



**UNIVERSIDADE DE BRÁSILIA
FACULDADE DO GAMA
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**ESTUDO TEÓRICO SOBRE ESCOAMENTO
HORIZONTAL BIFÁSICO**

**Autor: Danyelle Bemfica da Rocha
Orientador: Prof. Dr. Felipe Chagas Storti**

**BRASÍLIA, DF
2020**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
ENGENHARIA DE ENERGIA
FACULDADE DO GAMA - FGA

DANYELLE BEMFICA DA ROCHA

ESTUDO TEÓRICO SOBRE ESCOAMENTO HORIZONTAL BIFÁSICO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação de Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

BRASÍLIA - DF

2020

DANYELLE BEMFICA DA ROCHA

**ESTUDO TEÓRICO SOBRE ESCOAMENTO
HORIZONTAL BIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação de Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Banca examinadora:

Prof. Dr.: Felipe Chagas Storti, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto
Professor Convidado

Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Junior
Professor Convidado

RESUMO

A produção de petróleo em leito marinho, em especial em águas ultra profundas, exige avanço contínuo das tecnologias que envolvem esse processo, de modo a garantir o escoamento com qualidade desde o reservatório até a unidade estacionária de produção (UEP). É fato a intensa presença de escoamento multifásico no processo de produção de petróleo, com isso, de modo a contribuir com o entendimento do comportamento desses escoamentos, foi apresentado passo a passo neste trabalho da construção de uma bancada experimental que simula as linhas de escoamento, uma das etapas na qual o escoamento multifásico de fluidos petróleo transita entre o reservatório e a UEP. No entanto, devido condições impeditivas, a obtenção dos dados experimentais da bancada em questão não foi possível, sendo utilizados dados existentes de bancadas similares disponibilizados pela Unicamp, 2020 e por Storti, 2013. Para análise desses dados, foram utilizados os modelos propostos por Mandhane, 1973 e por Taitel e Dukler, 1976, que analisam o comportamento do escoamento bifásico, o primeiro apresenta um mapa de padrão de escoamento em função das velocidades superficiais das fases, e o segundo uma modelagem matemática que compara a transição entre os padrões de escoamento bifásico. Por fim, através dos modelos citados, foi possível analisar os dados experimentais e refletir e concluir a respeito da sua eficácia para estudo do comportamento do escoamento bifásico, devido à validação das teorias propostas nos modelos com os dados experimentais.

Palavras-Chave: Escoamento multifásico, padrões de escoamento e linhas de escoamento.

ABSTRACT

The production of oil on the seabed, especially in ultra-deep waters, requires continuous advancement of the technologies that involve this process, in order to guarantee the quality flow from the reservoir to the stationary production unit (UEP). It is a fact that there is an intense presence of multiphase flow in the oil production process. Thus, in order to contribute to the understanding of the behavior of these flows, it was presented step by step in the construction of an experimental bench that simulates the flow lines, one of the stages in which the multiphase flow of petroleum fluids transits between the reservoir and the UEP. However, due to impeding conditions, obtaining experimental data from the bench in question was not possible, using existing data from similar benches provided by Unicamp, 2020 and by Storti, 2013. For the analysis of these data, the models proposed by Mandhane were used, 1973 and by Taitel and Dukler, 1976, who analyze the behavior of biphasic flow, the first presents a flow pattern map as a function of the surface velocities of the phases, and the second a mathematical modeling that compares the transition between the flow patterns biphasic. Finally, through the aforementioned models, it was possible to analyze the experimental data and reflect and conclude about its effectiveness for studying the behavior of biphasic flow, due to the validation of the theories proposed in the models with the experimental data.

