
Os óleos utilizados são comerciais e possuem três diferentes viscosidades: 6,29 cp , 16,8 cp e 65 cp. As velocidades superficiais dos óleos foram variadas dentro de um intervalo de 0,05 ft/s a 3 ft/s (0,015 m/s a 0,91 m/s). Tetracloreto de carbono foi adicionado a todos os óleos para que tenham uma densidade semelhante da água de 998 kg/m³, ou seja, gravidade específica 1.

A velocidade superficial da água foi variada de 0,1 ft/s a 3,5 ft/s (0,03 m/s a 1,07 m/s).

Novamente a fração volumétrica de óleo/água foi variada de 0,1 a 10 e a temperatura do escoamento regulada à 25 °C.

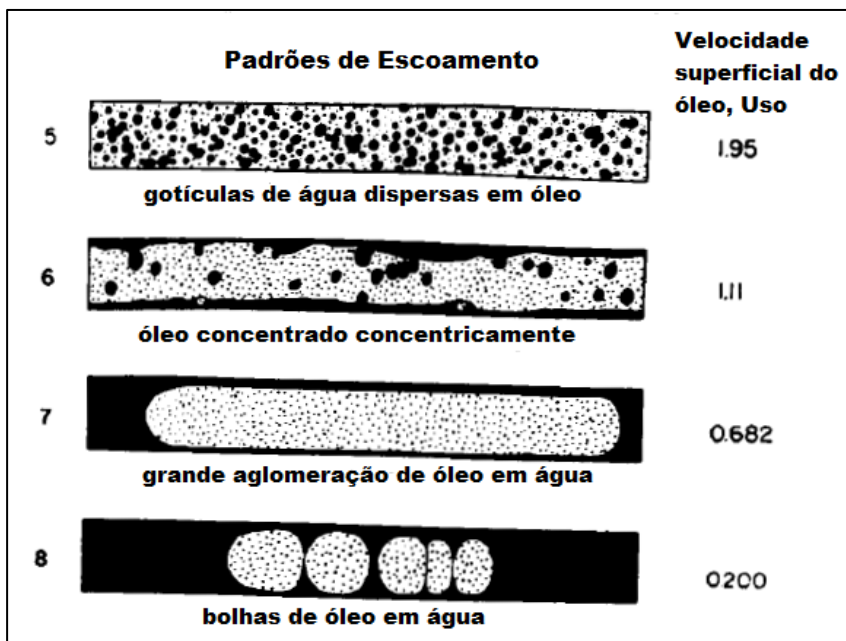
Diversos padrões de escoamento foram observados com a variação da velocidade superficial de cada óleo. Padrões semelhantes foram encontrados para a mesma velocidade e diferentes viscosidades do óleo. As Figuras 3, 4 e 5 a seguir representam desenhos feitos a partir do experimento com o óleo de viscosidade 16,8 cp (CHARLES; HODGON; GOVIER, 1961).

Figura 3 - Mudança no padrão de escoamento com a diminuição gradual da velocidade superficial do óleo (ft/s), mantendo-se constante a velocidade superficial da água a 0,1 ft/s.



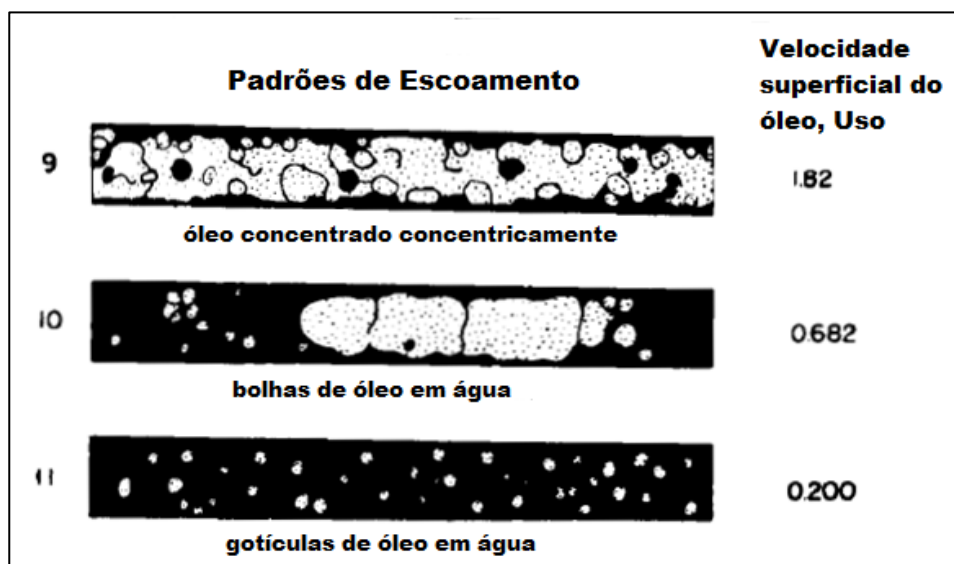
Fonte: Charles, Hodgson e Govier (1961)

Figura 4 - Mudança no padrão de escoamento com a diminuição gradual da velocidade superficial do óleo (em ft/s), mantendo-se constante a velocidade superficial da água a 0,682 ft/s.



Fonte: Charles, Hodgson e Govier (1961)

Figura 5 - Mudança no padrão de escoamento com a diminuição gradual da velocidade superficial do óleo (em ft/s), mantendo-se constante a velocidade superficial da água a 2,04 ft/s.



Fonte: Charles, Hodgson e Govier (1961)

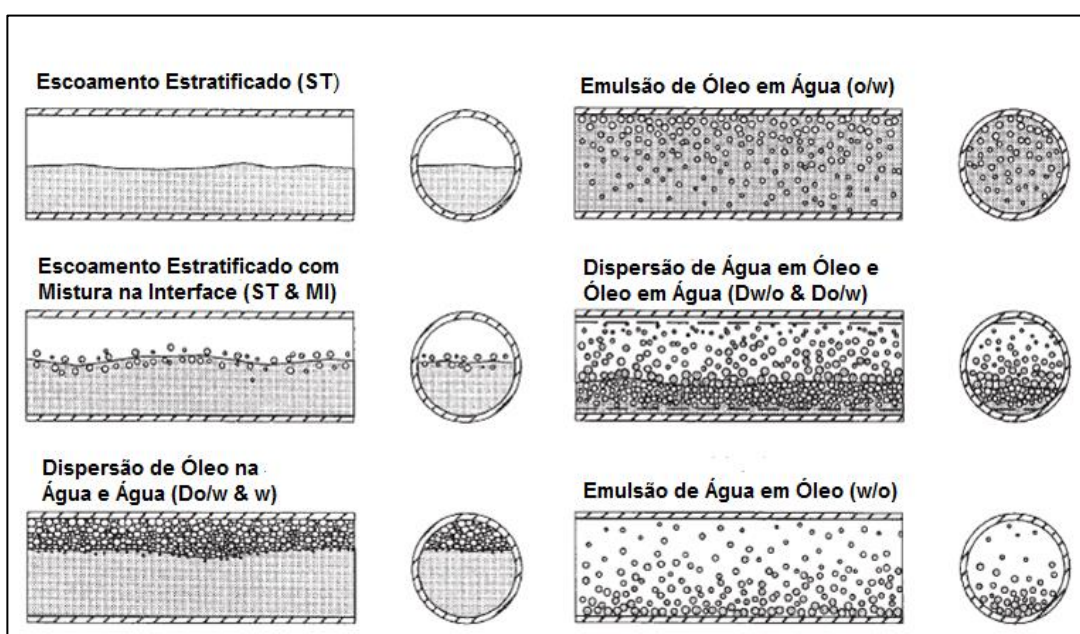
Conforme se observa nas Figuras 3 e 4, para velocidade relativa baixa da água, o regime vai de (1) gotículas de água dispersas em óleo contínuo, para (2) óleo concentrado concentricamente e uma camada de água nas paredes, quando se

diminui a velocidade superficial do óleo. Uma seguinte redução nesta velocidade mostra um perfil com (3) grande aglomerações de óleo em água. Em velocidades muito baixas do óleo, o regime se mostra com (4) bolhas de óleo em água.

A Figura 5 mostra os regimes de escoamento para uma velocidade superficial alta e fixa da água. Para velocidades superficiais igualmente altas do óleo, encontrou-se uma concentração concêntrica de óleo e camadas de água, porém o regime pareceu mais instável e espalhado. Com a diminuição da velocidade superficial do óleo, observou-se a formação de bolhas de óleo em um meio de água mais contínuo. Para velocidades baixas do óleo, ficou difícil de distinguir entre bolhas e gotículas encontradas na água (contínuo). O desenho mostra ambas as presenças.

Continuando na linha do tempo de experimentos com escoamento bifásicos em tubos horizontais, Trallero, Sarica e Brill (1997) realizaram experimentos com óleo e água cuja razão entre suas densidades ρ_o/ρ_w de 0,85 e a razão entre suas viscosidades μ_o/μ_w de 29,6. A tubulação tinha 50,13 mm de diâmetro e a seção de teste 15,54 m de comprimento. A temperatura do escoamento foi medida em 25,6 °C. Os diversos padrões de escoamento foram encontrados variando as velocidades superficiais de cada fase. Um resumo dos seis padrões encontrados pode ser visto na Figura 6:

Figura 6 - Padrões de escoamentos encontrados por Trallero, Sarica e Brill (1997)



Fonte: Trallero, Sarica e Brill (1997)

Eles classificaram os padrões de escoamentos em dois grupos principais:

1. Escoamentos segregados - Escoamento estratificado (ST) e escoamento estratificado com mistura na interface (ST & MI).
2. Escoamentos dispersos - Podem ser dominantes por água (água contínua): Dispersão de óleo na água e água (Do/w & w), emulsão de óleo em água (o/w). Ou dominantes em óleo (óleo contínuo): dispersão de água em óleo e óleo em água (Dw/o & Do/w) e emulsão de água em óleo (w/o)

Para baixas velocidades superficiais U_{so} e U_{sw} , o escoamento é regido pela gravidade e as fases são totalmente segregadas. Pequenos aumentos na vazão de óleo e água não alteram o padrão de escoamento. Com o aumento das velocidades superficiais mantendo-se a velocidade da mistura $U_m < 0,1$ m/s, observa-se a presença de pequenas ondas e o início do surgimento da fase estratificada (ST).

Com velocidade da mistura a aproximadamente 0,25 m/s e com fração de água definido como $f_w = U_{sw}/U_{so}$ entre 0,05 e 0,95 as primeiras gotículas começam a aparecer. Para $f_w > 0,62$ pequenas dispersões de óleo começam a surgir, e o escoamento tem um caráter ST & MI. Este padrão é mantido para velocidades superficiais da água entre 0,48 m/s e 1 m/s e velocidade superficial do óleo abaixo de 0,8 m/s.

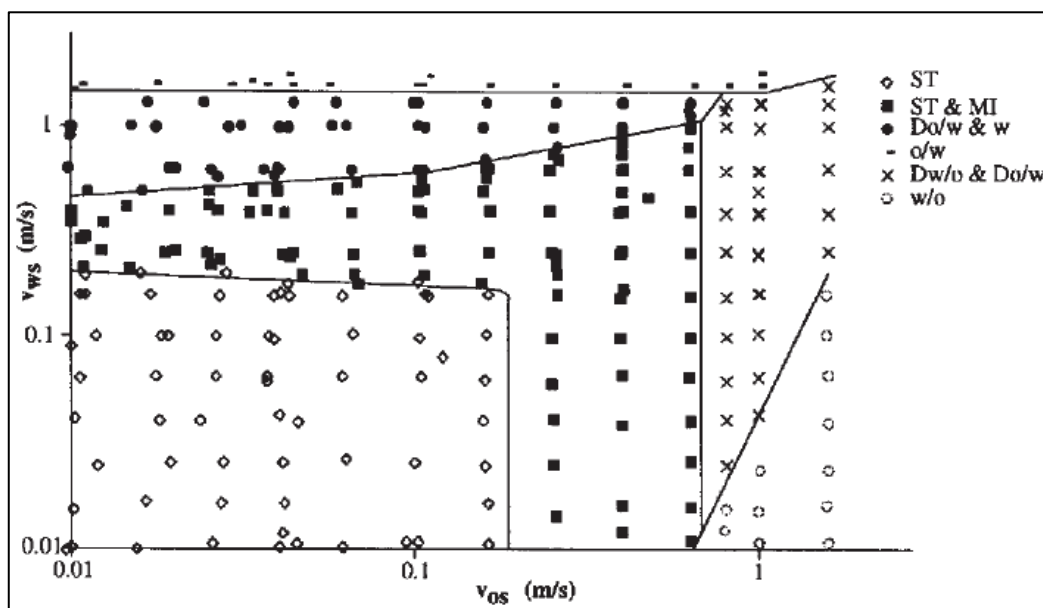
Na tentativa de identificar as regiões de dominância da água ou óleo, foi observado que para $U_{sw} = 0,5$ m/s e $U_{so} < 0,8$ m/s o escoamento tem fase da água como contínuo, enquanto para $U_{so} > 0,8$ m/s e $f_w < 0,62$ o escoamento tem fase de óleo dominante. Na dominância de água, se $U_{sw} > 0,5$ m/s, a continuidade da camada de água é interrompida e se forma um padrão do tipo Do/w & w e a camada de água continua na região superior do tubo como uma fina camada lubrificando o óleo.

Com um aumento da velocidade superficial da água e uma fração de água relativamente alta, mais dispersões de óleo começam a se formar na água. Quando $U_{sw} > 1,6$ m/s e $f_w > 0,62$, quase todo óleo já está disperso e o padrão formado é do tipo o/w (emulsão de óleo em água - óleo disperso em água). Caso a fase dominante fosse invertida (f_w baixo, logo óleo dominante) e velocidade da mistura $U_m > 0,7$ m/s,

teríamos um escoamento com padrão w/o (emulsão de água em óleo - água dispersa em óleo). Neste caso, com um aumento da velocidade superficial da água, a homogeneidade da mistura começa a se romper e uma camada de água de forma, as interfaces se misturam e os dois tipos de dispersão passam a coexistir com o padrão Dw/o & Do/w.

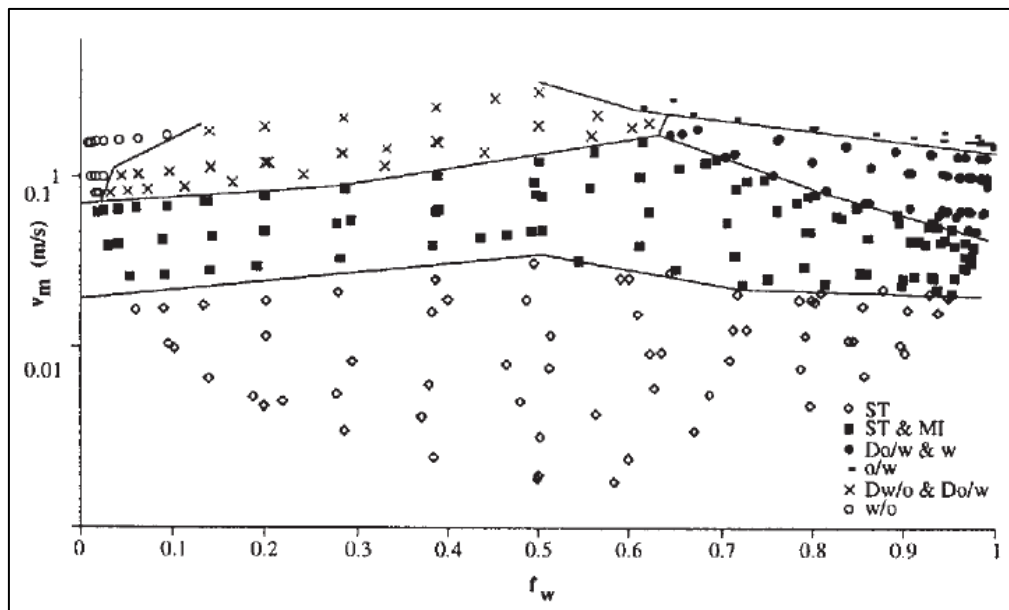
Com todos os seis padrões de escoamentos definidos em certo intervalo de fração de água e velocidades superficiais, foram construídos dois diagramas de escoamento, onde se pode visualizar os padrões para cada combinação de velocidades superficiais e fração de água conforme Figuras 7 e 8 (TRALLERO; SARICA; BRILL, 1997).

Figura 7 - Diagrama de padrões de escoamento em função das velocidades superficiais



Fonte: Trallero, Sarica e Brill (1997)

Figura 8 - Diagrama de padrões de escoamento em função da fração de água e velocidade da mistura

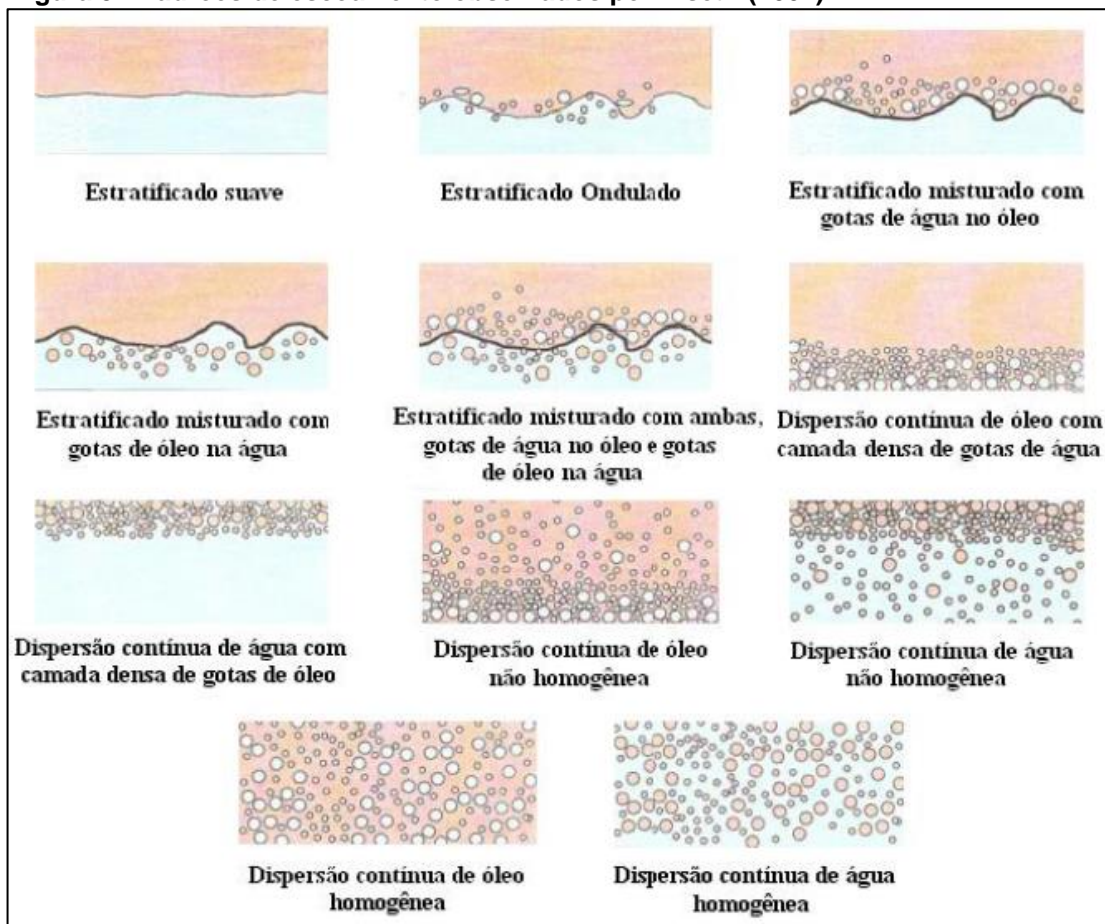


Fonte: Trallero, Sarica e Brill (1997)

Elseth (2001) divulgou em seu trabalho diversos padrões de escoamentos encontrados em experimentos realizados em laboratório, focando em escoamentos dispersos e estratificados. Seu estudo foi feito em bancadas de teste e a tubulação de análise principal continha 56,3 mm de diâmetro e 10,21 m de comprimento. O óleo utilizado foi um comercial (Exxsol D-60) com densidade 790 kg/m^3 e viscosidade $1,64 \text{ mPa.s}$.

Entre diversos experimentos, ele encontrou onze diferentes padrões de escoamento, sendo cinco com caráter estratificado e seis com caráter disperso, conforme observado na Figura 9 (RODRIGUEZ, 2009):

Figura 9 - Padrões de escoamento observados por Elseth (2001)



Fonte: Rodriguez (2009)

O primeiro padrão observado ocorreu a baixas velocidades da mistura e frações intermediárias de água. Por conta da sua interface suave e separação entre as fases, foi chamado de estratificado suave. Ao elevar-se a velocidade da mistura ou alterar-se a fração de água, pequenas ondas começam a surgir na interface e algumas gotículas de óleo em água e água em óleo podem aparecer na interface. A este padrão deu-se o nome de estratificado ondulado.

Aumentando-se a vazão volumétrica da mistura, a interface torna-se ainda mais ondulada e um número maior de gotículas começa a surgir. As gotículas ainda permanecem próximas à interface pois não contêm energia suficiente para se distribuírem ao redor da seção transversal. A este padrão deu-se o nome de estratificado misturado, podendo ser com gotas de água em óleo, gotas de óleo em água ou ambas as presenças.

Sob certas circunstâncias a uma baixa fração de água e velocidade intermediária da mistura, uma densa camada de gotas de água pode se formar perto da parede do tubo. As gotas ficam tão próximas entre si que dão a impressão de formar uma camada, porém como estão em baixa velocidade, não se distribuem ao longo da seção transversal. Este padrão recebe o nome de dispersão contínua de óleo com densa camada de gotas de água. A transição de um padrão estratificado para um disperso como este pode ocorrer ao se diminuir a fração de água no escoamento.

Em altas frações de água, uma camada semelhante a esta, porém de óleo, pode aparecer próximo às paredes do tubo. Este padrão tem o nome análogo de dispersão contínua de água com densa camada de gotas de óleo. Para este padrão acontecer, a velocidade da mistura deve ser suficientemente grande para dispersar o óleo, porém, não tão grande a ponto de causar uma distribuição das gotas de óleo. Este padrão foi também identificado por Trallero, Sarica e Brill (1997) e chamado de Do/w & w.

Ao se aumentar a velocidade da mistura (velocidades altas) a camada densa de gotas pode se distribuir pela seção transversal como consequência da turbulência da fase contínua, tornando o escoamento totalmente disperso. Dependendo do padrão que se tinha anteriormente, tem-se uma dispersão não-homogênea de água em óleo contínuo ou dispersão não-homogênea de óleo em água contínuo.