Key Word: Multiphase flow, flow pattern and flow lines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema submarino de produção de petróleo.....	2
Figura 2: Organograma com as etapas elaboração do trabalho.	6
Figura 3: Evolução do recorde mundial de produção de petróleo	8
Figura 4: Histórico de produção de petróleo.....	9
Figura 5: Deformação de um elemento fluido.....	15
Figura 6: Classificação da mecânica dos fluidos de meios contínuos.....	18
Figura 7: Padrões de escoamento em tubos horizontais	24
Figura 8: Padrão de escoamento para tubos verticais	26
Figura 9: Mapa de padrões de escoamento bifásico horizontal e levemente inclinado segundo Taitel e Dukler, 1976.	28
Figura 10: Mapa de padrões de escoamento bifásico horizontal segundo Taitel e Dukler, 1976.....	28
Figura 11: Fluxo Estratificado em equilíbrio.	30
Figura 12: Balanço de força da fase líquida e gasosa do padrão de escoamento estratificado em equilíbrio.	30
Figura 14: Esquemático de transição do escoamento intermitente-bolhas dispersas para o escoamento anular.....	37
Figura 15: Mapa do padrão de escoamento em tubo horizontal proposto por	44
Figura 16: Gradiente de pressão hipotético de escoamento multifásico	47
Figura 17: Esquema de funcionamento da bancada experimental.....	49
Figura 18: Desenho Técnico do suporte da bancada experimental.	50
Figura 19: Fabricação do suporte da bancada experimental.	51
Figura 20: Desenho Técnico da conexão para tubulação de acrílico.	51
Figura 21: Bicos injetores de ar instalados na conexão da tubulação de acrílico.....	52
Figura 22: Moto Bomba Schneider e Compressor Chiaperini.	53
Figura 23: Suporte do comando elétrico e da bomba.....	54

Figura 23: Reservatório de água.....	54
Figura 24: Medidores de vazão de ar e água.....	55
Figura 25: Curva de potência moto bomba Schneider	57
Figura 26: Curva característica moto bomba Schneider	57
Figura 27: Descrições Técnicas do Compressor.....	58
Figura 28: Descrições técnicas dos medidores de vazão.	59
Figura 29: Circuito experimental.....	60
Figura 30: Desenho geométrico do suporte da tubulação de acrílico.....	63
Figura 31: Perfil de alumínio.....	64
Figura 32: Cantoneira.....	65
Figura 33: Esquemático da bancada experimental da Unicamp.	67
Figura 34: Tubulação do experimento disposto em Storti, 2013.	68
Figura 35: Mapa reproduzido dos padrões de escoamento bifásico ar-água em tubulação horizontal.	71
Figura 36: Resultados ar-água Storti, 2013 para mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973.	74
Figura 38: Comparação dos mapas de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane, 1973 para diferentes misturas.....	75
Figura 39: Resultados ar-glicerina Storti, 2013 para mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973.	76
Figura 40: Resultados Storti, 2013 ar-água para mapa de padrão de escoamento proposto por Taitel e Dukler, 1976.	78
Figura 41: Resultado ar-glicerina Storti, 2013 para mapa de padrão de escoamento proposto por Taitel e Dukler, 1976.	80
Figura 42: Resultados ar-água Unicamp, 2020 segundo o mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973.....	83
Figura 43: Resultado ar-água Unicamp, 2020 segundo o mapa de padrão de escoamento proposto por Taitel e Dukler, 1976.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Autores analisados por Mandhane, 1973.	41
Tabela 2: Parâmetros usados para o escoamento ar-água	43
Tabela 3: Coordenadas para os limites de transições do mapa de padrões de escoamento proposto por Mandhane, 1973.....	45
Tabela 4: Propriedades físicas utilizadas experimentalmente.....	72
Tabela 5: Valores dos parâmetros usados como critério para o sistema ar-água e..	75

LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

LETRAS LATINAS

\dot{m}_L	Vazão mássica do líquido	[kg/s]
\dot{m}_G	Vazão mássica do gás	[kg/s]
\dot{m}	Vazão mássica da mistura	[kg/s]
J_L	Velocidade superficial do líquido	[m/s]
J_G	Velocidade superficial do gás	[m/s]
V_L	Velocidade da fase líquida	[m/s]
V_G	Velocidade da fase gás	[m/s]
Q	Vazão volumétrica da mistura	[m ³ /s]
Q_L	Vazão volumétrica de líquido	[m ³ /s]
Q_G	Vazão volumétrica de gás	[m ³ /s]
A_L	Área da fase líquida	[m ²]
A_G	Área da fase gasosa	[m ²]
A	Área total da tubulação	[m ²]
h_L	Tamanho da fase líquida	[m]
f	Fator de Atrito	[-]
D_h	Diâmetro hidráulico	[m]
F	Força de empuxo	[N]
S	Perímetro Úmido	[m]

LETRAS GREGAS

μ_L	Viscosidade dinâmica do gás	[Pa.s]
μ_G	Viscosidade dinâmica do líquido	[Pa.s]
ρ_L	Massa específica do líquido	[kg/m ³]
ρ_G	Massa específica do gás	[kg/m ³]
σ	Tensão superficial	[mN/m ²]
ε	Rugosidade	[-]
ε_r	Rugosidade Relativa	[-]
τ	Tensão de Cisalhamento	[N/m ²]
α	Ângulo de deformação do fluido	[°]
θ	Ângulo de inclinação da tubulação	[°]

GLOSSÁRIO

Linhas de Escoamento (Flow Lines): São tubulações horizontais estáticas que conduzem os fluidos produzidos pelo poço de petróleo para as unidades de produção.

Risers: tubulação vertical que escoam o fluido do leito marinho até a superfície da plataforma.

Manifold: conjunto de válvulas que direcionam a produção de vários poços para um duto coletor, o qual conduz a produção total para uma unidade de produção.

Árvore de Natal Molhada: conjunto de válvulas operadas remotamente, que controlam o fluxo dos fluidos produzidos ou injetados no poço.

Unidade Estacionária de Produção (UEP): Unidade de superfície que recebe os fluidos retirados do reservatório, na qual basicamente se localizam os controles dos equipamentos instalados no leito submarino ou em poços, da geração de energia e do processamento primário dos fluidos produzidos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	4
1.1.1	Objetivos Específicos	4
1.2	HIPÓTESE	5
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
2	ESTADO DA ARTE	Erro! Indicador não definido.
2.1	PRODUÇÃO DE PETRÓLEO	7
2.2	GARANTIA DE ESCOAMENTO DAS LINHAS DE ESCOAMENTO	9
2.3	ESCOAMENTO MULTIFÁSICO	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	14
3.1.1	Viscosidade	15
3.1.2	Tensão superficial ou interfacial	17
3.1.3	Escoamento laminar e turbulento	17
3.1.5	Escoamento interno	19
3.1.6	Índices	19
3.1.7	Vazão Mássica	19
3.1.8	Vazão Volumétrica	20
3.1.9	Hold-up e Fração a Vazio	20
3.1.10	Velocidade Superficial	21
3.1.11	Velocidade Real	22
3.2	PADRÃO DE ESCOAMENTO.....	23
3.3	MODELO MATEMÁTICO TAITEL E DUKLER, 1976.....	27
3.3.1	Fluxo estratificado em equilíbrio	29
3.3.2	Transição entre o escoamento estratificado e intermitente	35
3.3.3	Transição entre Intermitente ou Bolhas Dispersas para Anular	36