E ao se aumentar ainda mais a velocidade da mistura (velocidades bem altas), as dispersões irão se distribuir homogeneamente pela seção transversal do tubo, e conseqüentemente o surgimento dos padrões dispersão homogênea de água em óleo contínuo (água em óleo) e dispersão homogênea de óleo em água contínuo (óleo em água) (ELSETH, 2001).

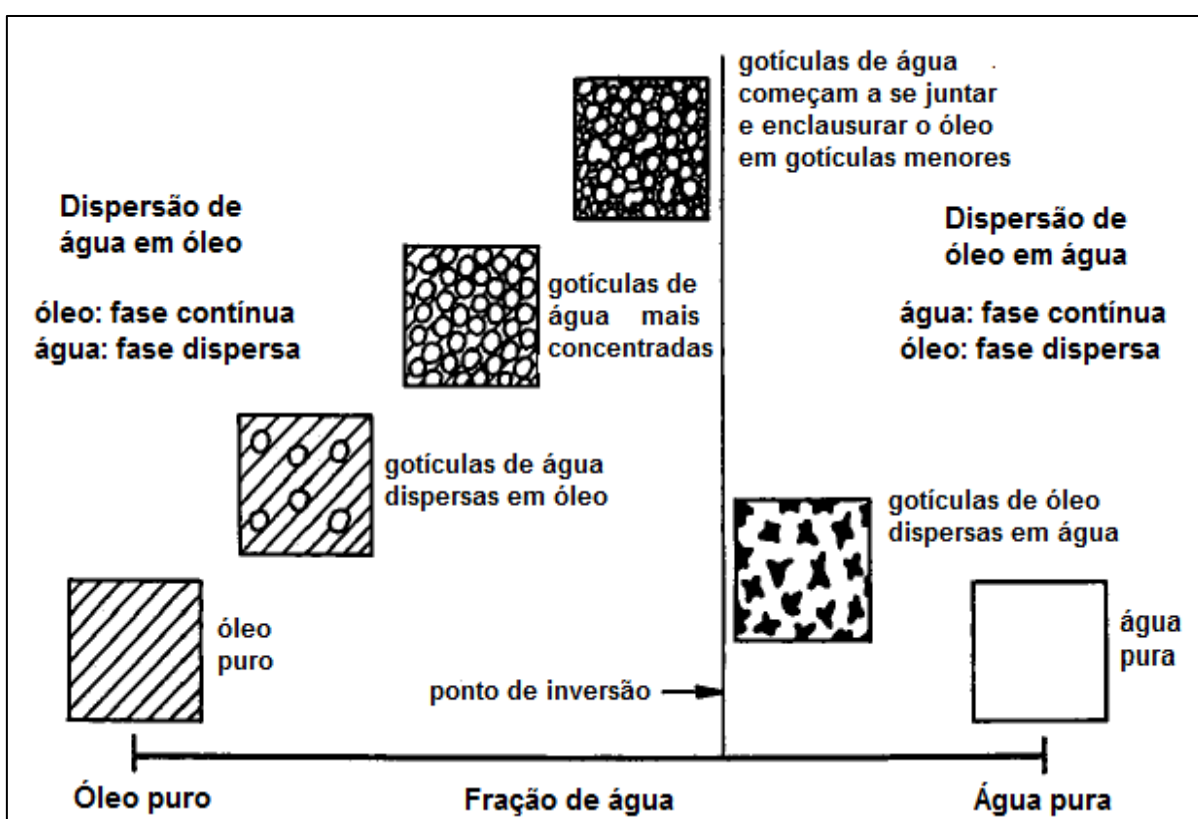
2.2.3 Inversão de Fase

Dois fenômenos importantes em escoamentos bifásicos líquido-líquido são os de inversão de fase e queda de pressão. Além de estarem relacionados, a predição do gradiente de pressão em escoamentos bifásicos é um dos principais

motivos de estudo deste tipo de escoamento a fim de tentar reduzir seu efeito (ARIRACHAKARAM, 1989; ELSETH, 2001).

A inversão de fase de dois fluidos imiscíveis pode ser definida como a mudança do padrão de um escoamento óleo disperso em água, se torna água dispersa em óleo, ou vice versa, ou seja D_o/w para D_w/o (XU, 2007). No estudo feito por Arirachakaram (1989), é demonstrado um diagrama que exemplifica o fenômeno da inversão de fase em um escoamento, conforme Figura 10:

Figura 10 - Fenômeno da inversão de fase



Fonte: Arirachakaran (1989)

Inicialmente, um escoamento de apenas óleo, com velocidade relativamente alta, é observado em um duto. À medida que pequenas frações de água são adicionadas, gotículas de água são formadas (desde que a velocidade da mistura seja grande o suficiente). Em certo ponto, a água se encontrará totalmente em forma de bolhas, enquanto o óleo mantém sendo a fase contínua. Aumentando ainda mais a injeção de água no escoamento, as bolhas de água começam a se chocar e se unir, formando bolhas maiores. Estas bolhas maiores começam a enclausurar o óleo em pequenos bolsões. Mantendo-se esta velocidade, os bolsões de óleo se

transformam em bolhas, e a fase contínua passa a ser a água. Está completo o fenômeno da inversão de fase.

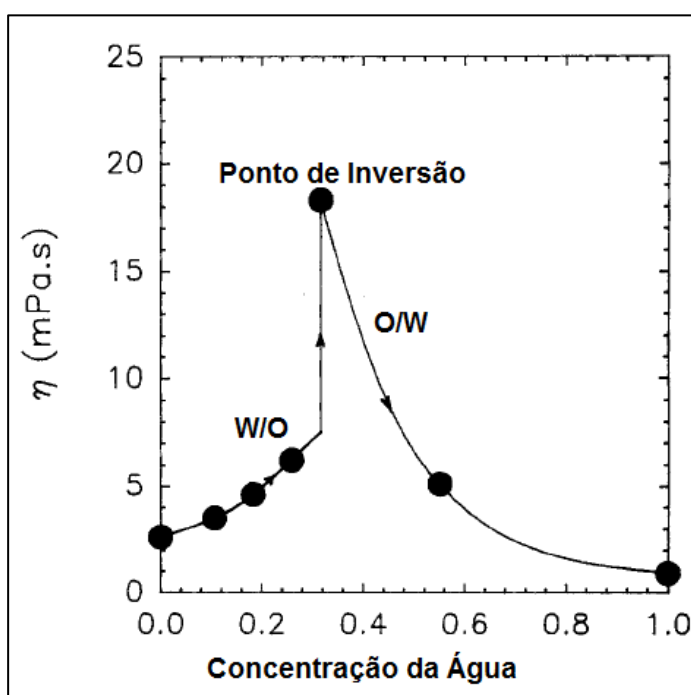
Uma das razões para evitar a ocorrência de inversão de fase em escoamentos bifásicos, é devido a sua forte relação com o aumento da queda de pressão. Diversos estudos concluíram que existe um aumento na viscosidade média do fluido escoando perto da faixa em que ocorre inversão de fase. A viscosidade atinge um valor máximo de pico e depende de fatores como velocidade da mistura, fração de água, viscosidade do óleo e qual é a fase contínua (ARIRACHAKARAM, 1989).

Pal, (1993) realizou experimentos com escoamentos bifásicos com dispersões óleo em água e água em óleo. Ele estimou as viscosidades do escoamento da mistura utilizando a equação de Hagen-Poiseulle, Equação (16), e verificou os picos de viscosidade citados por Arirachakaram (PAL, 1993).

$$Q = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot D^4}{128 \cdot \mu \cdot L} \quad (16)$$

A Figura 11 demonstra como um aumento gradual na concentração de uma das fases pode ocasionar o aumento súbito da viscosidade da mistura em escoamento.

Figura 11 - Demonstração do pico de viscosidade apresentado do ponto de inversão de fase



Fonte: Pal (1993)

Apesar do mecanismo de inversão de fase estar longe de ser completamente entendido, sabe-se o necessário a fim de evitar a sua ocorrência. No transporte utilizando oleodutos, onde o gradiente de pressão é parâmetro muito importante, deve-se tentar realizar o escoamento em condições bem longes das do ponto de inversão, observando a injeção de cada fase, a proporção entre densidades e viscosidades além da velocidade da mistura (ARIRACHAKARAM, 1989)

2.2.4 Gradiente de Pressão em Escoamentos Dispersos

Existem na literatura diversos modelos que tentam prever as equações que regem a queda de pressão em escoamentos líquido-líquido. Elseth (2001) e Arirachakaram (1989) utilizam um modelo semelhante para predição de parâmetros em escoamento bifásico homogêneo, tais como densidade da mistura, viscosidade da mistura e número de Reynolds da mistura.

Um modelo comum para gradiente de pressão em escoamentos horizontais bifásicos homogêneos é:

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{f_m \rho_m U_m^2}{2d_i} \quad (17)$$

Onde f_m , ρ_m e U_m são respectivamente o fator de atrito, densidade e velocidade da mistura.

Como já visto na seção 2.2.1, a velocidade da mistura é

$$U_m = U_{so} + U_{sw} \quad (18)$$

Na condição de não deslizamento, a fração de cada fase é:

$$\varepsilon_w = \frac{U_{sw}}{U_m} \quad \varepsilon_o = 1 - \varepsilon_w \quad (19)$$

E a densidade e viscosidade da mistura são respectivamente:

$$\rho_m = \varepsilon_w \cdot \rho_w + \varepsilon_o \cdot \rho_o \quad (20)$$

$$\mu_m = \varepsilon_w \cdot \mu_w + \varepsilon_o \cdot \mu_o \quad (21)$$

E o número de Reynolds de uma mistura dispersa pode ser calculado de forma análoga ao monofásico (ELSETH, 2001):

$$Re_m = \frac{\rho_m \cdot U_m \cdot d_i}{\mu_m} \quad (22)$$

Quanto ao fator de atrito, pode-se utilizar qualquer correlação conhecida, como por exemplo a correlação de Blasius (ELSETH, 2001):

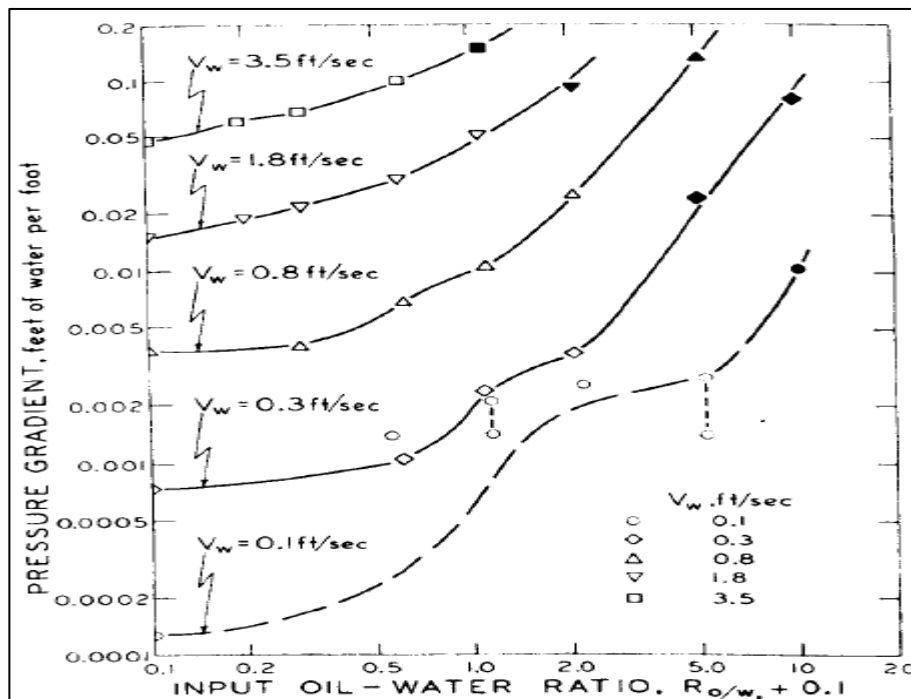
$$f_m = \frac{0,316}{Re_m^{0,25}}, (Re < 10^5) \quad (23)$$

Portanto, como o objeto desse estudo trata de escoamentos laminares, a correlação que será utilizada quando necessário é (ÇENGEL, 2014):

$$f_m = \frac{64}{Re_m}, (Re < 2300) \quad (24)$$

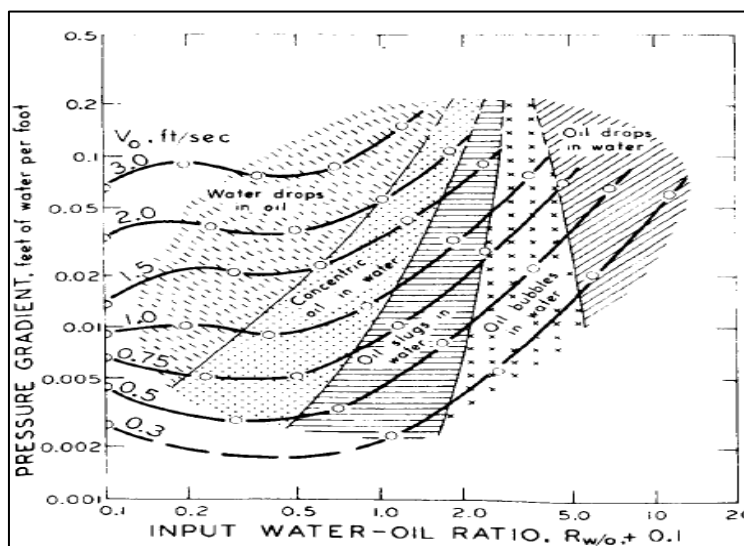
Resultados experimentais também demonstram a relação entre fração água/óleo, velocidade da mistura e queda de pressão. No experimento realizado por Charles et al. (1961) descrito na seção 2.2.2, dados foram mostrados em um gráfico em escala logarítmica para o óleo de viscosidade 6,29 cp. A Figura 12 mostra o gráfico para diferentes frações óleo/água e curvas para diferentes velocidades da água. O ponto 0 na abscissa indica água escoando sozinha. Nos pontos de picos observados na velocidade de 0,3 ft/s por exemplo, acredita-se que ocorre próximo a região de mudança de fase. A Figura 13 mostra os resultados experimentais para as mesmas configurações, mas desta vez para frações água/óleo e velocidades individuais de óleo, ou seja, o ponto 0 na abscissa indica apenas o escoamento de óleo.

Figura 12 - Gradiente de pressão experimental para óleo de 6,29 cp como função da razão óleo/água e velocidade da água



Fonte: Charles, Hodgon e Govier (1961)

Figura 13 Gradiente de pressão experimental para óleo de 6,29 cp como função da razão água/óleo e velocidade do óleo

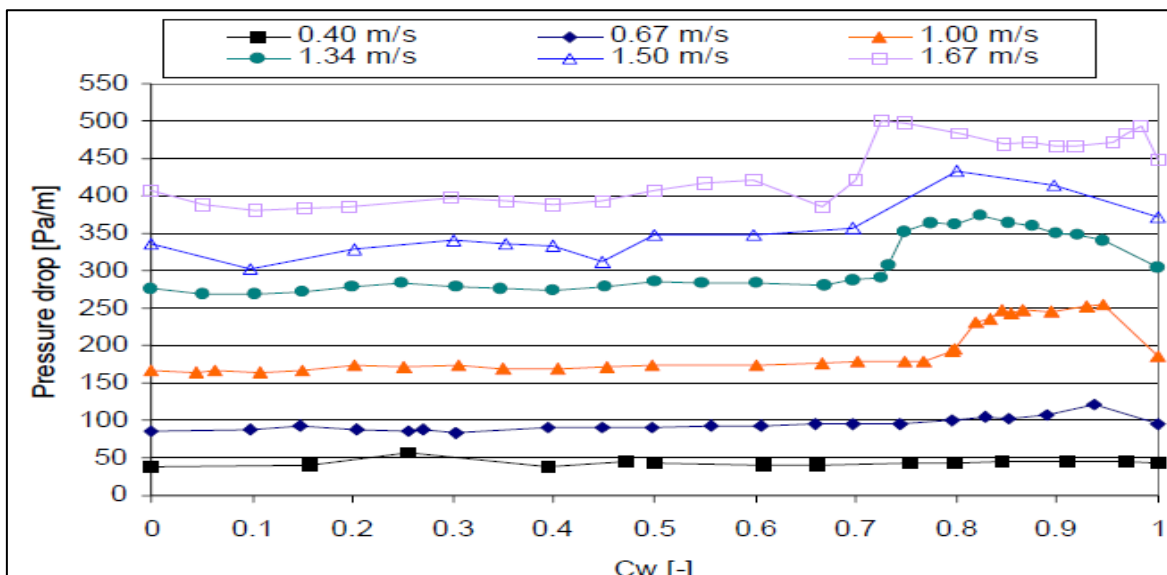


Fonte: Charles, Hodgon e Govier (1961)

Elseth (2001) também apresentou resultados experimentais para queda de pressão em escoamentos líquido-líquido. Variou-se a fração de água C_w , de 0 a 1, sendo $C_w = 0$ um escoamento de óleo Exxsol D-60, e $C_w = 1$ um escoamento de

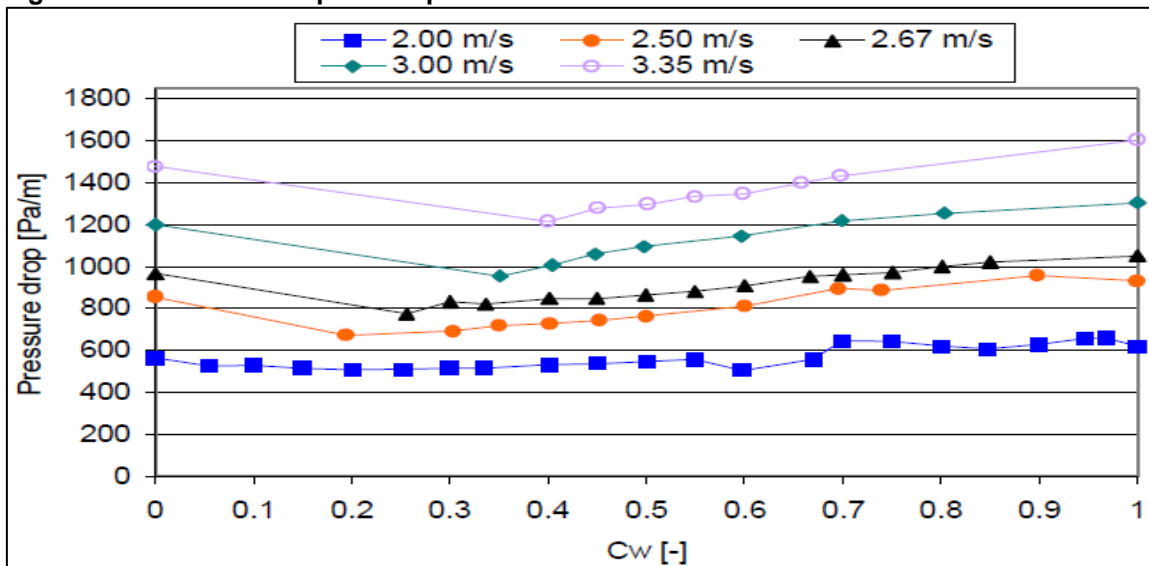
água de torneira. Os resultados foram coletados para diversas faixas de velocidades, separadas por "baixas velocidades" (0,4 m/s a 1,67 m/s) na Figura 14 e "altas velocidades" (2 m/s a 3,35 m/s) na Figura 15.

Figura 14 - Gradiente de pressão para escoamentos em baixas velocidades



Fonte: Elseth (2001)

Figura 15 - Gradiente de pressão para escoamentos em altas velocidades.



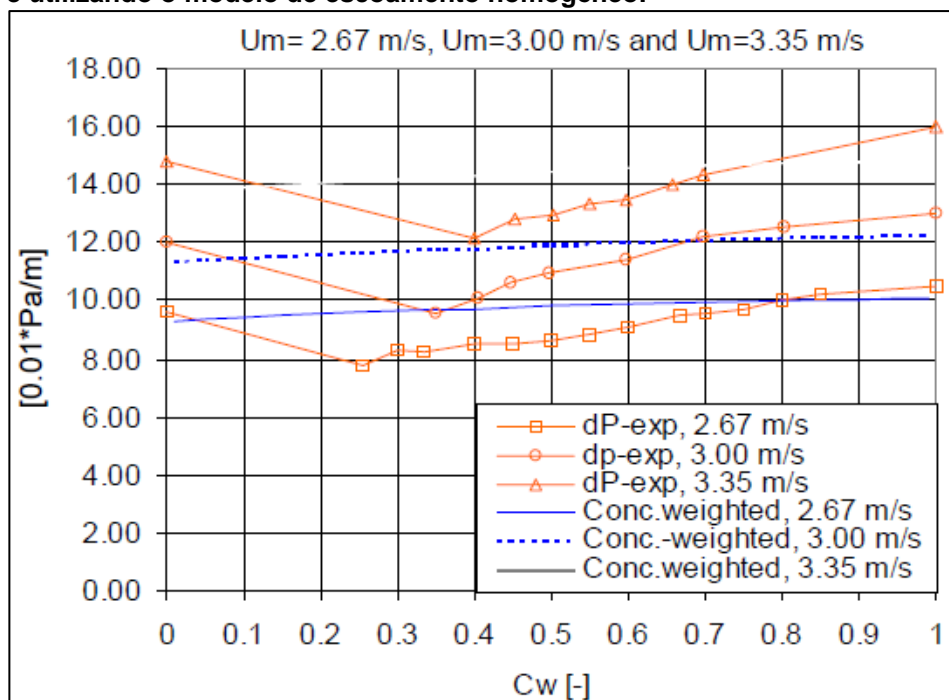
Fonte: Elseth (2001)

O número de pontos (e dados) coletados diferem entre cada faixa de velocidade da mistura. escoamentos de 3 m/s e 3,35 m/s não tiveram seus dados coletados para $C_w \leq 0,35$ e uma regressão linear foi utilizada no lugar.

Como não há distinção de padrão de escoamento para estas curvas, é certo de que existam tanto regimes estratificados quanto dispersos sendo analisados. Isto pode ser evidenciado no ponto próximo a $C_w = 0,7$ para velocidade de 1,67 m/s. É provável que esteja havendo uma mudança de padrão de escoamento de estratificado com duas fases contínuas para escoamento de água contínua com óleo disperso. A fração de água torna-se grande o suficiente para enclausurar a fase de óleo em bolhas. Acredita-se que este fenômeno possa influenciar a viscosidade da mesma maneira que uma inversão de fase o/w ou w/o influencia, conseqüentemente influenciando a queda de pressão.

Com o objetivo de se comparar os resultados experimentais com o modelo de escoamento homogêneo para queda de pressão, foram plotadas as curvas dos três escoamentos de maior velocidade em duas versões: experimental e modelagem homogênea. Pode se ver a comparação de cada comportamento na Figura 16:

Figura 16 - Comparação da queda de pressão realizada experimentalmente e utilizando o modelo de escoamento homogêneo.



Fonte: Elseth (2001)

Os resultados são considerados satisfatórios e encaixam bem em outros experimentos encontrados na literatura, realizado com tipos de óleo semelhante (Elseth, 2001).

2.3 CFD - ANSYS FLUENT

Esta seção abordará a teoria envolvida por trás de programas computacionais, em especial o ANSYS Fluent, além da definição de termos e ajustes encontrados nestes programas.

2.3.1 Introdução ao CFD

A dinâmica de fluidos computacional ou CFD é a análise de sistemas envolvendo fluxo de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas por meio de simulação computadorizada. A técnica é muito poderosa e abrange uma vasta gama de áreas de aplicação industrial e não industrial.

Existem várias vantagens exclusivas do CFD sobre as abordagens baseadas em experimentos para o projeto de sistemas de fluidos (VERSTEEG, 2006):

- Redução substancial dos prazos e custos de novos projetos
- Capacidade de estudar sistemas onde experiências controladas são difíceis ou impossíveis de realizar (por exemplo, sistemas muito grandes)
- Capacidade de estudar sistemas sob condições perigosas dentro e além de seus limites normais de desempenho (por exemplo, estudos de segurança e cenários de acidentes)
- Nível de detalhe praticamente ilimitado dos resultados

O ANSYS Fluent em especial, fornece capacidades abrangentes de modelagem para uma ampla gama de problemas de fluxo de fluidos incompressíveis e compressíveis, laminares e turbulentos. Pode-se realizar análises estáticas ou transitórias. No ANSYS Fluent, uma ampla gama de modelos matemáticos para fenômenos de transporte (como transferência de calor e reações químicas) é

combinada com a capacidade de modelar geometrias complexas (ANSYS Fluent Theory Guide, 2013).

Os códigos CFD são estruturados em torno dos algoritmos numéricos que podem resolver problemas de fluxo de fluidos. A fim de fornecer acesso fácil ao seu poder de resolução de todos os pacotes de CFD comerciais incluem interfaces de usuário sofisticado para introduzir parâmetros de problema e para examinar os resultados. Assim, todos os códigos contêm três elementos principais (VERSTEEG, 2006):

- Pré-processamento:
 - Geral
 - Materiais
 - Condições de Limite
- Solucionando:
 - Configurações do Solucionador
 - Inicialização e Cálculo
- Pós-processamento.

Serão examinadas as funções de cada um desses elementos dentro do contexto de um código CFD.

2.3.1.1 Pré-processamento

O pré-processamento consiste na entrada de um problema de fluxo para um programa CFD por meio de uma interface amigável ao operador e a subsequente transformação desta entrada numa forma adequada para utilização pelo solucionador. As atividades do utilizador na fase de pré-processamento envolvem (VERSTEEG, 2006):

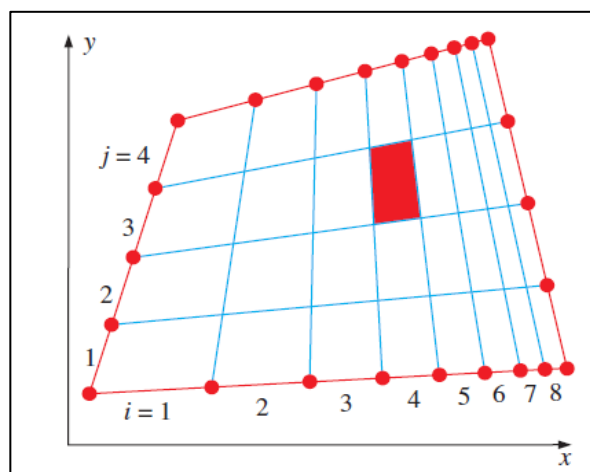
- Definição da geometria da região de interesse: o domínio computacional
- Geração de malha - a subdivisão do domínio em um número de subdomínios menores e não sobrepostos: uma malha de células (ou volumes ou elementos de controle)
- Seleção dos fenômenos físicos e químicos que precisam ser modelados

- Definição de propriedades do fluido
- Especificação de condições de contorno apropriadas em células que coincidem com ou tocam o limite de domínio

O primeiro passo em uma solução de CFD é a criação de um domínio (geometria), em seguida, o segundo passo (e sem dúvida um dos passos mais importantes) é a geração de uma malha que define as células onde as variáveis de fluxo (velocidade, pressão, etc.) serão calculados ao longo do domínio computacional. Para domínios bidimensionais, as células são áreas, enquanto que para domínios tridimensionais as células são volumes. Você pode pensar em cada célula como um minúsculo volume de controle no qual as versões discretizadas das equações de conservação são resolvidas. Observe que limitamos nossa discussão aqui aos códigos CFD de volume finito centrados em células. A qualidade de uma solução CFD é altamente dependente da qualidade da malha. Portanto, recomenda-se que a malha seja de alta qualidade antes de prosseguir para a próxima etapa (ÇENGEL, 2014).

Uma grade estruturada consiste em células planares com quatro bordas ou células volumétricas com seis faces (ÇENGEL, 2014).

Figura 17 - Malha 2-D com 8 colunas e 4 linhas.



Fonte: Çengel (2014)

Uma malha não estruturada consiste em células de várias formas, mas normalmente são usados triângulos ou quadriláteros (2-D) e tetraedros ou

hexaedros (3-D). Uma grade mal resolvida ou de baixa qualidade pode até levar a uma solução incorreta (ÇENGEL, 2014).

Existem questões importantes para se investigar e responder antes de iniciar qualquer simulação em ANSYS Fluent (ANSYS Lectures, 2010):

- Que grau de resolução de malha é necessário em cada região do domínio?
- Pode prever regiões de gradientes elevados?
 - Você vai usar a adaptação para adicionar resolução?
- Você tem recursos de computador suficientes?
 - Quantas células e nós são necessários?
 - Quantos modelos físicos serão utilizados?

Tanto a precisão de uma solução e seu custo em termos de hardware de computador necessário e tempo de cálculo dependem do refinamento da malha. As melhores malhas são muitas vezes não uniformes: mais refinadas em áreas onde grandes variações ocorrem de ponto a ponto e mais grosseiras em regiões com relativamente pouca mudança. Alguns laboratórios centram esforços para desenvolver códigos CFD com uma capacidade de malha auto adaptativa. No momento, cabe ainda às habilidades do usuário CFD projetar uma malha que seja um compromisso adequado entre a precisão desejada e o custo da solução. Mais de 50% do tempo gasto na indústria em um projeto CFD é dedicado à definição da geometria de domínio e geração de malha (VERSTEEG, 2006).

2.3.1.1.1 *Materiais*

Para um pré-processamento adicional, as propriedades do material precisam ser definidas para todos os fluidos e sólidos que serão simulados e os parâmetros solicitados dependerão dos modelos selecionados para a simulação. Muitos materiais comuns (água, ar, gasolina, etc.) já estão definidos no “*FLUENT Database*” e podem ser facilmente copiados para o modelo, tornando este passo relativamente indolor (ANSYS Lectures, 2010).

Observe que esses valores podem ser:

- Constantes
- Funções de temperatura

- Outras funções incorporadas seguindo relações comuns
- Definido pelo usuário.

Programas atuais de Dinâmica de Fluidos Computacional também dão ao usuário uma facilidade para invocar modelos especiais de processo físico e químico (por exemplo, modelos de turbulência, transferência de calor radiativo, modelos de combustão) ao lado das principais equações de fluxo de fluido (VERSTEEG, 2006).

2.3.1.1.2 Condições de Fronteira

As zonas de fronteira são usadas para controlar a solução nos limites externos e internos. Existem muitos tipos de limites diferentes para prescrever as informações de fronteira (ANSYS Lectures, 2010). Estes são especificados em cada extremidade do domínio computacional (fluxos 2-D) ou em cada face do domínio (fluxos 3-D) (ÇENGEL, 2014).

Existem vários tipos disponíveis de condições de fronteira (ANSYS Lectures, 2010):

- Limites Externos
- Geral
 - Entrada de Pressão
 - Saída de Pressão
- Fluidos incompressíveis
 - Entrada de Velocidade
 - Saída de fluxo (não recomendado)
- Fluidos compressíveis
 - Entrada de fluxo de massa
 - Campo de Pressão
- Outros
 - Parede
 - Simetria
 - Eixo
 - Periódico
- Especiais
 - Entrada / saída de ventilação

- Ventilação de entrada / exaustão

As condições de fronteira mais importantes serão separadas e explicadas a seguir:

2.3.1.1.3 Entrada / Saída de Pressão

Em uma entrada de pressão, especificamos a pressão total ao longo da face de entrada (por exemplo, fluxo entrando no domínio computacional de um tanque pressurizado de pressão conhecida ou de um campo onde a pressão ambiente é conhecida). Numa saída de pressão, o fluido sai do domínio computacional.

Especificamos a pressão estática ao longo da face de saída. Em muitos casos esta é a pressão atmosférica (ÇENGEL, 2014).

As entradas de pressão são adequadas para escoamentos compressíveis e incompressíveis. Sendo que o limite de entrada de pressão é tratado como uma transição livre de perda de estagnação para condições de entrada (ANSYS Lectures, 2010).

A pressão não é especificada juntamente com uma entrada de velocidade de fluxo, pois isso levaria a uma super especificação matemática, uma vez que a pressão e a velocidade estão acopladas nas equações de movimento.

2.3.1.1.4 Entrada e saída de velocidade de fluxo

Em uma entrada de velocidade, especificamos a velocidade do fluxo de entrada ao longo da face de entrada. Se as equações de energia e/ou turbulência estiverem sendo resolvidas, as propriedades de temperatura e/ou turbulência do fluxo de entrada também precisam ser especificadas (ÇENGEL, 2014).

Para uma fronteira de saída, nenhuma propriedade de fluxo é especificada. As propriedades de fluxo, tais como velocidade, quantidades de turbulência e temperatura são forçadas a ter gradientes nulos normais à face de saída.

A condição de limite de escoamento de velocidade de saída é frequentemente preferida em relação a condição de saída de pressão em escoamentos rotativos uma vez que o movimento de turbulência conduz a

gradientes de pressão radial que não são facilmente manipulados por uma saída de pressão (ÇENGEL, 2014).

2.3.1.1.5 Parede

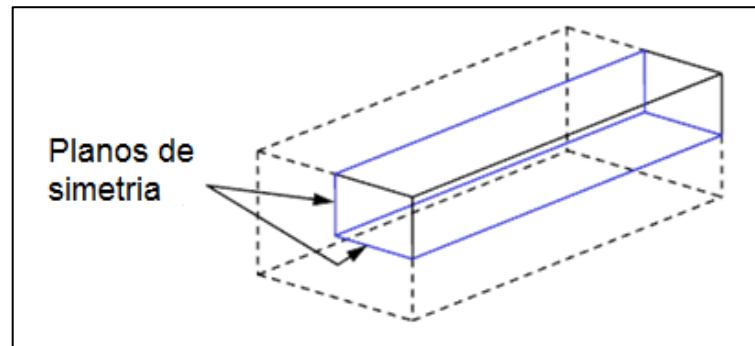
A condição de contorno mais simples de se entender é a de uma parede. Uma vez que o fluido não pode passar através de uma parede, o componente normal de velocidade é ajustado para zero em relação à parede ao longo de uma face na qual a condição de limite de parede é prescrita. Além disso, devido à condição de não-escorregamento, usualmente definimos a componente tangencial da velocidade em uma parede estacionária para zero também (ÇENGEL, 2014).

2.3.1.1.6 Fronteiras de Simetria

A condição de limite de simetria força as variáveis de campo de fluxo a serem espelhadas em um plano de simetria. Matematicamente, os gradientes da maioria das variáveis de campo de fluxo na direção normal ao plano de simetria são ajustados para zero em todo o plano de simetria, embora algumas variáveis sejam especificadas como funções pares e algumas como funções ímpares através de uma condição de contorno de simetria (ÇENGEL, 2014). O esforço computacional pode ser reduzido através do uso de simetria (conforme mostrado na Figura 18) e limites periódicos, onde (ANSYS Lectures, 2010):

- Nenhuma entrada é necessária.
- O campo de fluxo e a geometria devem ser simétricos:
 - Velocidade normal zero no plano de simetria
 - Gradientes normais zero de todas as variáveis no plano de simetria

Figura 18 - Planos de simetria



Fonte: ANSYS Lectures (2010)

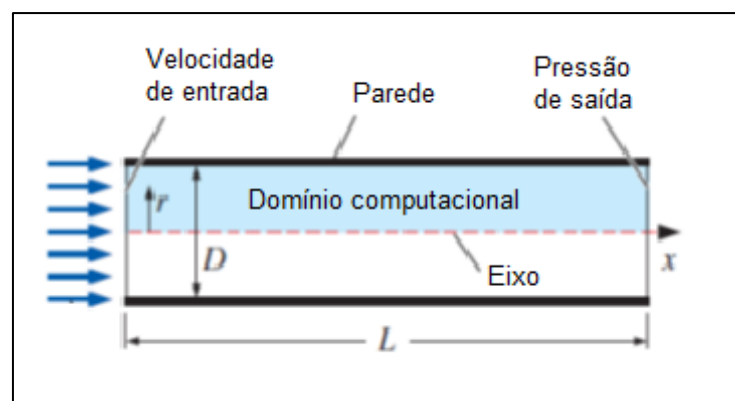
Deve se tomar cuidado para definir corretamente os locais de fronteira de simetria.

2.3.1.1.7 Condições de Eixo

Para fluxos axissimétricos, a condição do limite do eixo é aplicada a uma borda reta que represente o eixo da simetria (ÇENGEL, 2014), onde:

- O modelo é refletido a partir de uma linha central (eixo)
- Nenhuma entrada de usuário necessária
- Deve coincidir com a direção x positiva

Figura 19 - Axissimetria em torno do eixo x



Fonte: Çengel (2014)

Na Figura 19 devido à axissimetria em torno do eixo x, o fluxo através de um tubo redondo pode ser resolvido computacionalmente com uma fatia bidimensional através do tubo de $r = 0$ a $D / 2$. O domínio computacional é a região sombreado azul claro (ÇENGEL, 2014).

2.3.1.2 Solucionando

Existem três técnicas de solução numérica: diferença finita, elementos finitos e métodos espectrais. O foco deste trabalho, porém, é exclusivo para o método do volumes finitos, uma formulação de diferenças finitas especiais que é a solução utilizada para os códigos CFD mais bem estabelecidos: CFX / ANSYS, FLUENT, PHOENICS e STAR-CD. Em linhas gerais o algoritmo numérico consiste nas seguintes etapas (VERSTEEG, 2006):

- Integração das equações governantes do fluxo de fluido sobre todos os volumes (finitos) de controle do domínio
- Discretização - conversão das equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas
- Solução das equações algébricas por um método iterativo

O primeiro passo, a integração de volume de controle, distingue o método de volume finito de todas as outras técnicas CFD. As declarações resultantes expressam a conservação (exata) de propriedades relevantes para cada célula de tamanho finito. Esta clara relação entre o algoritmo numérico e o princípio de conservação física subjacente constitui uma das principais atrações do método de volume finito e torna seus conceitos muito mais simples de entender por engenheiros do que os métodos de elementos finitos e espectral. A conservação de uma variável de fluxo geral, e uma componente de velocidade ou entalpia dentro de um volume de controle finito, pode ser expressa como um equilíbrio entre os vários processos tendentes a aumentá-lo ou diminuí-lo (VERSTEEG, 2006).

Os códigos CFD contêm técnicas de discretização adequadas para o tratamento dos principais fenômenos de transporte, convecção (transporte devido ao fluxo de fluido) e difusão (transporte devido a variações de ponto a ponto), bem como para os termos de origem e a taxa de mudança em relação ao tempo. Os

fenômenos físicos subjacentes são complexos e não-lineares, portanto uma abordagem iterativa é necessária (VERSTEEG, 2006).

Para todos os fluxos, o ANSYS Fluent resolve equações de conservação para massa e momento. O domínio é discretizado em um conjunto finito de volumes de controle e todas as equações algébricas são então resolvidas numericamente para assim, mostrar o campo de solução (ANSYS Lectures, 2010).

Existem vários ajustes no ANSYS Fluent a serem definidos e selecionados antes de resolver os modelos, estes estão explicados a seguir:

2.3.1.2.1 Solucionadores Disponíveis

- Existem dois tipos de solucionadores disponíveis no ANSYS Fluent:
 - Com base em pressão
 - Baseado em densidade

2.3.1.2.2 Solucionador Baseado em Pressão

Os solucionadores baseados em pressão assumem impulso e pressão (ou correção de pressão) como principais variáveis. Algoritmos de acoplamento pressão-velocidade são derivados por reformatação da equação de continuidade onde dois algoritmos estão disponíveis como solucionadores (ANSYS Lectures, 2010):

- Solucionador Segregado - Resolve para correção de pressão e momentum sequencialmente.
- Solucionador Acoplado (PBCS) - Resolve a pressão e o momentum simultaneamente

Sendo que o solucionador acoplado (PBCS) é aplicável para a maioria dos fluxos monofásicos e proporciona um desempenho superior ao solucionador padrão baseado em pressão (Solucionador Agregado), porém não é disponível para casos multifase (Euleriano), e fluxo periódico de massa, além de requerer 1,5 a 2 vezes mais memória do que o solucionador segregado (ANSYS Lectures, 2010).

Os solucionadores baseados em pressão são aplicáveis para uma ampla gama de regimes de fluxo incompressível de baixa velocidade até fluxo compressível de alta velocidade.

- Requer menos memória (armazenamento).
- Permite flexibilidade no procedimento de solução.

2.3.1.2.3 Solucionador Baseado em Densidade

O solucionador baseado em densidade resolve as equações de continuidade, momento, energia e transporte simultaneamente (ou seja, acopladas). Como as equações governantes são não-lineares (e acopladas), várias iterações do circuito de solução devem ser realizadas antes de se obter uma solução convergente. Cada iteração consiste nas etapas descritas abaixo (ANSYS Fluent User's Guide, 2013):

1. Atualiza as propriedades do fluido com base na solução atual (se o cálculo tiver apenas começado, as propriedades do fluido serão atualizadas com base na solução inicializada.)
2. Resolvem as equações de continuidade, momentum e (quando apropriado) de energia simultaneamente.
3. Quando apropriado, resolve equações para escalares de turbulência e radiação usando os valores previamente atualizados das outras variáveis.
4. Quando o acoplamento entre fases deve ser incluído, atualiza os termos de origem nas equações de fase contínua, apropriadas com um cálculo de trajetória de fase discreta.
5. Verifica a convergência do conjunto de equações.

2.3.1.2.4 Discretização (Métodos de Interpolação)

Esquemas de interpolação para o termo de convectivo (ANSYS Lectures, 2010):

- *First-Order Upwind* - Mais fácil de convergir, apenas precisão de primeira ordem.

- *Power Law* - Mais precisa do que a primeira ordem para fluxos com baixo número de Reynolds
- *Second-Order Upwind* - Usa estampas maiores para precisão de 2ª ordem, essenciais com malha triangular, tetraédrica ou quando o fluxo não está alinhado com a malha, porém, convergência pode ser mais lenta.
- *Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws (MUSCL)* - Esquema de discretização de convecção de terceira ordem para malhas não estruturadas. São mais precisos na previsão de fluxos secundários, vórtices e forças.
- *Quadratic Upwind Interpolation (QUICK)* - Aplica-se a malhas quadráticas, hexaédricas e híbridas, útil para rotação e turbilhão de fluxos.

2.3.1.2.5 Métodos de Interpolação (Gradientes)

Gradientes de variáveis de solução são necessários para avaliar fluxos difusivos, derivados de velocidade e esquemas de discretização de ordem superior. Os gradientes de variáveis de solução nos centros celulares podem ser determinados usando três abordagens (ANSYS Lectures, 2010):

- *Green-Gauss Cell-Based* - Menos computacionalmente intensivo. Solução pode ter falsa difusão.
- *Green-Gauss Node-Based* - Mais preciso e mais computacionalmente intensivo. Minimiza a difusão falsa e é recomendado para malhas não estruturadas.
- *Least-Squares Cell-Based* - Método padrão. Tem a mesma precisão e propriedades dos *Node-based Gradients* e é menos computacionalmente intensivo.

2.3.1.2.6 Métodos de Interpolação para Pressão

Esquemas de interpolação para cálculo de pressões de face de célula quando se utiliza o solucionador de pressão em Fluent estão disponíveis da seguinte forma (ANSYS Lectures, 2010):

- *Standard* - O esquema padrão. Precisão reduzida para os fluxos que exibem grandes gradientes de pressão na superfície normal próximos dos limites (mas não devem ser usados quando mudanças de pressão íngremes estão presentes no fluxo - o esquema PRESTO deve ser usado em vez disso)
- *PRESTO!* - Utilização para fluxos altamente turbulentos, fluxos envolvendo gradientes de pressão íngreme (meio poroso, modelo de ventilador, etc.), ou em domínios fortemente curvos
- *Linear* - Uso quando outras opções resultam em dificuldades de convergência ou comportamento não-físico
- *Second-Order* - Uso para fluxos compressíveis. Não deve ser utilizado com meios porosos, saltos, ventiladores, etc. ou modelos multifásicos: *VOF* ou *Mixture*
- *Body Force Weighted* - Uso quando as forças do corpo são grandes, por exemplo, alta convecção ou alto turbilhão de fluxos

2.3.1.2.7 Acoplamento Pressão-Velocidade

O acoplamento Pressão-Velocidade refere-se ao algoritmo numérico que utiliza uma combinação de equações de continuidade e momentum para derivar uma equação para pressão (ou correção de pressão) quando se usa o solver baseado em pressão (ANSYS Lectures, 2010).

Cinco algoritmos estão disponíveis no ANSYS Fluent.

- Método Semi-Implícito para Equações Ligadas à Pressão (SIMPLE)
 - O esquema padrão, robusto
- Simple-Consistente (SIMPLEC)
 - Permite uma convergência mais rápida para problemas simples (por exemplo, fluxos laminares sem modelos físicos empregados).