3.3.4	Transição entre os escoamentos estratificado e estratificado ondulado	37
3.3.5	Transição entre o escoamento Intermitente para Bolhas Dispersas	38
3.4	MODELO PROPOSTO POR MANDHANE, 1973	40
3.5	RELAÇÃO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO E O GRADIENTE DE PRESSÃO	46
4	BANCADA EXPERIMENTAL	48
4.1	PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	49
4.1.1	Faixa de vazão dos equipamentos elétricos	56
4.2	MONTAGEM DA BANCADA EXPERIMENTAL	59
4.3	METODOLOGIA DE ENSAIO	61
4.4	DADOS DISPONIBILIZADOS PELA BANCADA EXPERIMENTAL	62
4.5	PROBEMAS E SOLUÇÕES	63
4.5.1	Covid-19	65
4.5.1.1	Condições da bancada experimental da Unicamp	66
4.5.1.2	Condições da bancada experimental Storti, 2013	68
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.1	RESULTADOS STORTI, 2013	72
5.1.1	Análise do modelo proposto por Mandhane, 1973	73
5.1.2	Análise do modelo proposto por Taitel e Dukler, 1976	77
5.2	RESULTADOS UNICAMP	81
5.2.1	Análise do modelo proposto por Mandhane, 1973	82
5.2.2	Análise do modelo proposto por Taitel e Dukler, 1976	83
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
7	BIBLIOGRAFIA	89
	ANEXO I – Dados Experimentais	92
	ANEXO II – Cálculos Experimentais	97
	ANEXO III - Desenhos Técnicos	97

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia proveniente do petróleo é uma realidade até nos dias atuais, apesar do crescimento das fontes renováveis intermitentes, a estabilidade e confiabilidade de geração para suprir a matriz energética independente do clima é um fator imprescindível para a garantia de suprimento de energia e justificativa do grande consumo de petróleo até os dias atuais.

Mesmo que a exploração de reservatórios em águas profundas seja tecnicamente bem-sucedida, o alto custo da produção muitas vezes faz com que tais campos não sejam lucrativos. Como consequência, desde o ano de 1990, muito dos operadores tem se envolvido no desenvolvimento de rentáveis e competitivas tecnologias submarinas para maximizar as taxas de produção, recuperação de reservas e ganhos lucrativos (Vale, 2002).

Nesse contexto de maximizar as taxas de produção no sistema submarino de produção de petróleo, as linhas de escoamento, onde ocorre escoamento horizontal multifásico, será a motivação deste trabalho. Essas linhas possui o objetivo de transitar os escoamentos multifásico retirados dos reservatórios até o início da plataforma, que partir deste momento o fluido será retirado do leito submarino para a superfície das plataformas através dos *risers*, que transita um escoamento multifásico vertical.

Vale destacar que este tipo de escoamento, o escoamento multifásico, é encontrado em diversos lugares, não só na indústria petrolífera, como também na indústria química, indústria nuclear, indústria espacial e outras. Tornando o tema importante para estudo, por estar presente na realidade das engenharias e no sistema de produção de grandes indústrias (Shohan, 2005).

O sistema submarino de produção de petróleo é bastante complexo e ocorre diversas etapas para o fluido ser transferido até a superfície da plataforma de petróleo. Na Figura 1, as linhas de escoamento, o *Manifold* e a árvore de natal molhada são destacadas com o objetivo de representar uma parcela desse sistema.

De modo a contextualizar, a árvore de natal molhada é um conjunto de válvulas operadas remotamente, que controlam o fluxo dos fluidos produzidos ou injetados no poço de petróleo, o *Manifold* é um conjunto de válvulas que servem para direcionar a produção de vários poços de petróleo para um duto coletor, o qual conduz a produção total para a unidade estacionária de produção (UEP) por meio das linhas de escoamento.

Como já ponderado, há expressiva presença de escoamento multifásico no sistema submarino de produção de petróleo, pois, são extraídos dos reservatórios diversos fluidos além do óleo, logo, se torna necessário um estudo do comportamento deste escoamento para uma melhor qualidade da produção, ou seja, uma melhor garantia de escoamento.