- Pressão Implícita com Separação de Operadores (PISO)
 - Útil para problemas de fluxo instável ou para malhas contendo células com distorção superior à média
- Método de passos fracionados (FSM) para fluxos instáveis.
 - Características semelhantes às do PISO.
- *COUPLED* (PBCS) – Selecionando este, o solucionador acoplado à pressão, descrito anteriormente, é habilitado.

Os códigos comerciais podem também dar ao utilizador uma seleção de outras técnicas mais recentes, tais como as técnicas iterativas de ponto Gauss-Seidel com aceleradores multigrid e métodos de gradiente conjugado (VERSTEEG, 2006).

Para escoamentos multifásicos ANSYS Fluent existe um tipo diferente de abordagem. Na próxima seção a modelagem de escoamentos com mais de uma fase será explicada.

2.3.1.2.8 Modelagem multifásica

Os avanços na mecânica dos fluidos computacional forneceram a base para uma maior compreensão da dinâmica dos fluxos multifásicos. Atualmente, existem duas abordagens para o cálculo numérico dos fluxos multifásicos: a abordagem de Euler-Lagrange e a abordagem de Euler-Euler (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

2.3.1.2.9 Abordagem Euler-Euler

Na abordagem Euler-Euler, as diferentes fases são tratadas matematicamente como contínuas e interpenetrantes. Uma vez que o volume de uma fase não pode ser ocupado pelas outras fases, introduz-se o conceito de fração de volume. Estas frações de volume são assumidas como funções contínuas do espaço e do tempo e sua soma é igual a um. As equações de conservação para cada fase são derivadas para obter um conjunto de equações, que têm estrutura semelhante para todas as fases. Estas equações são fechadas proporcionando

relações constitutivas que são obtidas a partir de informações empíricas, ou, no caso de fluxos granulares, pela aplicação da teoria cinética. Estão incluídas forças interfásicas, tais como forças de arrasto, de elevação e de dispersão turbulenta (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

No ANSYS Fluent, estão disponíveis três modelos multifásicos Euler-Euler diferentes: o modelo volume de fluido (VOF), o modelo de mistura e o modelo Euleriano (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

2.3.1.2.10 O Modelo VOF

O modelo VOF (*Volume of Fluid*) é uma técnica de rastreamento de superfície aplicada a uma malha euleriana fixa. Ele é projetado para dois ou mais fluidos imiscíveis onde a posição da interface entre os fluidos é de interesse. No modelo VOF, um único conjunto de equações de momento é compartilhado pelos fluidos, e a fração de volume de cada um dos fluidos em cada célula computacional é rastreada em todo o domínio (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

2.3.1.2.11 O Modelo de Mistura

O modelo de mistura é projetado para duas ou mais fases (fluido ou particulado). Como no modelo Euleriano, as fases são tratadas como contínuas interpenetrantes. O modelo de mistura resolve a equação de momento de mistura e prescreve velocidades relativas para descrever as fases dispersas. As aplicações do modelo de mistura incluem fluxos carregados de partículas com baixo carregamento, fluxos borbulhantes, sedimentação e separadores ciclônicos. O modelo de mistura também pode ser usado sem velocidades relativas para as fases dispersas para modelar o fluxo multifásico homogêneo (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

2.3.1.2.12 O Modelo Euleriano

O modelo Euleriano é o mais complexo dos modelos multifásicos em ANSYS Fluent. Ele resolve um conjunto de equações de continuidade e de momentum para cada fase. O acoplamento é conseguido através dos coeficientes de troca de pressão e interface. A forma como este acoplamento é manuseado depende do tipo

de fases envolvidas. Os fluxos granulares (fluidos-sólidos) são tratados de forma diferente do que os fluxos não-granulares (fluido-fluido). Para os fluxos granulares, as propriedades são obtidas a partir da aplicação da teoria cinética. A troca momentânea entre as fases também depende do tipo de mistura que está sendo modelada. As funções definidas pelo usuário da ANSYS Fluent permitem que você personalize o cálculo da troca de momentum. As aplicações do modelo multifásico de Euler incluem colunas de bolhas, suspensão de partículas e leitos fluidizados (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

2.3.1.3 Pós-processador

Como no pré-processamento, uma enorme quantidade de trabalho de desenvolvimento ocorreu recentemente no campo de pós-processamento. Devido ao aumento da popularidade das estações de trabalho de engenharia, muitas das quais possuem excelentes recursos gráficos, os principais pacotes CFD agora estão equipados com ferramentas versáteis de visualização de dados. Estes incluem (ANSYS Lectures, 2010):

- Geometria de domínio e exibição de grade
- Parcelas vetoriais
- Linha e traçados de contorno sombreados
- Parcelas de superfície 2D e 3D
- Rastreamento de partículas
- Manipulação da vista (tradução, rotação, escala, etc.)

O primeiro passo do pós-processamento é saber se a convergência foi alcançada. O solucionador deve receber iterações suficientes para que o problema seja convergente. Na convergência, devem ser satisfeitas as seguintes condições (ANSYS Lectures, 2010):

- A solução não altera mais com as iterações subsequentes.
- A massa total, o impulso, a energia e os balanços escalares são alcançados.
- Todas as equações (impulso, energia, etc.) são obedecidas em todas as células a uma tolerância especificada

Uma vez que a solução convirja, as variáveis de campo de fluxo, como velocidade e pressão, são plotadas e analisadas graficamente. Você também pode definir e analisar funções personalizadas adicionais que são formadas por combinações algébricas de variáveis de campo de fluxo (ÇENGEL, 2014).

2.3.1.3.1 *Precisão da Solução*

Nunca suponha que apenas porque o solucionador tem uma “resposta” que esta seja a “resposta” correta. Modificando as configurações de solver você pode melhorar a taxa de convergência da simulação e a precisão do resultado calculado (ANSYS Lectures, 2010).

A precisão de uma solução convergente depende de:

- Adequação e precisão dos modelos físicos
- Resolução de malha e independência
- Erros numéricos

Para ter certeza de que uma solução tem uma boa precisão, sempre a inspecione e a avalie usando os dados disponíveis. Se os recursos de fluxo não parecem razoáveis é importante tentar reconsiderar modelos físicos e condições de fronteira, examine também a qualidade da malha e, possivelmente, a refaça para estudos. Reconsiderar a escolha da localização das fronteiras (ou do domínio) também é uma boa técnica porque a escolha inadequada do domínio (especialmente o limite de saída) pode afetar significativamente a precisão da solução (ANSYS Lectures, 2010).

Para garantir que seus resultados finais sejam computados com os melhores esquemas numéricos (os padrões Fluent visam dar uma solução estável, não necessariamente a mais precisa), todos os solucionadores fornecem ferramentas para julgar e melhorar a convergência e garantir a estabilidade.

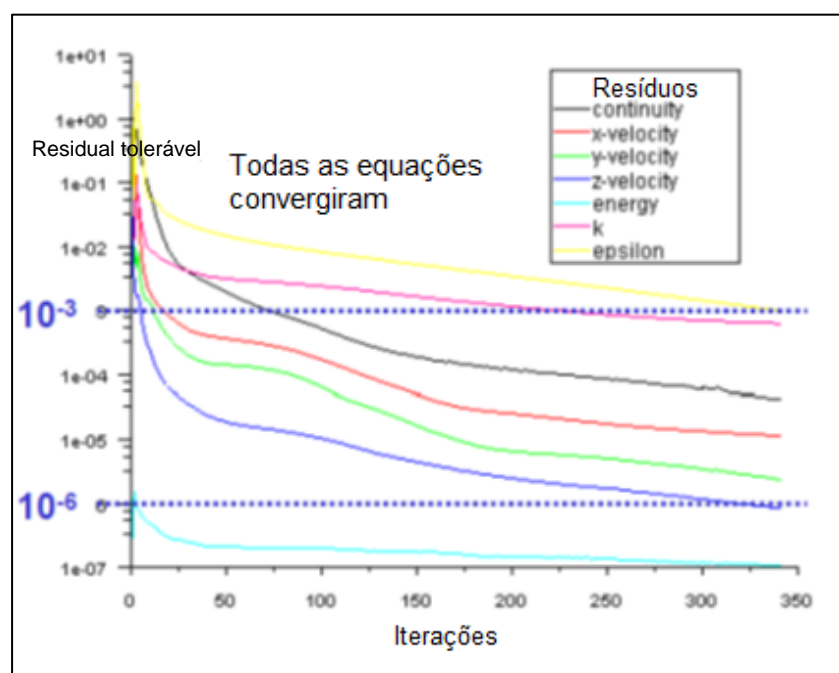
2.3.1.3.2 *Monitores de Convergência - Residuais*

Em uma solução CFD, a soma nunca é identicamente zero, mas diminui com iterações progressivas. Um residual pode ser pensado como uma medida de quanto

a solução para uma determinada equação de transporte se desvia de exata, e você monitorar o residual médio associado a cada equação de transporte para ajudar a determinar quando a solução tem convergido. Às vezes, centenas ou mesmo milhares de iterações são necessários para convergir em uma solução final, e os resíduos podem diminuir em várias ordens de grandeza (ÇENGEL, 2014).

As parcelas residuais mostram quando os valores residuais atingiram a tolerância especificada como podemos ver no gráfico 20 que é um dos gráficos que o ANSYS Fluent oferece como ferramenta para análise de precisão da solução. Nota-se que os critérios de convergência relativa são ajustados pelo utilizador onde o mesmo define o número de resíduos toleráveis para sua simulação (ANSYS Lectures, 2010).

Figura 20 – Gráfico residuais



Fonte: ANSYS Lectures (2010)

É possível monitorar a convergência usando a história residual. Geralmente, uma diminuição dos resíduos em três ordens de grandeza indica pelo menos uma

convergência qualitativa. Neste ponto, os principais recursos de fluxo devem ser estabelecidos (ANSYS Lectures, 2010).

3 METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO

Neste capítulo são descritos os programas, métodos e procedimentos utilizados na execução do presente trabalho. Abordam-se aspectos relacionados às características do programa utilizado e como foram feitas as validações do sistema experimental, determinando as condições operacionais por meio da adaptação dos modelos matemáticos utilizados pelo CFD.

3.1 INTRODUÇÃO

Toda simulação bem sucedida em CFD possui características em comum, que precisam ser incorporadas no modelo geométrico, físico, além da malha e condições de contorno. Alguns pontos a serem ponderados durante uma modelagem CFD são (ANSYS Fluent Getting Started Guide, 2013):

- Quais são as opções de modelagem?
- Quais modelos físicos são necessários incluir na minha análise?
- Quais simplificações são possíveis fazer?
- Qual a porcentagem de erro que a simulação está sujeita?
- São necessários resultados rápidos ou é necessário limitar o tempo de execução?
- É possível fazer aproximações em 2D ou utilizando axissimetria?

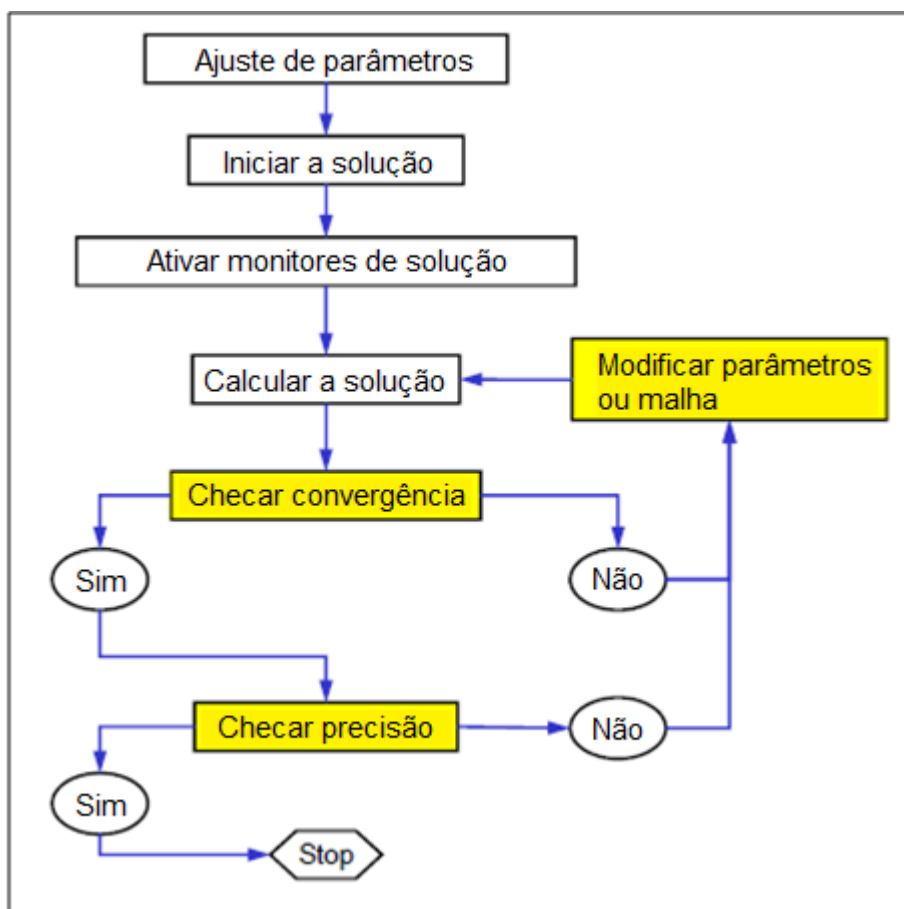
Com estas perguntas em mente pode-se direcionar a criação da geometria, da malha e do método de resolução. Porém, além das perguntas, é necessário que algumas diretrizes sejam tomadas antes de se afirmar que a simulação foi realmente bem sucedida (ANSYS Fluent Getting Started Guide, 2013):

- Examinar a qualidade da malha usando o Fluent: verificar problemas de conectividade ou malha incorreta. Certificar-se que o volume mínimo de células é um número inteiro positivo.
- Utilizar uma malha em escala e considerar as dimensões do desenho da geometria.

- Aplicar os modelos físicos apropriados.
- Monitorar convergências no histórico de residuais: a curva de residuais para continuidade, velocidade e outros deve decrescer até o valor estipulado na tolerância.
- Verificar se a solução independe da malha: uma simulação só é satisfatória se os resultados não se alterarem com ainda mais refinamento da malha.
- Verificar se a solução corresponde com as leis teóricas que regem o problema: é importante comparar os resultados para entender a eficiência do modelo.

A Figura 21 mostra o fluxograma básico para qualquer simulação:

Figura 21- Fluxograma para simulações



Fonte: Autoria própria

Seguindo estas diretrizes, a metodologia utilizada neste trabalho serve para criar boas condições para uma simulação bem sucedida. Inicialmente foi feita uma

análise em escoamento monofásico apenas com água. Posteriormente, com a validação de que a geometria, malha e resultados estão satisfatórios e condizentes com a teoria, iniciou-se as análises bifásicas óleo-água.

Foi utilizado, então, o modelo laminar de escoamento. As simulações foram feitas em um tubo de seção circular de 50mm de diâmetro e um comprimento de 15m, longo o suficiente para o escoamento se desenvolver completamente. Foi utilizado, também, uma velocidade de entrada conhecida de 0,02m/s. Com isto, o número de Reynolds para este escoamento foi baixo o suficiente para garantir a natureza laminar do escoamento. Um resumo dos parâmetros utilizados nesta validação encontra-se na Tabela 1:

Tabela 1 - Parâmetros escoamento monofásico

Parâmetro	Unidade	Valor
Velocidade de entrada	m/s	0,02
Diâmetro tubo	mm	50
Comprimento tubo	mm	15000
Densidade água	kg/m ³	998,2
Reynolds	-	995,2
Abscissa desenvolvimento (x_{fd})	m	2,488

Fonte: Autoria própria

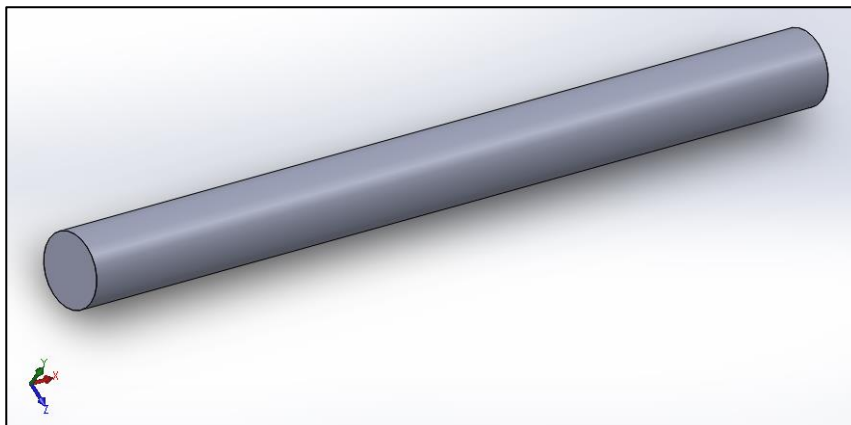
3.2 VALIDAÇÃO - GEOMETRIA

O desenho e ajuste da geometria foi feito utilizando tanto SolidWorks quanto as ferramentas do concebidas pelo ANSYS. Por se tratar de uma geometria simples, o processo de criação foi pouco complexo e a importação entre programas ocorreu normalmente. O ponto mais importante aqui foi a escolha da utilização de uma geometria plana, ao invés da tridimensional.

A utilização de um escoamento em um tubo de seção circular no ANSYS, nos permite simplificar a simulação utilizando um escoamento axissimétrico, ou seja, as características do escoamento são idênticas para todos os planos que passam pela linha de simetria (eixo). Partindo deste princípio, o escoamento só ocorre em um único plano (na direção x, com o comprimento, e na direção y, com o raio), não havendo necessidade da utilização de uma geometria tridimensional.

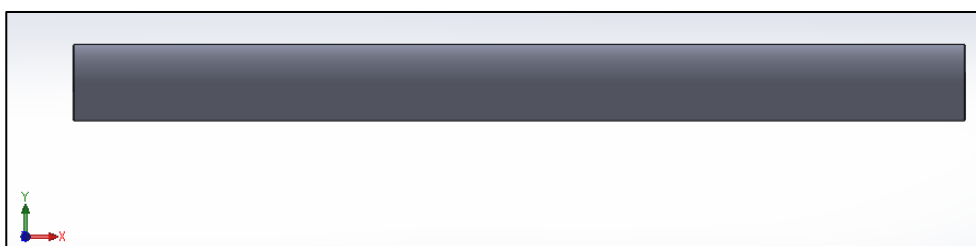
As Figuras 22 e 23 ilustram a "planificação" da geometria.

Figura 22 - Geometria em 3 dimensões



Fonte: Autoria própria

Figura 23 - Geometria plana



Fonte: Autoria própria

Utilizando uma convenção para designar um eixo a uma direção, têm-se na Tabela 2 as seguintes informações:

Tabela 2 - Convenção de Eixos da Geometria

Eixo	Direção/Sentido
x	Do Escoamento, sentido horizontal da entrada à saída
y	Do Raio no sentido vertical
z	Da profundidade, do plano perpendicular à tela

Fonte: Autoria própria

Na Figura 22, tem-se um tubo nas 3 dimensões: x , y e z . O escoamento ocorre na direção x . É nessa direção que o escoamento irá se desenvolver e onde será analisada a região de entrada, assim como, juntamente com o eixo y , o perfil de velocidade. Porém, não há variação alguma de qualquer propriedade na direção z . Por questões de tempo de processamento, simplificação de resultados e maior

precisão, optou-se por retirar a coordenada z , tendo, assim, uma geometria plana em apenas duas dimensões, mostradas na Figura 23, onde o eixo x positivo continua sendo a direção do escoamento, e o eixo y representa a variação do escoamento com o raio.

3.3 VALIDAÇÃO - MALHAS

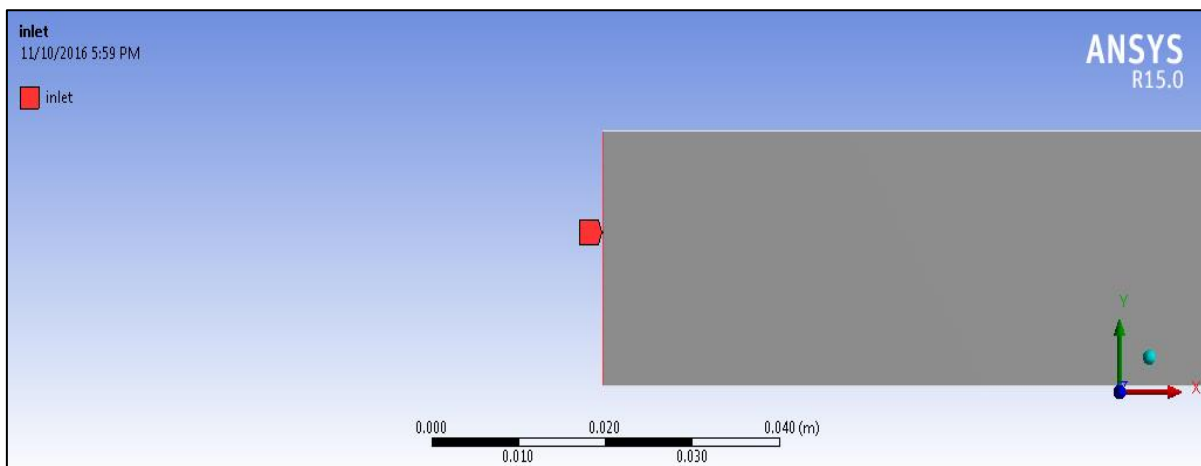
A validação da malha foi feita pelo método de tentativas e comparação, onde diversas malhas de diferentes volumes e estruturas foram colocadas a teste e, a partir de resultados teóricos, comparadas uma a uma. Os parâmetros que foram observados incluem: a velocidade máxima na linha de centro, a coordenada em que o escoamento se desenvolve completamente, as condições de não deslizamento na parede (velocidade zero), assim como o perfil de velocidade teórico para escoamento interno e laminar.

Um importante passo realizado na ferramenta de malhas do ANSYS Fluent é a de nomear as arestas ou superfícies da geometria. É interessante realizar esta etapa antes mesmo de gerar a malha, pois, assim, é mais fácil de controlar mudanças que serão realizadas em sua estrutura. Além disso, ao se nomear "corretamente" as arestas, o algoritmo do ANSYS Fluent automaticamente entende a função daquela aresta, o que já facilita a determinação das condições de contorno do problema (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

Por se tratar de uma geometria plana (um retângulo), foi dado nome às quatro arestas, conforme segue nas figuras 24 a 27:

1. *Inlet*: Ao nomear a aresta de "*inlet*", o ANSYS Fluent entende que, ali, deve-se atribuir características de entrada, ou seja, por onde o usuário irá definir condições conhecidas, como velocidade, ou pressão, por exemplo, e seus devidos módulos.

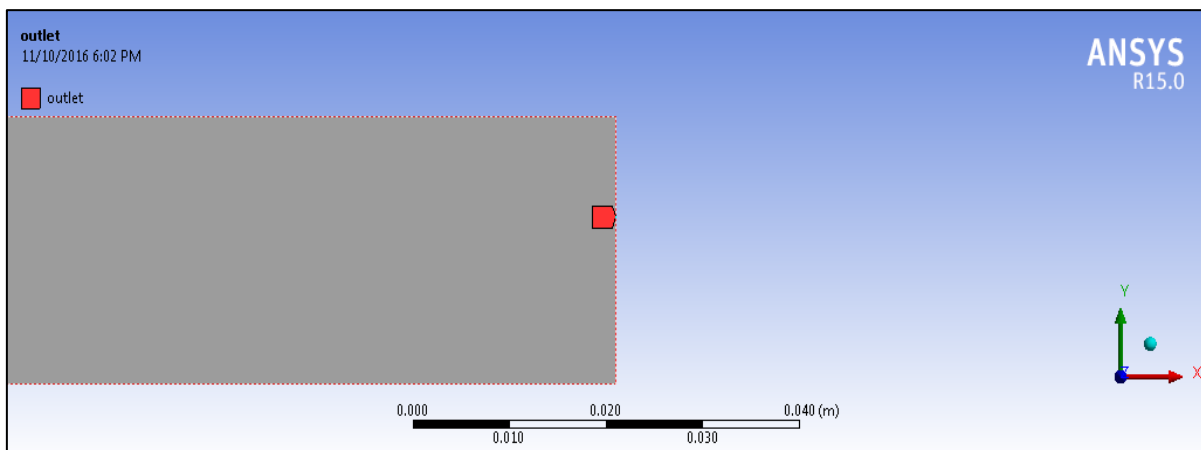
Figura 24 - Aresta esquerda: "inlet"



Fonte: Autoria própria

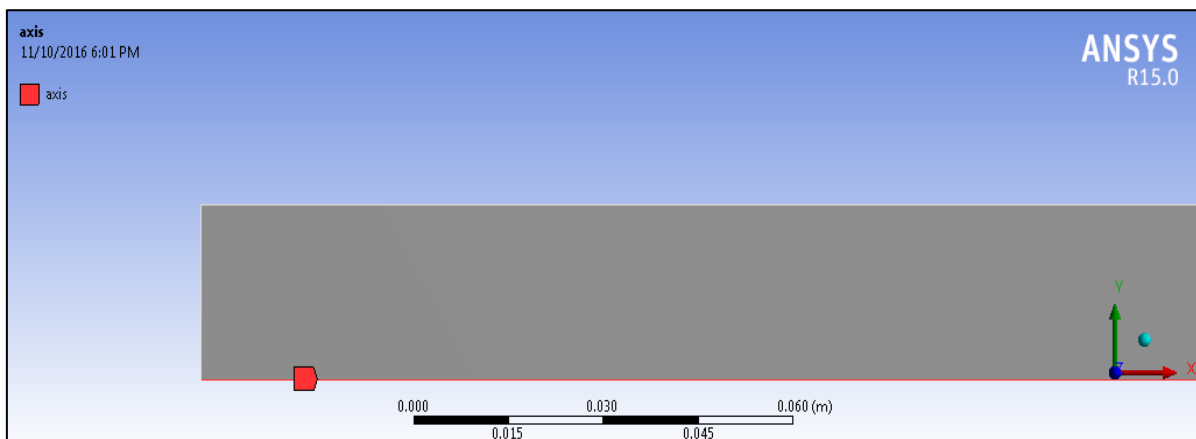
2. *Outlet*: Ao nomear uma superfície ou aresta de "outlet", o programa caracteriza-o como saída, ou seja, condições da saída do escoamento. Com isto, é possível definir, por exemplo, se a pressão no final do escoamento é atmosférica (0 Pa manométrica) ou diferente da atmosférica.

Figura 25 - Aresta direita: "outlet"



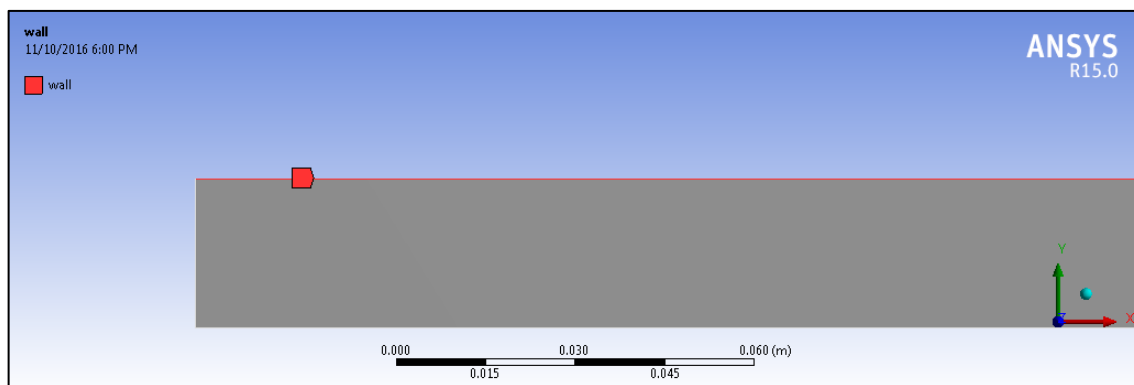
Fonte: Autoria própria

3. *Axis*: Ao dar o nome da aresta de "axis", o programa ANSYS Fluent irá automaticamente designar como eixo de simetria do escoamento. Como logo na abertura do programa foi escolhida a opção "escoamento axissimétrico", o programa entende que precisa haver um eixo de simetria para "espelhar" o escoamento.

Figura 26 - Aresta inferior: "axis"

Fonte: Autoria própria

4. *Wall*: Ao receber o nome de "wall", a aresta se comportará como uma parede. O ANSYS Fluent entende que, na parede, a velocidade do fluido é sempre zero, satisfazendo a condição de não deslizamento.

Figura 27 - Aresta superior: "wall"

Fonte: Autoria própria

Definido os nomes das 4 arestas da geometria, é feita a construção da estrutura da malha. Foi construído e testado oito malhas diferentes, sendo dessas oito, três malhas uniformes e 5 malhas não uniformes, alterando o número de volumes de cada uma. O mesmo escoamento foi simulado para todas as malhas, e seus principais resultados foram recolhidos e comparados. A malha que apresentou o melhor resultado das oito foi escolhida para a continuação do estudo.

Um resumo das oito malhas construídas pode ser visto na Tabela 3.

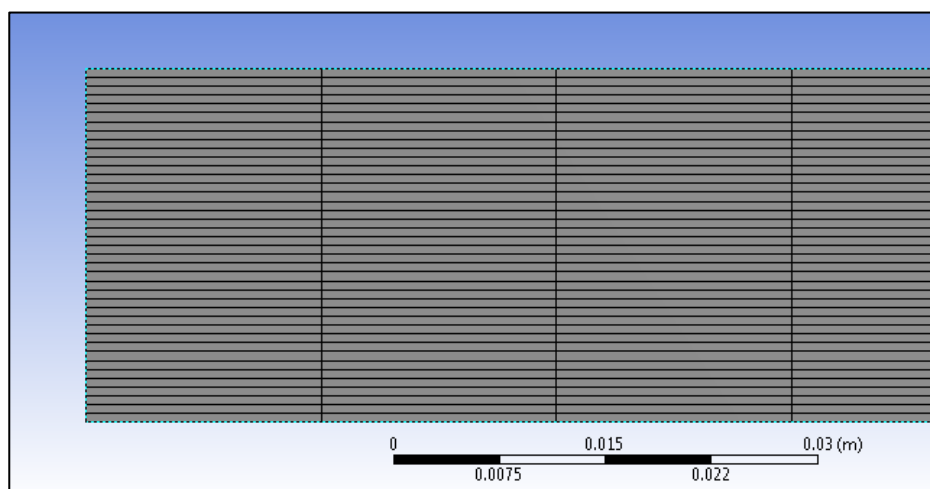
Tabela 2 - Malhas utilizadas no resultado de validação

Dimensões	Tipo
900x10	Uniforme e Não Uniforme
1050x20	Uniforme
900x40	Uniforme e Não Uniforme
900x20	Não Uniforme
1050x25	Não Uniforme
1050x60	Não Uniforme

Fonte: Autoria própria

A malha uniforme é composta por volumes de dimensões idênticas, sendo que suas divisões são uniformes ao longo da geometria. Um exemplo de malha uniforme que foi utilizada na validação pode ser visualizado na Figura 28.

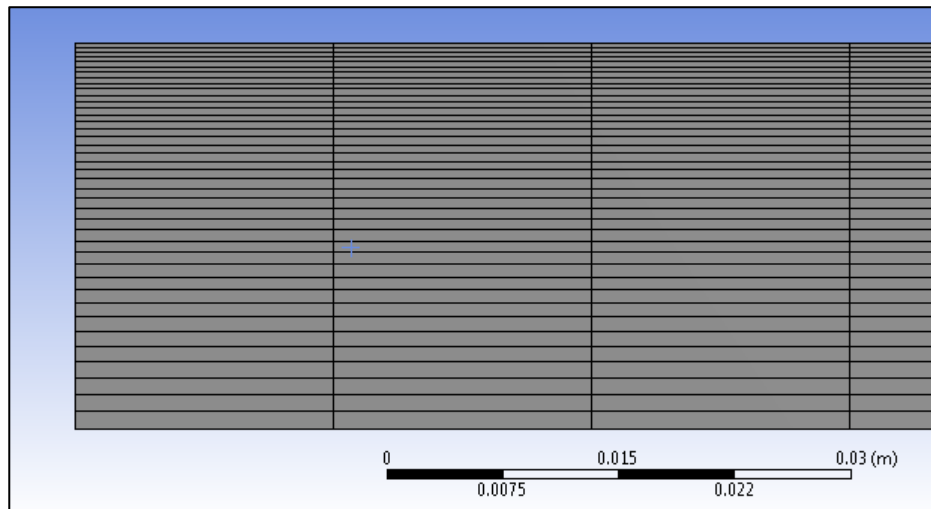
Figura 28 - Malha 900x40 uniforme



Fonte: Autoria própria

A estrutura da malha não uniforme é criada de maneira que seu refinamento seja maior perto da parede (aresta superior), onde há maior gradiente de velocidade. Os volumes adjacentes à parede têm dimensões menores e aumentam quanto mais se aproximam do centro. Um exemplo de malha não uniforme com um mesmo número de volumes da anterior (300x40) pode ser visualizado na Figura 29.

Figura 29 - Malha 900x40 não uniforme



Fonte: Autoria própria

3.4 VALIDAÇÃO – SOLUCIONADOR

Nesta seção iremos validar o solucionador do ANSYS Fluent.

3.4.1 Escolhendo o método de acoplamento Pressão-Velocidade

No ANSYS Fluent, para problemas relativamente simples (escoamento laminar sem modelos adicionais ativados) em que a convergência é limitada pelo acoplamento pressão-velocidade, muitas vezes pode-se obter uma solução convergente mais rápida usando SIMPLE (ANSYS Fluent User's Guide, 2013) Sendo assim, utilizou-se o algoritmo SIMPLE para esta pesquisa.

3.4.2 Discretização espacial

Seção do ANSYS Fluent que contém configurações que controlam a discretização espacial dos termos de convecção.

3.4.2.1 Gradiente

Gradientes são necessários não só para o cálculo dos valores escalares nas faces das células, mas, também, para calcular os termos de difusão secundárias e derivados da velocidade. Least Square Cells Based foi escolhido porque a precisão deste método é comparável à do Node-based Gradient (e ambos são superiores em comparação com o Cell-based Gradient). No entanto, é menos complexo calcular o Least Square Cells Based do que o Node-based Gradient (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

3.4.2.2 Pressão

O método escolhido foi o Second Order, pois, ele reconstrói a pressão usando um esquema de diferenciação central. Este regime pode proporcionar maior precisão em relação aos métodos Standard e Linear. Este método não é aplicável para modelos onde existam mistura de fluxo multifásico (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

Existem outros dois métodos, o PRESTO! e o body-force-weighted onde são mais indicados para escoamentos multifásicos (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

3.4.2.3 Momento

Quando a precisão de segunda ordem é desejada, as grandezas em cada célula são calculadas utilizando uma abordagem de reconstrução linear multidimensional (ANSYS Fluent User's Guide, 2013). Devido a este fator, e também a todas as outras escolhas feitas nesta pesquisa, o melhor método a ser utilizado é o Second Order Upwind, onde nesta abordagem, a precisão de ordem superior é conseguido nas células através de uma expansão da série de Taylor da solução na célula central sobre o centroide da mesma (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

Os outros métodos oferecidos pelo ANSYS para a solução utilizam equações de primeira ordem, diminuindo, assim, a precisão, que são os métodos First-Order Upwind e Power Law, ou são métodos mais precisos e indicados para

malhas mais complexas e/ou distorcidas, que são o QUICK e o Third-Order MUSCL (ANSYS Fluent User's Guide, 2013).

3.5. VALIDAÇÃO - SOLUÇÃO

Realizando a simulação para cada uma das oito malhas foi possível verificar os resultados referentes ao perfil de velocidade, à característica da malha (uniforme ou não uniforme e número de volumes) e, assim, através da comparação com o modelo teórico, foi feita a escolha de uma das malhas.

Para uma verificação inicial, comparou-se a velocidade de escoamento na linha de centro (onde $r=0$), pois, esta é a distância mais longe das paredes possível, espera-se, nesse ponto, a velocidade máxima alcançada pelo escoamento depois de seu completo desenvolvimento.

Como visto na Equação (8), a velocidade máxima alcançada pelo fluido é duas vezes o valor da velocidade média (de entrada) no escoamento laminar. Portanto, para uma velocidade média na entrada de 0.02 m/s, é esperado que o escoamento atinja uma velocidade máxima de 0.04 m/s na sua linha de centro.

A Tabela 4 apresenta os valores da velocidade máxima encontrados na simulação do escoamento para cada uma das malhas, assim como o número de volumes de cada malha (AxB) e o percentual de erro em relação ao valor teórico

Tabela 4 - Velocidade máxima do escoamento para diferentes malhas

Malha	Número de volumes	Velocidade axial máxima (m/s)	Porcentagem de erro (%)
900x10 Uniforme	9000	0,039579	1,0525
900x40 Uniforme	36000	0,039952	0,12
1050x20 Uniforme	21000	0,039878	0,305
900x10 Não Uniforme	9000	0,039570	1,075
900x20 Não Uniforme	18000	0,039878	0,305
900x40 Não Uniforme	36000	0,039954	0,115
1050x25 Não Uniforme	26250	0,039914	0,215
1050x60 Não Uniforme	63000	0,039964	0,09

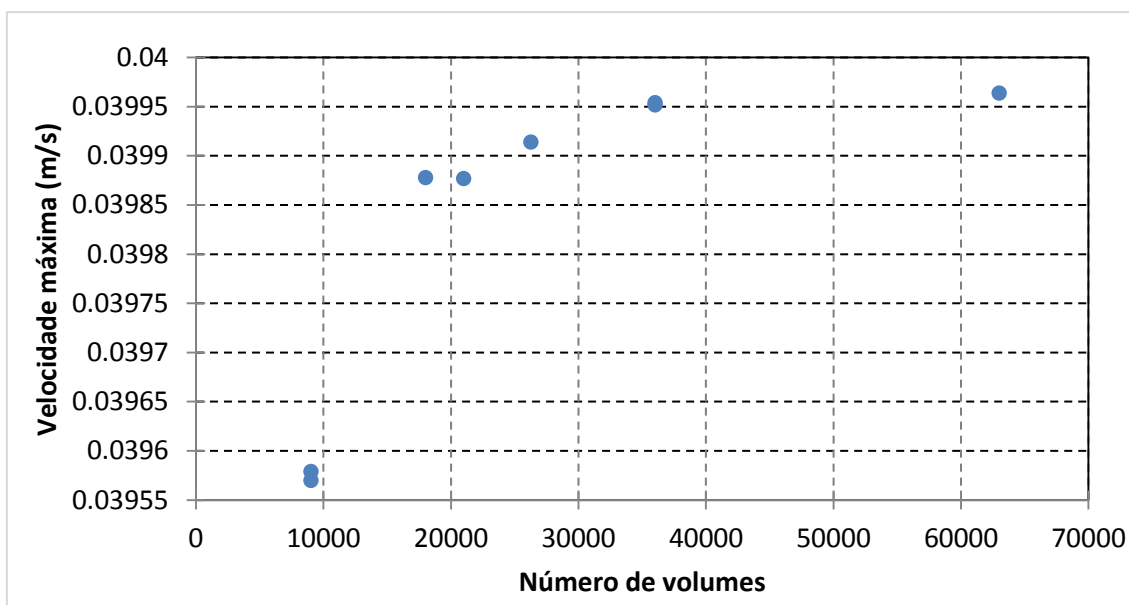
Fonte: Autoria própria

Como esperado, o valor que mais se aproxima da velocidade máxima teórica de 0,04 m/s foi da malha com maior número de volumes, em especial na direção

radial. Após o desenvolvimento, a componente x da velocidade tem variação apenas na direção radial, portanto, esperam-se resultados mais precisos quando há mais volumes nesta direção. Apesar de todos os valores acima se aproximarem bastante do valor desejado, aqueles com mais volumes na direção do raio são mais precisos. Porém, um resultado muito satisfatório apareceu na malha de 900x40 uniforme. Esta, mesmo tendo um número de volumes bem reduzido em relação à malha 1050x60 (quase metade), apresentou velocidade axial máxima com um erro de apenas 0,12% em relação ao valor teórico.

Estes resultados podem ser visualizados no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Número de volumes por velocidade máxima



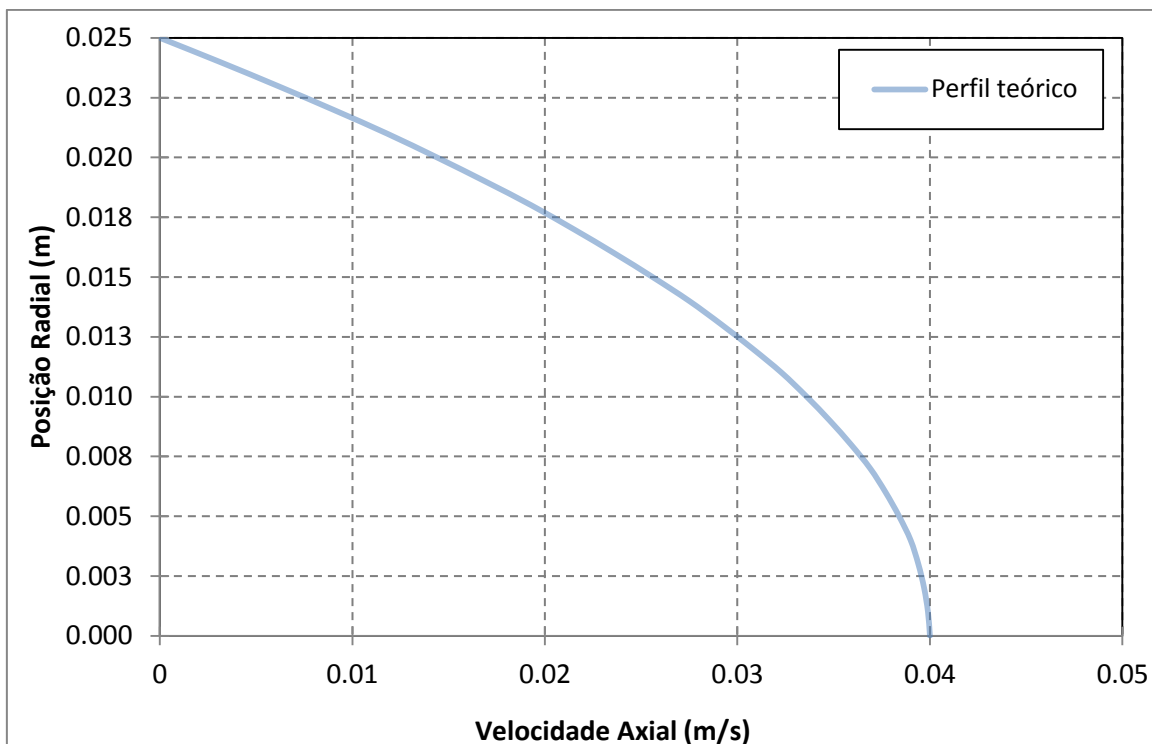
Fonte: Aatoria própria

Confirmando os resultados da tabela 4, a malha de 63 mil volumes foi a que mais se aproximou da velocidade máxima teórica de 0,04 m/s, enquanto as duas malhas de 9 mil volumes foram as mais distantes deste valor. Valores intermediários também podem ser vistos do gráfico, em destaque a malha de 36 mil volumes, que alcança valor bem próximo à teórica.

Dando continuidade às etapas de validação, é feita a comparação dos perfis de velocidade teórico e analíticos encontrados em cada simulação. Como demonstrado na Equação 7, o perfil de velocidade de um escoamento interno

laminar em um tubo de seção circular é: $u(r) = 2V_m(1 - r^2/R^2)$. Com isto, pode-se traçar o perfil teórico de velocidade, encontrando a curva conforme Gráfico 2.

Gráfico 2 - Perfil teórico de velocidade para escoamento laminar interno

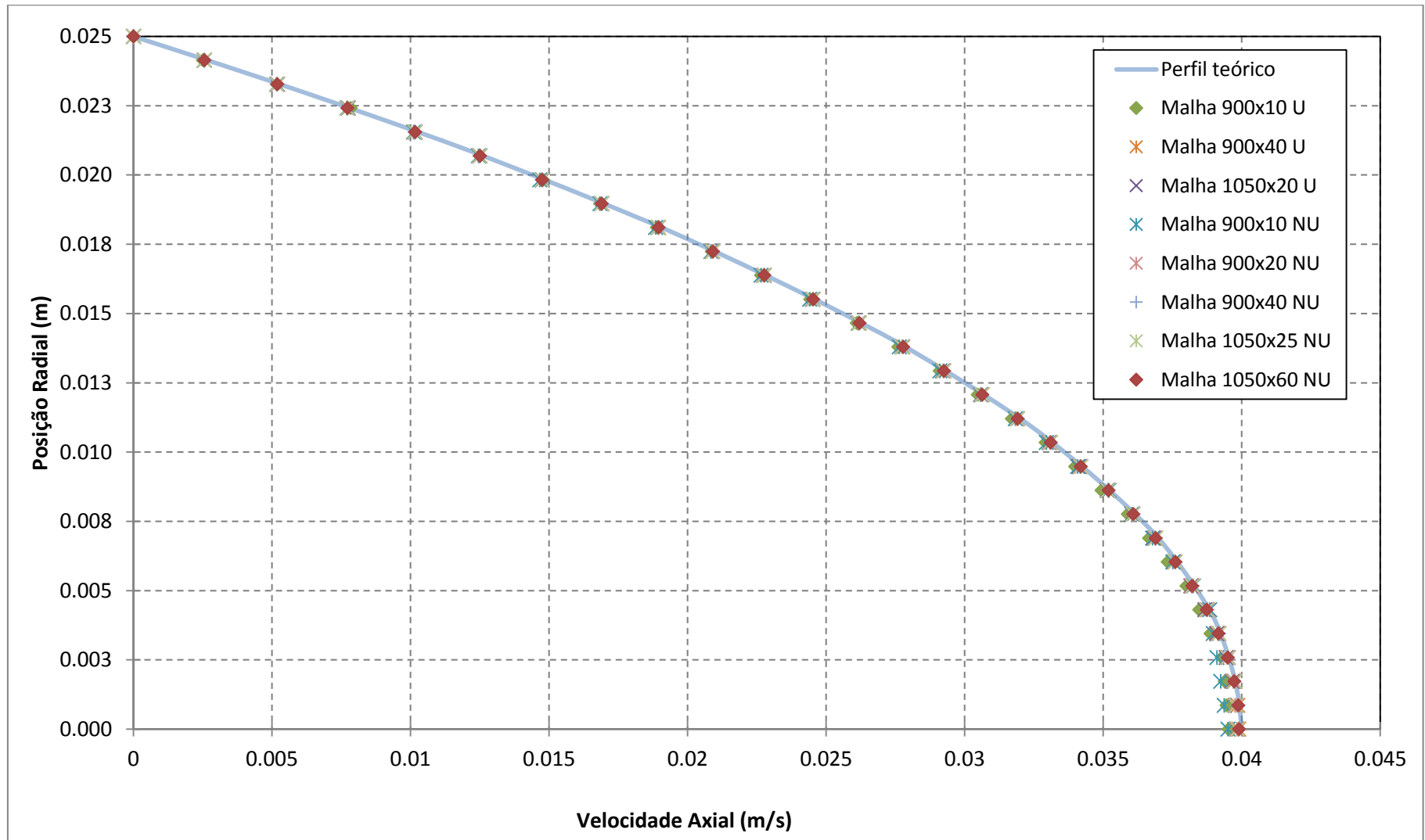


Fonte: Autoria própria

O perfil visto no Gráfico 2 segue a Equação (7) tem um domínio em que $r=[0;0,025]$ possui um formato parabólico. Este perfil só é válido na região em que o escoamento está completamente desenvolvido, ou seja, para regiões mais distantes de que 2,49m da entrada.

Adicionando-se os pontos coletados de cada uma das malhas, foi possível obter um gráfico comparativo do perfil numérico de velocidades e encontrar o que mais se aproxima da curva teórica. Foram coletados trinta pontos para cada uma das malhas, em uma posição horizontal do tubo de 4m de distância do início do escoamento, certificando-se de que os pontos coletados estão em uma região de escoamento completamente desenvolvido. O Gráfico 3 mostra os pontos que definem os perfis numéricos, além da curva teórica:

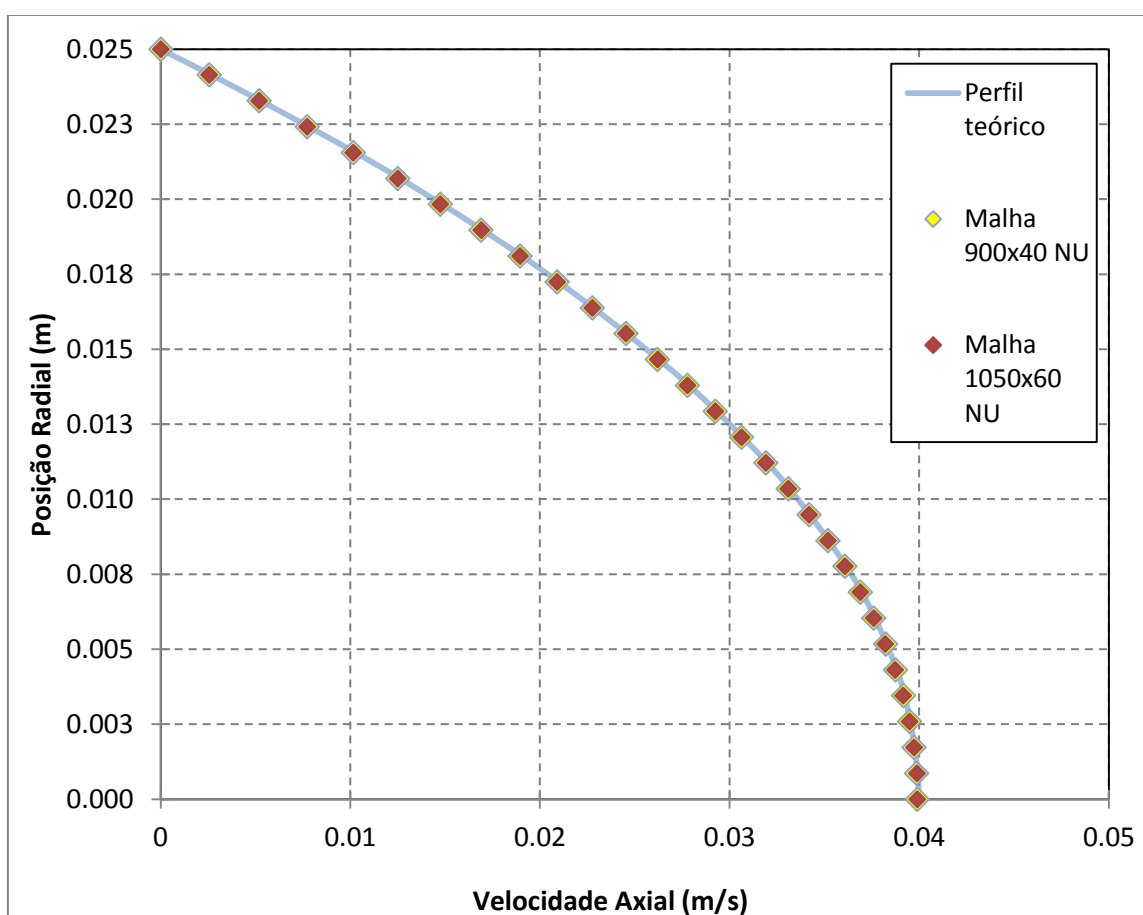
Gráfico 3 - Comparativo dos perfis numéricos de velocidade



Fonte: Autoria própria

Nota-se que os perfis se assemelham bastante entre si, e o resultado em relação ao perfil teórico foi, também, bem satisfatório para os 8 conjuntos de pontos. As malhas com menos volumes começam a se distanciar da curva à medida que a velocidade aumenta, não acompanhando a velocidade máxima de 0,04 m/s até o final. Mais uma vez, são, então, destacados os pontos provenientes das duas malhas que mais se aproximam da curva teórica, conforme se observa no Gráfico 4:

Gráfico 4 - Perfis numéricos de velocidade que mais se aproximam do perfil teórico



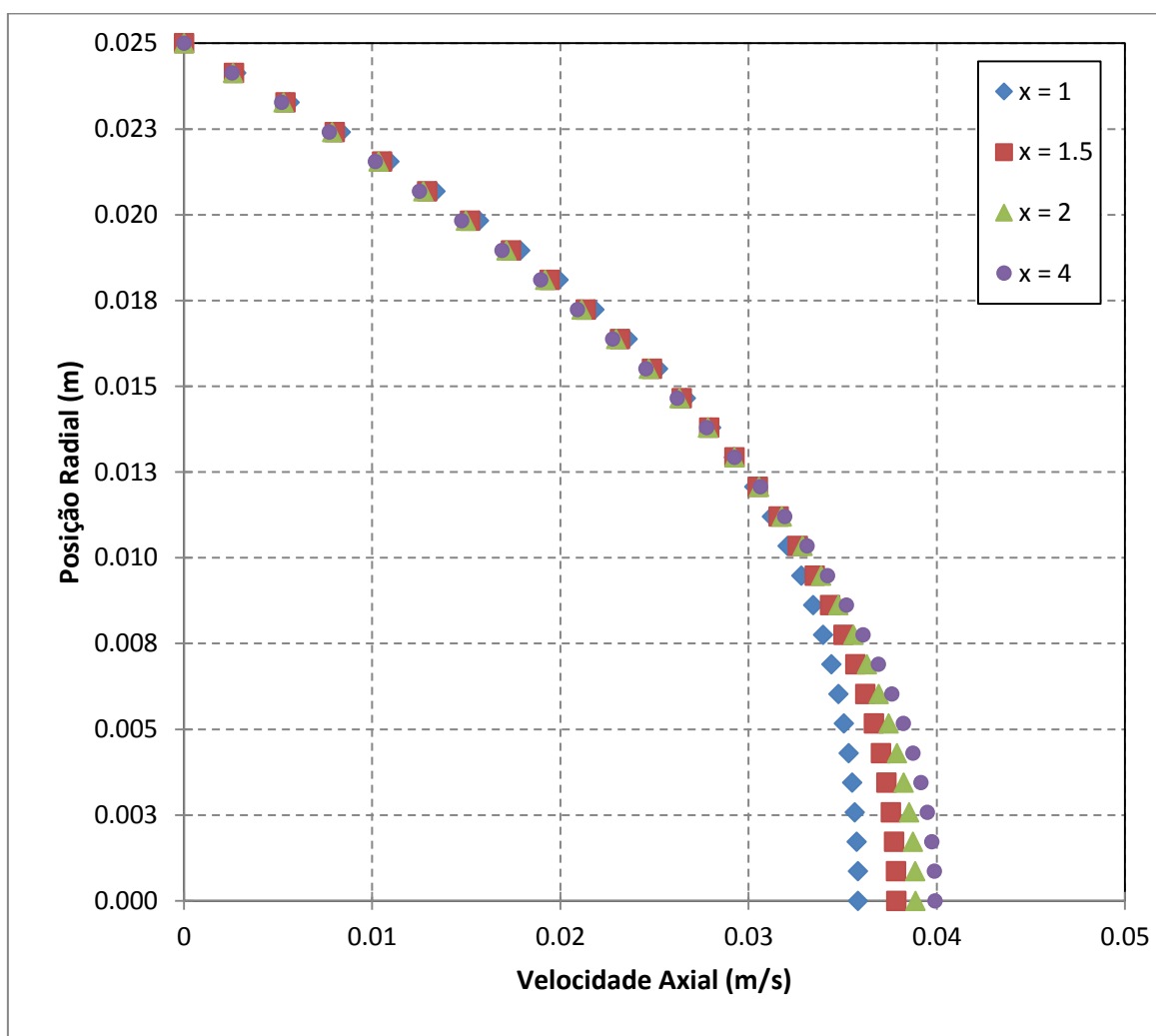
Fonte: Autoria própria

Considera-se, a partir destes testes, que ambas as malhas são condizentes com os resultados e as características físicas reais e teóricas. Continua-se a análise utilizando estes dois modelos de malhas para referências e futuras simulações.

Ainda, a fim de demonstrar o desenvolvimento do escoamento ao longo do tubo, foram coletados pontos de posição radial e velocidade, em posições fora do completo desenvolvimento do escoamento, isto é, para valores horizontais de $x <$

2,49m. Os pontos foram retirados a partir dos resultados do escoamento para a malha com maior número de volumes (malha 1050x60 Não Uniforme) e, mais uma vez, plotados lado a lado. Os pontos correspondem à posições em que $x = 1\text{m}$; $x = 1,5\text{m}$; $x = 2\text{m}$ e $x = 4\text{m}$, sendo, este último, a única posição, dentre as quatro, em que o escoamento já se desenvolveu completamente. Os resultados obtidos podem ser visualizados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Perfis de velocidade para posições fora da região completamente desenvolvida do escoamento



Fonte: Autoria própria

Este resultado demonstra a importância da análise de validação em posição posterior ao completo desenvolvimento do escoamento. A velocidade máxima de escoamento só é atingida após os 2,49m. Resultados obtidos em uma posição anterior à esta seriam duvidosos e não poderiam ser usados a fim de validação da malha.

4 METODOLOGIA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO

Tendo definido um modelo teórico para escoamento disperso (Seção 2.2), equações de regime e queda de pressão (Seções 2.2 e 2.3), além de um modelo computacional com a geometria e a malha validadas (Capítulo 3), inicia-se a análise teórica e computacional no campo de estudo deste trabalho: o escoamento bifásico disperso.

Abre-se paralelamente ao projeto monofásico iniciado no ANSYS Fluent, um novo projeto com parâmetros compartilhados: geometria e malha. As simulações continuarão a serem realizadas na tubulação bidimensional com axissimetria, e utilizando a malha mais refinada não uniforme encontrada nos resultados anteriores.

Cada etapa da metodologia utilizada para simular os escoamentos bifásicos é apresentada em detalhe.

4.1 METODOLOGIA - GEOMETRIA

A geometria utilizada nos escoamentos é idêntica à utilizada na validação. Uma tubulação horizontal em duas dimensões. A tubulação possui 50 milímetros de diâmetro interno e 15 metros de comprimento.

4.2 METODOLOGIA - MALHA

A malha escolhida para as simulações líquido-líquido foi a malha mais refinada da etapa de validação: 1050x60 Não Uniforme. As superfícies foram nomeadas de maneira idêntica e o espaçamento entre cada volume tanto na vertical quanto na horizontal são iguais à malha validada.

4.3 METODOLOGIA - SOLUCIONADOR

A etapa do Solucionador para o escoamento bifásico é bem diferente em relação ao escoamento monofásico realizado apenas com água na validação. O modelo de escoamento teve que ser alterado para mistura, o que acrescenta

diversas novas opções nas condições de contorno, além de alterar os métodos de solução e valores de referência. Também é preciso tomar cuidado com condições de entrada, que diferente das primeiras simulações, aqui são feito inputs para dois fluidos diferentes.

4.3.1 Opções gerais do Solucionador

O tipo de *solver* utilizado foi o *pressure-based*, pois, assume impulso e pressão (ou correção de pressão) como principais variáveis, além de requerer menos memória (armazenamento) e permitir flexibilidade no procedimento de solução.

4.3.2 Modelos

Na modelagem multifásica foi utilizado o modelo de mistura (*mixture model*) por ser o modelo que mais se aproxima do modelo teórico de dispersão homogêneo, e não necessitar de tanto processamento computacional como no modo euleriano. Este modelo é utilizado na maioria dos artigos a respeito de fluxos bifásicos, onde comparações de entradas (velocidade de mistura x velocidade relativa de cada fase) foram feitos sendo somente possíveis de se realizar numa abordagem feita com o modelo de mistura.

Dentro do modelo de mistura existem duas análises possíveis: com ou sem velocidade de deslizamento. Com a análise de deslizamento ativada (padrão), o ANSYS FLUENT irá considerar as interações de deslizamento entre a fase dispersa em bolhas e o contínuo. Isto permitirá definir a velocidade de entrada para ambos os fluidos. Caso a análise de deslizamento seja desativada, o ANSYS Fluent desconsidera interações de deslizamento e trata ambas as fases como um fluido homogêneo. Nesta opção, não é possível definir velocidade para cada uma das fases, sendo apenas possível definir a velocidade de entrada da mistura (ANSYS Fluent Theory Guide, 2013).

4.3.3 Materiais

Nesta etapa foi feita a escolha das duas fases presentes no escoamento, assim como suas propriedades físicas (densidade e viscosidade cinemática). Os fluidos utilizados na análise foram:

Tabela 5 - Propriedades físicas dos fluidos

Fase	Densidade (kg/m³)	Viscosidade (kg/m.s)
Água Líquida (<i>FLUENT</i>)	998,2	0,001003
Óleo Mineral (Trallero, 1997)	849	0,02969

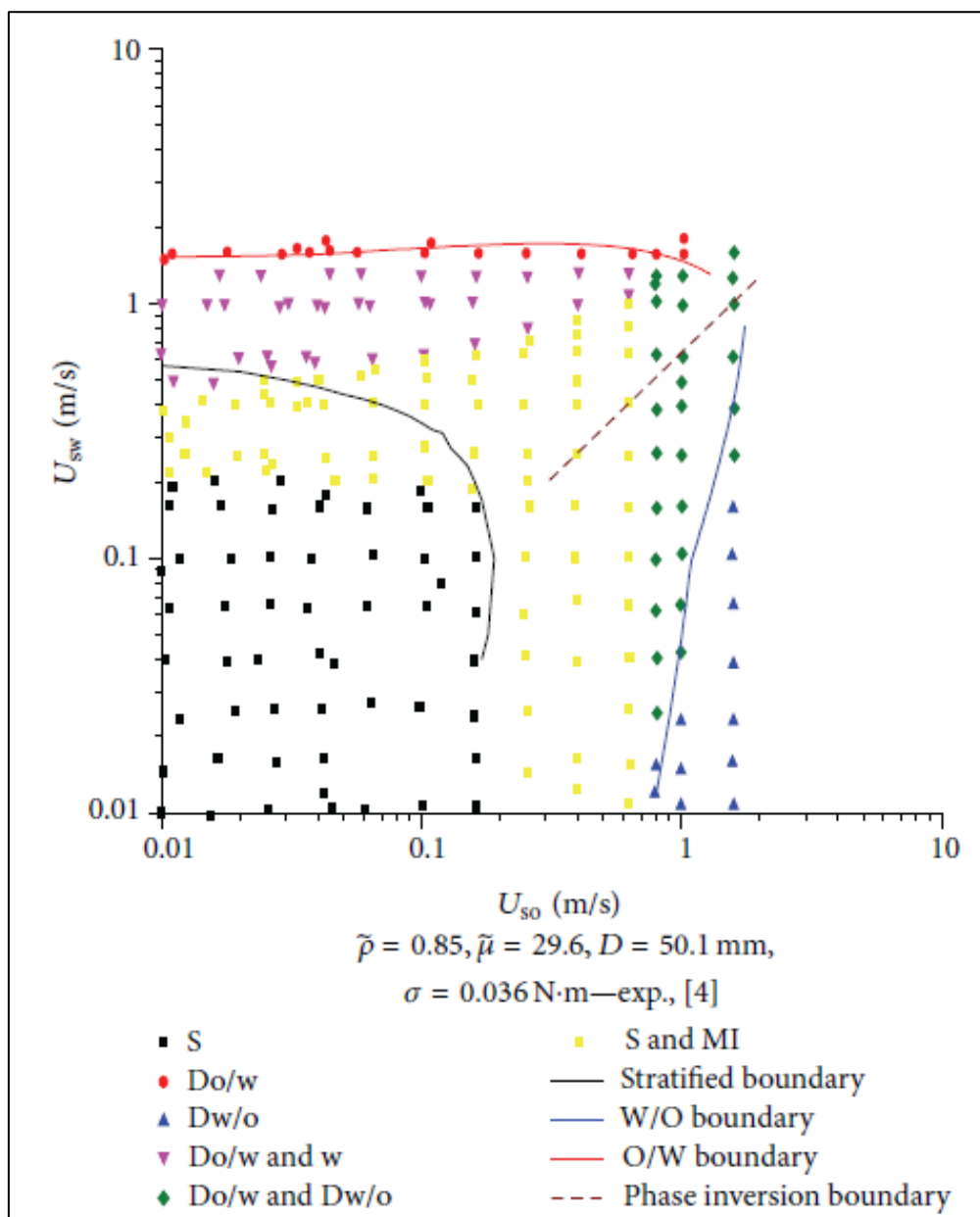
Fonte: Autoria própria

O óleo escolhido foi um óleo mineral utilizado no trabalho de Trallero (1997) e tem as características acima. A água líquida está presente no banco de dados de fluidos do ANSYS Fluent.

A escolha do óleo foi estratégica a fim de facilitar que o escoamento esteja na região (ou range) em que o escoamento líquido-líquido se comporta como uma dispersão. Verificado por Trallero (1997) e posteriormente ainda por Wei Wang (2013), para determinado *set-up* e intervalo de velocidades, o escoamento terá caráter disperso.

Conforme ilustrado na figura 30, Trallero (1997) construiu e Wei Wang (2013) verificou um diagrama de padrões de escoamento em função das velocidades superficiais de cada fase, onde a tubulação tem 50 mm de diâmetro, a razão entre densidades ρ_o/ρ_w é de 0,85 e a razão entre viscosidades μ_o/μ_w é de 29,6. Neste diagrama com estas configurações, é possível garantir o caráter desejado do escoamento. A escolha do diâmetro do tubo e das características do óleo mineral deste trabalho foi importante para assegurar a região em que o escoamento simulado se encontra, e com isso controlar seu comportamento por meio das equações pertinentes.

Figura 30 - Diagrama de padrões de escoamento



Fonte: Wei Wang (2013)

4.3.4 Condições de Contorno

Nesta etapa verifica-se a nomenclatura de cada superfície (chamada de *zones* pelo Fluent) e os parâmetros de entrada. A aresta *axis* é tratada como linha de simetria, a aresta *inlet* como parâmetros de entrada, a aresta *outlet* define os parâmetros de saída e a aresta *wall* é tratada como parede. Para os parâmetros de entrada é possível definir a velocidade de entrada para cada fase (velocidade de

entrada do óleo e velocidade de entrada da água), além da fração em volume de cada fase presente no escoamento. Para garantir um escoamento no padrão disperso, observou-se novamente a Figura 30 e escolheu-se velocidades superficiais que se encontram dentro do intervalo Dw/o ou Do/w no diagrama.

Existem na literatura experimentos realizados em que os resultados finais são em função da velocidade da mistura e não da velocidade de cada fase separada. Para fim de comparações com experimentos deste tipo, foi simulado também utilizando a opção de análise de deslizamento desligada, conforme descrito na Seção 4.3.2

4.3.5 Métodos de Solução

Nesta etapa foi feito a escolha dos métodos de interpolação utilizados pelo ANSYS FLUENT, assim como os algoritmos que utilizará para a resolução das equações de continuidade e transporte.

4.3.5.1 Escolhendo o método de acoplamento Pressão-Velocidade

O Método Semi-Implicito para Equações Ligadas à Pressão (SIMPLE) foi escolhido por eliminação em comparação com os métodos disponíveis, se mostrando o método mais simples e robusto (ANSYS Fluent Theory Guide, 2013)

4.3.5.2 Discretização espacial

Seção do ANSYS Fluent que contém configurações que controlam a discretização espacial dos termos de convecção.

4.3.5.3 Gradiente

O método escolhido foi o *Least-Squares Cell-Based* por ter a mesma precisão e propriedades dos *Node-based*.

4.3.5.4 Pressão

O método PRESTO! apesar de sua utilização ser indicada para fluxos altamente turbulentos, e envolvendo gradientes de pressão íngreme o único outro método disponível (*Body Force Weighted*) é usado quando as forças do corpo são grandes, por exemplo, alta convecção ou alto turbilhão de fluxos, por eliminação o método PRESTO! foi escolhido.

4.3.5.5 Momento

Por ser importante uma boa precisão de resultados, o método *Second Order Upwind* foi escolhido. Ele possui uma precisão de segunda ordem, diferenciando-se dos métodos *First-Order Upwind* e *Power Law* (métodos com precisão de primeira ordem), numa malha não complexa, eliminando assim os métodos *QUICK* e o *Third-Order MUSCL*.

4.3.5.6 Fração de volume

O método utilizado é o *First-Order Upwind* por eliminação, pois a outra opção é o método *QUICK* onde é indicado para malhas complexas, fugindo assim do escopo das simulações.

4.3.6 Monitoramento

Na etapa final antes dos cálculos, foi configurada a ordem de grandeza dos residuais, caracterizando a tolerância aceitável dos restos das equações para a convergência da solução. A tolerância utilizada para problemas de escoamento bifásico foi de 10^{-7} . O solucionador rodou no modo precisão dupla utilizando 6 núcleos do processador.

4.3.7 Equacionamento ANSYS Fluent - Modelo Mistura

Em qualquer simulação utilizando o modelo de mistura, o ANSYS Fluent resolve a equação de continuidade da mistura, a velocidade da mistura, a densidade e viscosidade da mistura, a equação da quantidade de movimento da mistura, além de outros equacionamentos (ANSYS Fluent Theory Guide, 2013).

Como será feito a comparação de resultados teóricos com experimentais da simulação, é interessante entender como o programa realiza alguns desses cálculos.

A equação da continuidade resolvida pelo ANSYS Fluent é:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m v_m) = 0 \quad (25)$$

Onde v_m é a velocidade média da mistura, que por sua vez, é encontrado com:

$$v_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot \rho_k \cdot v_k}{\rho_m} \quad (26)$$

E ρ_m é a densidade média da mistura, calculada conforme equação 27:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot \rho_k \quad (27)$$

Sendo que k é cada uma das fases e α_k é a fração em volume da fase k .

A viscosidade de mistura é dada por (ANSYS Fluent Theory Guide, 2013):

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot \mu_k \quad (28)$$

E por fim, a equação da quantidade de movimento para uma mistura de k fases é dado por (ANSYS Fluent Theory Guide, 2013):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) \\
= -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \\
+ \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right)
\end{aligned} \tag{29}$$

Onde:

- $\nabla \vec{v}_m^T$ representa a turbulência do escoamento. Para escoamento laminar esse termo é nulo;
- \vec{F} representa outras forças de campo. Nesse trabalho, a única força de campo é devido ao campo gravitacional, já representada por $\rho_m \vec{g}$;
- $\nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k})$ é o termo convectivo da Equação (29) que leva em consideração o deslizamento entre as fases. $\vec{v}_{dr,k}$ é a velocidade de deslizamento (drift) da fase k.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos a partir dos quatro testes realizados.

5.1 VISÃO GERAL

Foram analisados e discutidos resultados obtidos a partir de quatro testes diferentes, simulados de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 4, isto é, geometria, malha, fases, velocidades e equacionamento. Serão apresentados os principais resultados obtidos pós-simulação, assim como resultados teóricos obtidos utilizando o modelo de escoamento disperso bifásico homogêneo.

Um resumo dos parâmetros de entrada de cada teste pode ser visto na Tabela 6:

Tabela 6 - Parâmetros de entrada de cada simulação

Teste	Fase 1 (ε)	Fase 2 (ε)	U_{s1} (m/s)	U_{s2} (m/s)	Distribuição do Padrão	Deslizamento
1	Óleo Mineral (0,7)	Água (0,3)	1,05	0,015	Dw/o	Sim
2	Água (0,5)	Óleo Mineral (0,5)	1	0,09	Do/w	Sim
3	Óleo Mineral (0,8)	Água (0,2)	-	-	Dw/o	Não
4	Água (0,6)	Óleo Mineral (0,4)	-	-	Do/w	Não

Fonte: Autoria própria

As Fases 1 e 2 representam qual fluido foi designado para ser primário e secundário no ANSYS Fluent. Os números entre parênteses são as frações em volume de cada fase. Em seguida foi definida a velocidade de entrada de cada uma das fases. As velocidades superficiais já levam em conta a fração em volume de cada fase. A distribuição do padrão foi forçada de modo que sempre se consiga um perfil disperso, portanto duas opções são possíveis, dispersão de água em óleo (Dw/o) ou dispersão de óleo em água (Do/w). A fração em volume da fase dominante é no geral, escolhida para ser superior à da fase dispersa, para concordar com a teoria de Trallero (1997) e Elseth (2001). A velocidade de cada fase é

escolhida de modo que o padrão de escoamento caia sobre uma das regiões: dispersão de óleo em água ou dispersão de água em óleo, conforme mencionado na Figura 30, concordando com as teorias de Trallero (1997) e Wei Wang (2013).

Das quatro simulações realizadas, a terceira e a quarta utilizaram o método *no slip* (sem deslizamento), opção presente no modelo de simulação de mistura do programa. Como já citado, nesta categoria, o escoamento é assumido pelo ANSYS Fluent como disperso homogêneo desde que haja velocidade suficiente para isso, e o fluido de trabalho é um fluido "resultante" das configurações de entrada definidas pelo usuário. Note que nesta opção, não existe velocidade de entrada para cada uma das fases, existindo apenas a velocidade de entrada para mistura, também definida pelo usuário.

5.2 TESTE 1

A primeira simulação analisada consiste de: fase de 70% em volume de óleo mineral (densidade: 849 kg/m³ e viscosidade: 0,02969 kg/(m.s)) com velocidade superficial de 1,05 m/s. A segunda fase é constituída de 30% em volume de água (densidade: 998,2 kg/m³ e viscosidade: 0,001003 kg/(m.s)) com velocidade superficial de 0,015 m/s. O padrão Dw/o é garantido pela grande diferença de velocidade entre as fases, sendo que o óleo encontra-se também em maior quantidade. Isto satisfaz ambas as condições de Trallero (1997) e Elseth (2001) para dominância de uma das fases.

Os resultados encontrados para velocidade média da mistura, densidade da mistura e diferença de pressão (perda de carga) encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados - Teste 1

$U_{\text{mix-t}}$ (m/s)	$U_{\text{mix-f}}$ (m/s)	ρ_{mix} (kg/m ³)	Δp_t (Pa)	Δp_f (Pa)	Erro (%)
1,065	1,014	893,8	4311	6309	31,7

Fonte: Autoria própria

Os subscritos *t* e *f* referem-se à *teoria* e *fluent*, respectivamente.

A teoria para cálculo da velocidade da mistura segue o modelo de Elseth (2001) e Arirachakaram (1989) e foram encontradas com a Equação (15).

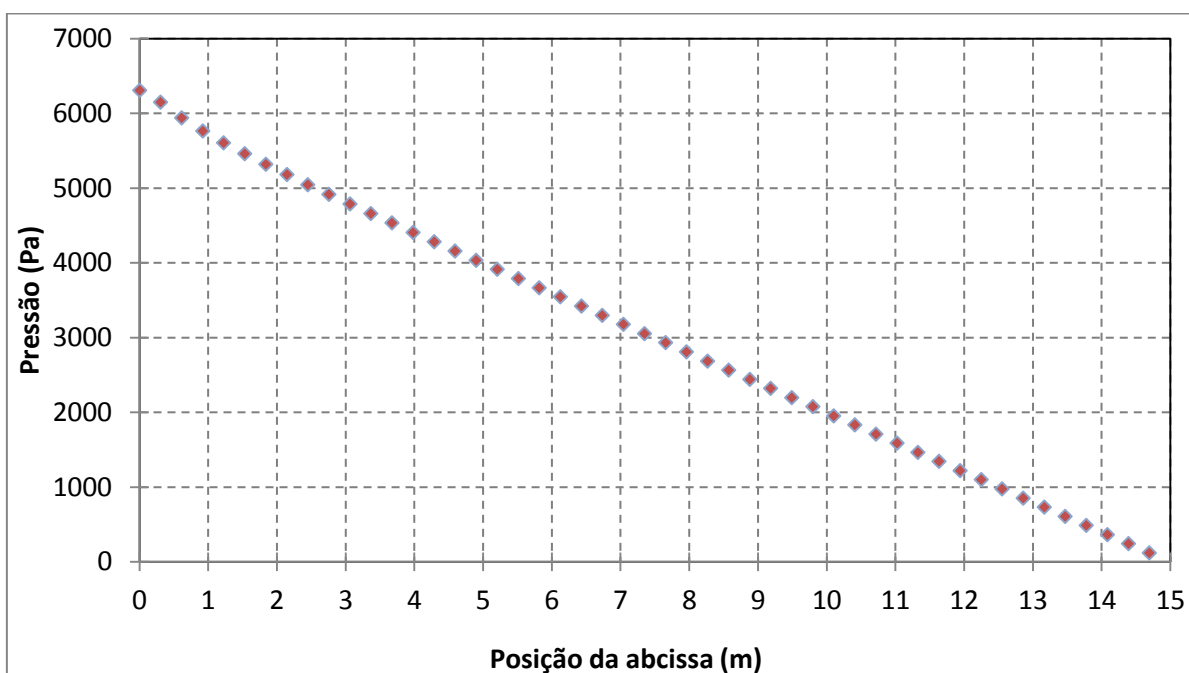
A velocidade média da mistura encontrada pelo ANSYS Fluent pode ser calculada antes mesmo do programa realizar a simulação, utilizando-se a Equação (26).

A densidade média da mistura possui o mesmo valor tanto para o ANSYS Fluent quanto para a teoria, pois ambos utilizam os mesmos cálculos, conforme Equações (20) e (27).

A diferença de pressão teórica foi encontrada utilizando a Equação (17) para perdas distribuídas, multiplicando-a pelo comprimento do tubo.

E por fim, utilizando-se a ferramenta de pós-processamento do ANSYS Fluent, foi coletado pontos para plotar a distribuição da pressão ao longo do tubo no escoamento, observando a queda do valor a medida que este se aproxima da atmosfera na saída, conforme mostrado no Gráfico 6:

Gráfico 6 - Distribuição da pressão - Teste 1



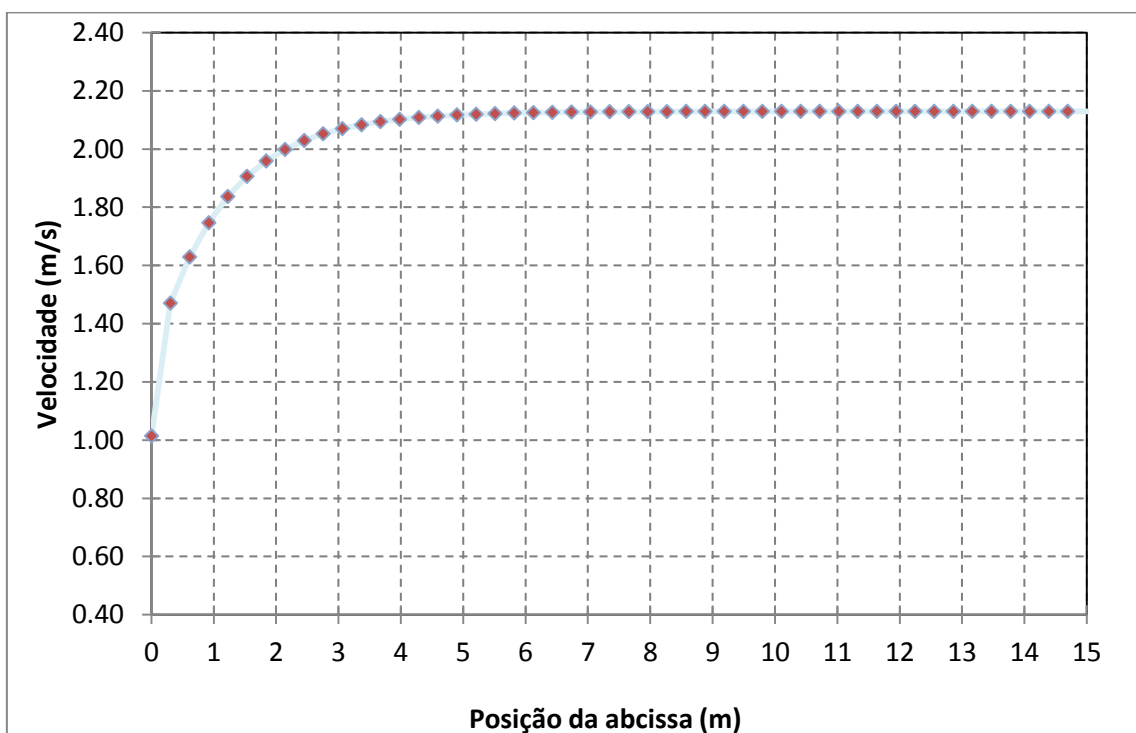
Fonte: Autoria própria

Observou-se uma grande porcentagem de erro da queda de pressão teórica em relação ao valor encontrado pelo ANSYS Fluent. Foi considerado que o valor mais provável de estar próximo à realidade seja o encontrado via simulação, devido

às incertezas e aproximações teóricas, além da falta de modelos teóricos mais precisos para escoamentos dispersos não homogêneos.

A velocidade média da mistura é calculada pelo ANSYS Fluent de acordo com a Equação (26), porém, podemos obter a velocidade máxima encontrada na linha de centro depois do desenvolvimento, analisando os pontos coletados no programa de pós-processamento. É possível enxergar em qual ponto da abscissa não há mais alteração de velocidade na direção do escoamento, e qual o valor máximo alcançado pelos fluidos. O Gráfico 7 demonstra o perfil de desenvolvimento para o primeiro escoamento:

Gráfico 7 - Desenvolvimento da velocidade - Teste 1



Fonte: Autoria própria

A mistura foi dos iniciais 1,014 m/s para uma velocidade máxima de 2,129, e o desenvolvimento total do escoamento se deu há aproximadamente 6 metros do início do escoamento.

5.3 TESTE 2

A segunda simulação utiliza os mesmos fluidos, porém com 50% de concentração cada e a fase dominante é a água, que entra com velocidade superficial de 1,0m/s, e o óleo como fase dispersa com velocidade superficial de 0,09m/s. Os resultados foram coletados e são expostos na Tabela 8.

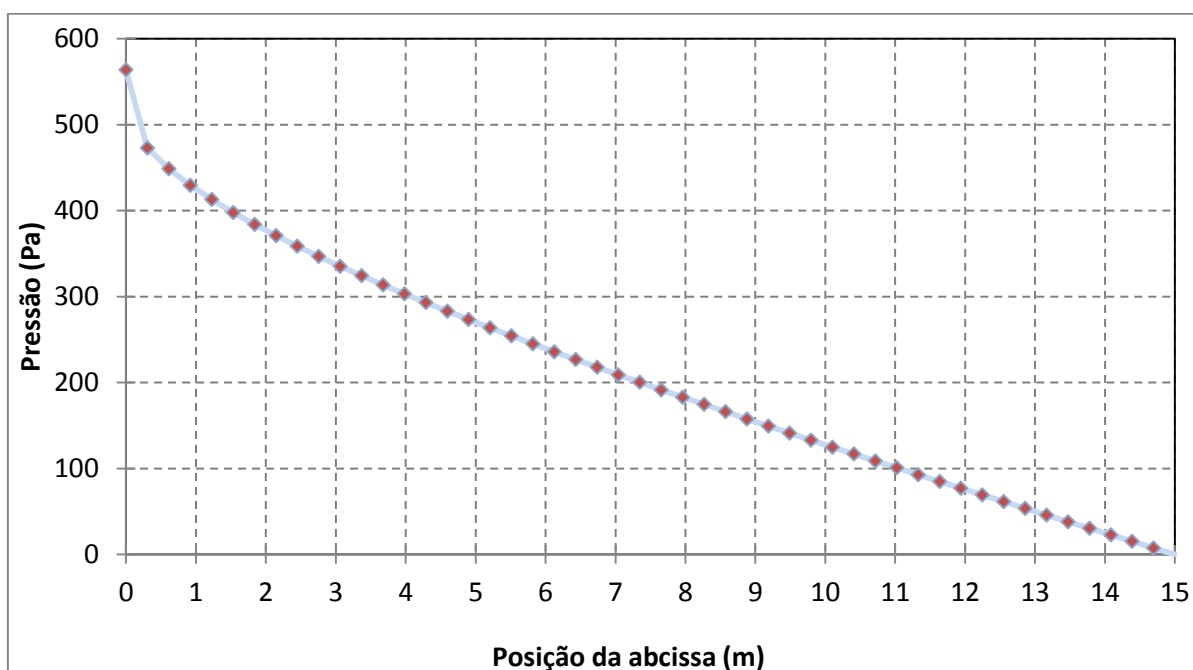
Tabela 8 - Resultados - Teste 2

U_{mix-t} (m/s)	U_{mix-f} (m/s)	ρ_{mix} (kg/m ³)	Δp_t (Pa)	Δp_f (Pa)	Erro (%)
0,545	0,582	923,6	1600	564	183

Fonte: Autoria própria

O Gráfico 8 mostra a distribuição de pressão ao longo do tubo:

Gráfico 8 - Distribuição da pressão - Teste 2

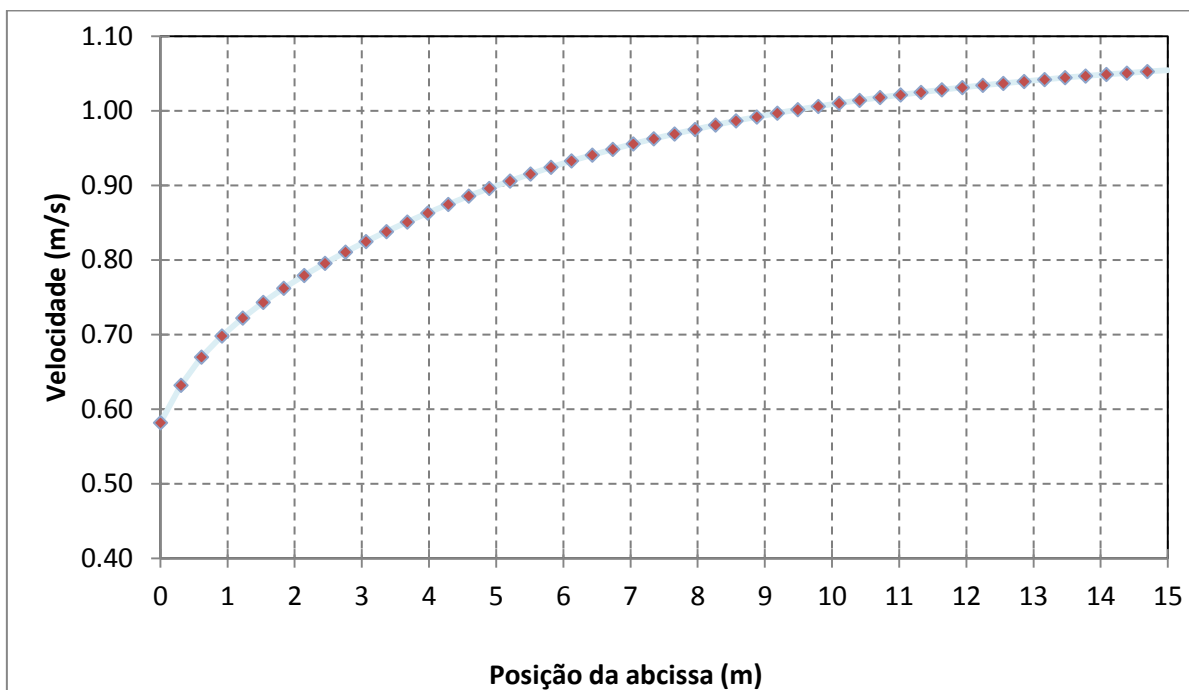


Fonte: Autoria própria

Neste teste observamos novamente uma boa concordância de valores para velocidades da mistura da teoria e do ANSYS Fluent, porém, a diferença de pressão teórica é até 3 vezes maior que a encontrada pelo programa.

A velocidade se desenvolve ao longo do tubo de acordo com o Gráfico 9.

Gráfico 9 - Desenvolvimento da velocidade - Teste 2



Fonte: Autoria própria

No teste 2, a velocidade média da mistura parte inicialmente de 0,582 m/s e chega à um valor máximo de 1,05 m/s, porém, não parece haver qualquer tipo de desenvolvimento ao longo dos 15 metros percorridos, aumentando gradativamente a velocidade até o final. O comprimento do tubo não foi o suficiente para que haja um desenvolvimento completo do escoamento. As interações entre fases e incertezas relacionadas ao escoamento bifásico tornam difícil a predição de um ponto de desenvolvimento na abscissa. Nenhuma bibliografia consultada trata de predições de desenvolvimento no escoamento bifásico.

5.4 TESTE 3

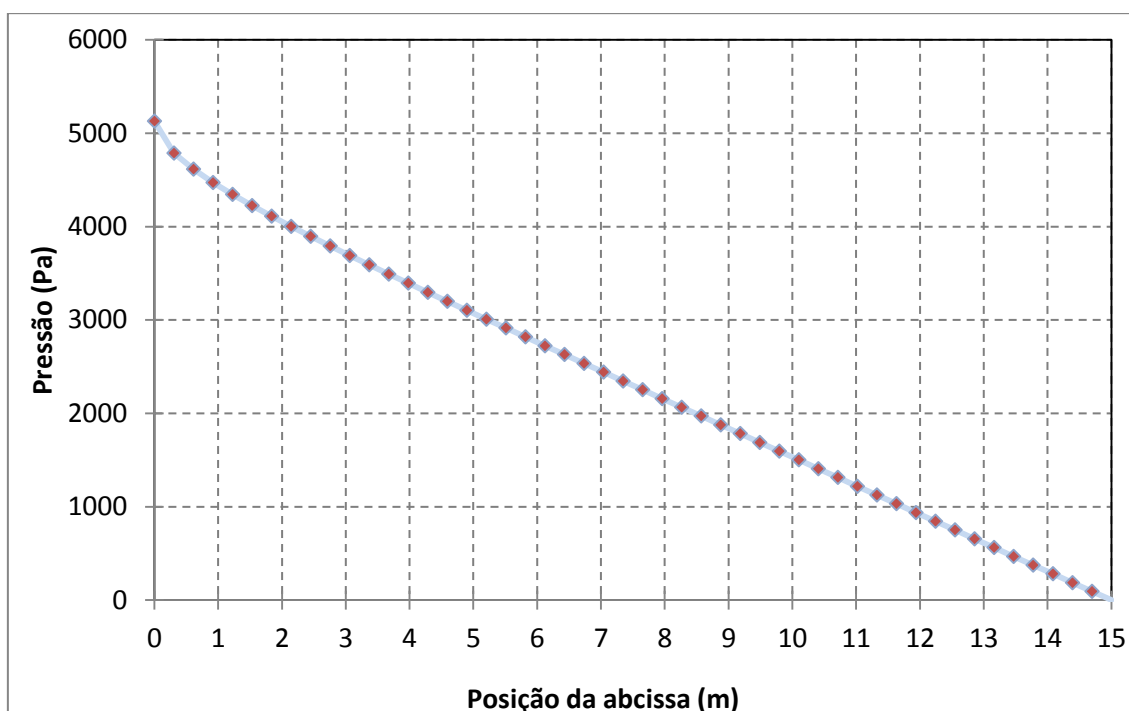
A terceira simulação realizada utiliza o modelo de mistura com o deslizamento desativado. Este modelo não considera as interações entre fases, logo é definido apenas a velocidade média da mistura. Neste teste onde o óleo é fase dominante e a água é o fluido disperso, foi definida velocidade da mistura de 1,0 m/s e concentração da água de 0,2. Os resultados são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados - Teste 3

$U_{\text{mix-t}}$ (m/s)	$U_{\text{mix-f}}$ (m/s)	ρ_{mix} (kg/m ³)	Δp_t (Pa)	Δp_f (Pa)	Erro (%)
1,0	1,0	878,8	4600	5130	10,3

Fonte: Autoria própria

E a distribuição de pressão no tubo para o teste 3 pode ser visualizada no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Distribuição da pressão - Teste 3

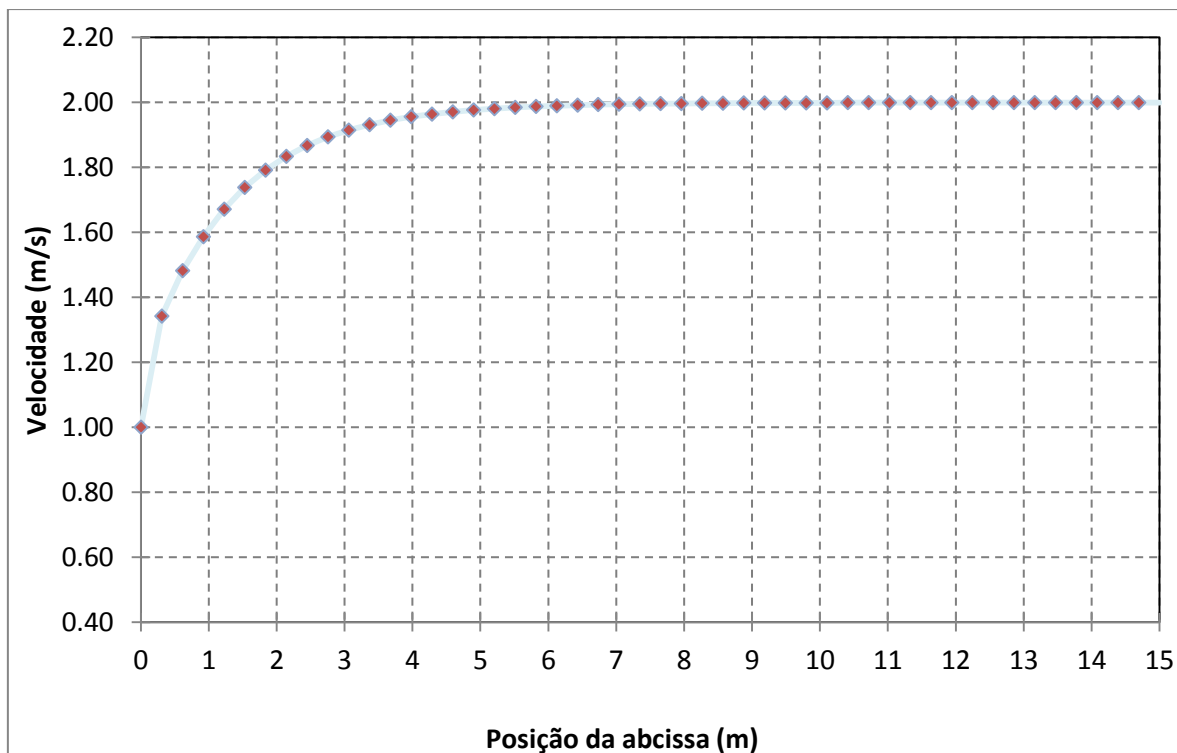
Fonte: Autoria própria

Observa-se que desta vez os resultados de queda de pressão não se diferem tanto quanto nos dois primeiros testes: apenas 10% de diferença do resultado teórico para o numérico. Esta maior proximidade de resultados pode ser explicada pelo modelo utilizado na teoria. O modelo teórico tenta prever características para escoamento disperso homogêneo. Ao desconsiderar-se o deslizamento e iterações entre fases, chega-se ao mais próximo possível desta situação. Portanto, o modelo teórico se aproxima muito do numérico, trazendo resultados semelhantes e compatíveis.

De maneira análoga, a velocidade máxima alcançada pelo escoamento chega à um valor bem semelhante do que seria, caso se tratasse de um escoamento

monofásico. Como o Fluent trata ambos os fluidos como um fluido só com características próprias, a velocidade máxima observada vale o dobro da velocidade de entrada de 1 m/s, conforme demonstrado no Gráfico 11:

Gráfico 11 - Desenvolvimento da velocidade - Teste 3



Fonte: Autoria própria

5.5 TESTE 4

Na quarta e última simulação realizada, o modelo de mistura sem deslizamento é novamente utilizado. A fase dominante é a água com concentração de 0,6 e a fase dispersa é o óleo mineral com concentração de 0,4. A velocidade de entrada da mistura foi de 0,55 m/s. O escoamento assume padrão Do/w (dispersão de óleo em água).

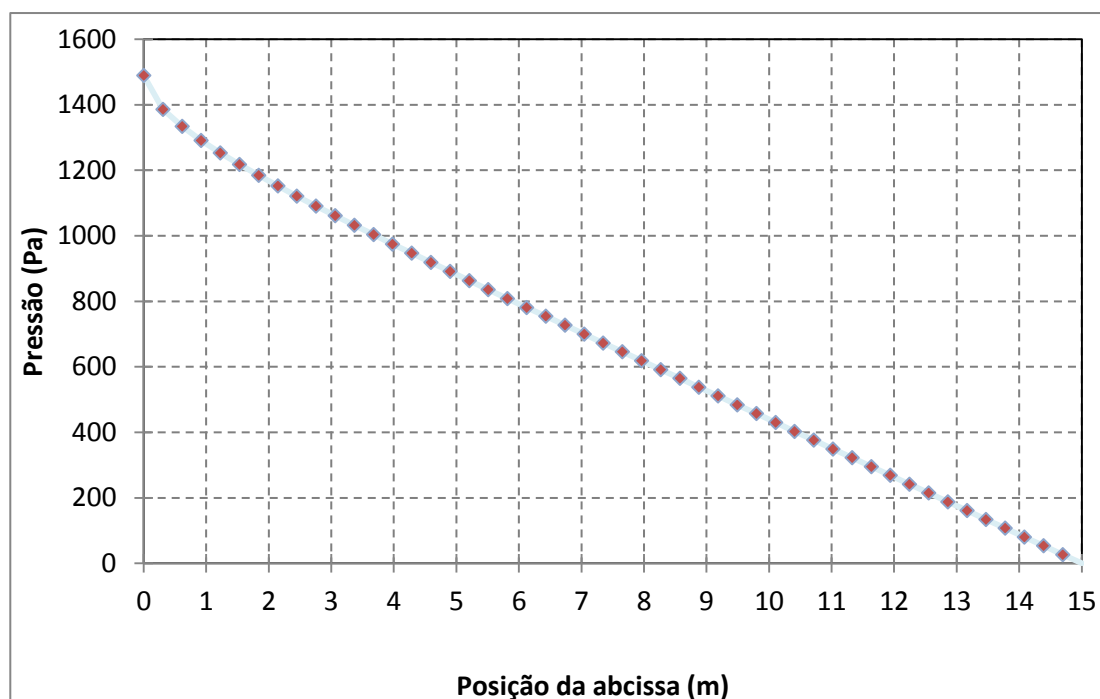
Os resultados encontrados para este escoamento são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados - Teste 4

$U_{\text{mix-t}}$ (m/s)	$U_{\text{mix-f}}$ (m/s)	ρ_{mix} (kg/m ³)	Δp_t (Pa)	Δp_f (Pa)	Erro (%)
0,55	0,55	938,5	1318	1489	11,5

Fonte: Autoria própria

A distribuição de pressão ao longo do tubo para este caso pode ser vista no Gráfico 12.

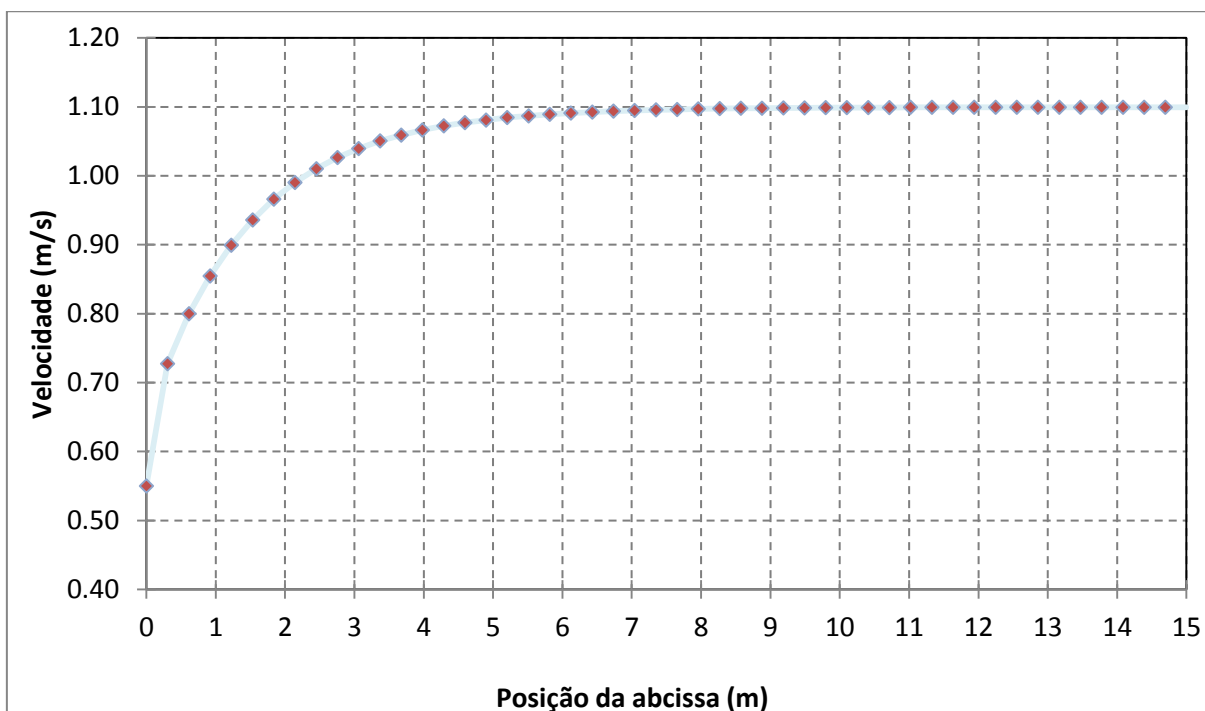
Gráfico 12 - Distribuição da pressão - Teste 4

Fonte: Autoria própria

Novamente os resultados para queda de pressão tiveram boa semelhança entre si, 11,5% de diferença do teórico em relação ao numérico, reforçando a importância da utilização de um modelo teórico mais próximo e evidenciando a falta de um modelo para escoamento disperso não homogêneo.

Semelhante ao teste 3, a distribuição de velocidade ao longo do tubo foi conforme o Gráfico 13. Partindo de uma velocidade média de mistura de 0,55 m/s, o escoamento atingiu sua velocidade máxima de 1,10 m/s em uma abscissa de aproximadamente 7 metros.

Gráfico 13 - Desenvolvimento da velocidade - Teste 4



Fonte: Autoria própria

O resumo de todos os resultados para os 4 testes pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados geral das simulações

Teste	$U_{\text{mix-t}}$ (m/s)	$U_{\text{mix-f}}$ (m/s)	Δp_t (Pa)	Δp_f (Pa)	Erro Δp (%)
1	1,065	1,014	4311	6309	31,7
2	0,545	0,582	1600	564	183
3	1,0	1,0	4600	5130	10,3
4	0,55	0,55	1318	1489	11,5

Fonte: Autoria própria

Para a velocidade da mistura nos testes 1 e 2, os valores preditos pela teoria e pelo ANSYS Fluent foram bem semelhantes. Nos testes 3 e 4 onde o deslizamento é desconsiderado, este acaba sendo mais um parâmetro de entrada do que um resultado propriamente dito, visto que o usuário neste caso não escolhe a velocidade de cada uma das fases. Os resultados de diferença de pressão dos dois primeiros testes são bem divergentes em relação a teoria, chegando até a valores 3 vezes maior como no segundo caso. Porém, isto é explicado pela real aproximação

do modelo utilizado para realizar os cálculos teóricos, não se tratando especificamente de um modelo bifásico genérico, e sim bifásico disperso homogêneo especificamente. Com as interações entre fases ligadas, não há qualquer garantia de que o escoamento seguirá um modelo puramente homogêneo, causando grandes divergências nos resultados quando comparados com a teoria.

Já os resultados de diferença de pressão para os testes 3 e 4 foram os mais satisfatórios obtidos neste trabalho, e sugerem que o modelo desenhado por Arirachakaram (1989) e Elseth (2001) tem bom embasamento e boa realidade física.

Com exceção do teste 2, os valores de velocidade máxima foram aproximadamente o dobro da velocidade média, semelhante ao escoamento monofásico, porém, isto foi melhor observado quando as interações entre fases foram desligadas, no caso dos testes 3 e 4. Este comportamento não foi previsto, mas foi esperado, já que as características do escoamento bifásico homogêneo se assemelham e compartilham diversas equações com o escoamento de um só fluido.

6 CONCLUSÕES

A necessidade da indústria e do meio científico de compreender escoamentos bifásicos óleo-água tem causado um crescimento no número de trabalhos publicados sobre este tema ao longo das últimas décadas. Neste trabalho foi apresentado os principais estudos e descobertas feitas neste período, bem como a demonstração de um modelo computacional para a simulação de escoamentos óleo-água de caráter laminar. A implementação de um código CFD e outros meio de simulação no geral ajudou muito a indústria e as pesquisas desde que foi utilizado, por se conseguir resultados e respostas de maneira mais rápida e barata, com menos necessidade de aparatos e com aproximações muitas vezes tão perto da situação física real. Entretanto, a consequência que se tem, ao optar pela análise computacional no lugar da experimental está: a dificuldade passa a ser na escolha correta de parâmetros e modelos, que se feita de maneira negligente, pode simplesmente invalidar qualquer resultado encontrado. Ao ser feito a escolha de realizar uma simulação computacional em um programa como ANSYS Fluent, é necessário conduzir um estudo com todas as opções possíveis para seu modelo físico real, para que se aproxime o máximo possível, e para que se utilizem as melhores opção de configuração possível. Todo pacote de um simulador CFD traz ferramentas complexas e que precisam ser estudadas e entendidas antes de sua utilização. Devemos notar aqui a dificuldade por trás da utilização e realização de cada um dos testes aqui feitos.

Escoamentos bifásicos ainda constituem um assunto relativamente novo e há muito a ser descoberto e explorado. A complexidade de suas características físicas, como quantidade de movimento de cada fase, arrasto, velocidade, densidade e outros tornam difícil a padronização e predição de resultados. Nos diversos trabalhos analisados, foram notadas diferentes nomenclaturas e padrões de escoamento encontrados para cada um destes trabalhos. A falta de padronização pode dificultar o entendimento em um momento inicial quando se é introduzido ao assunto. Muitos de seus comportamentos físicos e fenômenos como por exemplo da inversão de fase estar ligada ao aumento da viscosidade, ainda é pouco entendido.

Com tantas variáveis envolvidas, era de se esperar uma dificuldade em encontrar modelos teóricos que possam prever resultados e valores, como temos em escoamentos laminares monofásicos. O modelo teórico de escoamento disperso

homogêneo foi o mais próximo encontrado para comparação de resultados experimentais. A falta de um modelo teórico mais abrangente ou menos específico trouxe dificuldade na comparação de alguns resultados, como o da queda de pressão ao longo do tubo. Os resultados calculados utilizando o modelo teórico se divergiram bastante dos encontrados no ANSYS Fluent, nos testes em que não se pode garantir uma homogeneidade na mistura (testes 1 e 2). Por outro lado, nos testes realizados utilizando um modelo do programa que desconsidera interações entre as fases, pode-se observar uma convergência nos resultados de queda de pressão e velocidade máxima, quando comparados ao modelo da teoria homogênea. Este fato nos leva a acreditar que os modelos teóricos utilizados por Arirachakaram (1989) e Elseth (2001) são satisfatórios desde que aplicados em condições específicas e controladas.

Este estudo foi limitado a escoamentos laminares, tanto monofásico quanto bifásico, sempre procurou-se manter um valor de Reynolds resultante menor que 2000. Isto foi de benefício para simplificar as características físicas do problema, e a análise realizada pelo ANSYS Fluent, sendo que modelos de turbulência são inúmeros e mais complexos, enquanto modelo laminar é singular. Porém, para escoamentos bifásicos, a faixa em que se consegue uma dispersão sem sair da zona laminar é muito estreita. Isto porque para uma fase se enclausurar em bolhas, é necessária uma velocidade mais alta da fase dominante em relação à fase dispersa. Este fator acabou limitando a região em que este trabalho pode operar. Ao se aumentar muito a velocidade de uma das fases, o escoamento passa a ser turbulento. Ao se diminuir a velocidade e mudar a concentração das fases, o escoamento pode sair da zona de dispersão, ou seja, o intervalo de trabalho para estas condições é bem curto e limitado.

Apesar das dificuldades encontradas, o presente trabalho demonstrou a viabilidade do uso de um modelo teórico, de um modelo experimental, e conseguiu resultados satisfatórios comparando-os entre si, e confiantemente contribuindo para o meio científico com mais um estudo e mais um passo na caminhada para a compreensão de escoamentos bifásicos.

REFERÊNCIAS

ANSYS INC ®. **ANSYS Inc. Documentation for Release 15.0:** ANSYS Fluent Getting Started Guide. 2013. Disponível em: <<http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>>. Acesso em: 07 jun. 2016.

ANSYS INC ®. **ANSYS Inc. Documentation for Release 15.0:** ANSYS Fluent Meshing Users Guide. 2013. Disponível em: <<http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>>. Acesso em: 07 jun. 2016.

ANSYS INC ®. **ANSYS Inc. Documentation for Release 15.0:** ANSYS Fluent Theory Guide. 2013. Disponível em: <<http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>>. Acesso em: 07 jun. 2016.

ANSYS INC ®. **ANSYS Inc. Documentation for Release 15.0:** ANSYS Fluent User's Guide. 2013. Disponível em: <<http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>>. Acesso em: 07 jun. 2016.

ARIRACHAKARAN, S. et al. An Analysis of Oil/Water Flow Phenomena in Horizontal Pipes. **Spe Production Operations Symposium**, Tulsa, v. 1, n. 18836, p.155-167, mar. 1989.

BRENNEN, Christopher E. **Fundamentals of Multiphase Flows**. Pasadena: Cambridge University Press, 2005. 410 p.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M.. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3. ed. New York: Mcgraw-Hill, 2014. 1005 p.

CHARLES, M. E.; GOVIER, G. W.; HODGSON, G. W.. The horizontal pipeline flow of equal density oil-water mixtures. **The Canadian Journal Of Chemical Engineering**, [s.l.], v. 39, n. 1, p.27-36, fev. 1961.

ELSETH, Geir. **An Experimental Study of Oil / Water Flow in Horizontal Pipes**. 2001. 270 f. Mechanical Engineering, Department Of Technology, The Norwegian University Of Science And Technology, Porsgrunn, 2001.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introduction to Fluid Mechanics**. 6. ed. Purdue: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 789 p.

PAL, Rajinder. Pipeline flow of unstable and surfactant-stabilized emulsions. **Aiche Journal**, [s.l.], v. 39, n. 11, p.1754-1764, nov. 1993.

POUPLIN, Amélie. **Écoulements liquide-liquide dispersés homogènes en conduite horizontale**: approche locale en milieu concentré. 2009. 217 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ingénierie Mécanique, L'institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 2009.

RODRIGUEZ, Iara Hernandez. **Estudo do Fenômeno de Redução de Atrito em Escoamento Disperso Óleo-Água em Tubulação Horizontal**. 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

RUSSELL, T. W. F. et al. Horizontal pipeline flow of mixtures of oil and water. **The Canadian Journal Of Chemical Engineering**, [s.l.], v. 37, n. 1, p.9-17, fev. 1959.

TRALLERO, J.I.; SARICA, C.; BRILL, J.p.. A Study of Oil-Water Flow Patterns in Horizontal Pipes. **Spe Production & Facilities**, Tulsa, v. 12, n. 03, p.165-172, ago. 1997.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**: The Finite Volume Method. 2. ed. Essex: Pearson Education Limited, 2006. 503 p.

WALVEKAR, Rashmi G. et al. Numerical study of dispersed oil–water turbulent flow in horizontal tube. **Journal Of Petroleum Science And Engineering**, [s.l.], v. 65, n. 3-4, p.123-128, abr. 2009.

WANG, Wei et al. Flow Patterns Transition Law of Oil-Water Two-Phase Flow under a Wide Range of Oil Phase Viscosity Condition. **Journal Of Applied Mathematics**, [s.l.], v. 2013, p.1-8, 2013. Hindawi Publishing Corporation.

XU, Xiao-xuan. Study on oil–water two-phase flow in horizontal pipelines. **Journal Of Petroleum Science And Engineering**, [s.l.], v. 59, n. 1-2, p.43-58, out. 2007.