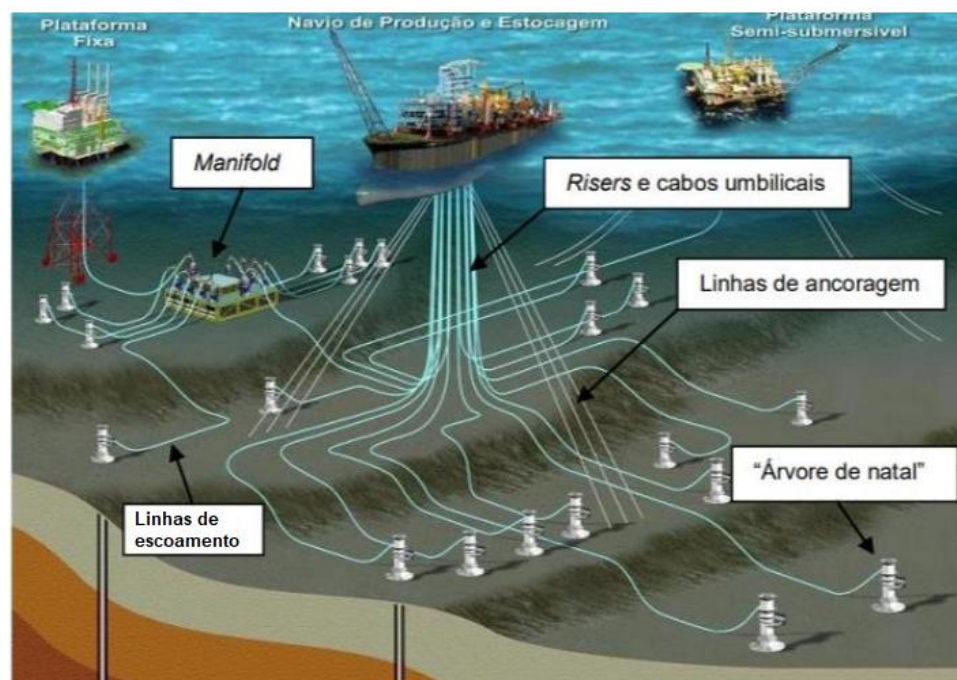


Figura 1: Sistema submarino de produção de petróleo

Fonte – Diário do pré-sal, 2018

No entanto, o comportamento do escoamento multifásico ainda não possui um amplo conhecimento como o comportamento do escoamento monofásico, por sofrer influência das variáveis das diferentes fases envolvidas, o que não ocorre para o escoamento monofásico, pois, possui uma única fase envolvida.

Sendo assim, é necessário um estudo aprofundado e elaboração de modelos matemáticos para o escoamento multifásico, pois, até os dias atuais ainda não se tem um modelo único que analise o comportamento dos escoamentos que possuem mais de uma fase envolvida.

Os cálculos que tratam do escoamento multifásico são complexos devido a fenômenos como deslizamento entre fases, mudança de padrão de escoamento e transferência de massa entre fases. A diferença de velocidades e a geometria das fases fortemente influenciam a queda de pressão e constituem a base para caracterizar o escoamento multifásico (Silva, 2006).

Destaca-se, que quando dois fluidos escoam juntos no interior de uma tubulação, a interface das duas fases pode assumir diferentes configurações de escoamento, compatíveis com a vazão de cada fase, ou seja, no caso de escoamento multifásico existem diferentes padrões de escoamento.

Logo, o estudo do comportamento dos padrões de escoamento foi realizado por diversos autores, tais como Taitel e Dukler, 1976 e Mandhane, 1973. O método tradicional de identificação dos padrões de escoamento é a observação do comportamento do escoamento através de um tubo transparente, com a variação da velocidade dos fluidos envolventes.

Mandhane, 1973 observou diferentes estudos de mapas de padrões de escoamento horizontal multifásico proposto por diferentes autores, no qual baseou para a elaboração do seu próprio mapa, após verificar que certas melhorias poderiam ser realizadas propôs o seu próprio modelo para o estudo do escoamento multifásico e apresentou um mapa de padrão de escoamento.

Taitel e Dukler, 1976, propuseram uma modelagem matemática para a transição dos padrões de escoamento, além disso, com base na sua modelagem também foi proposto um mapa de padrão de escoamento.

Diante ao exposto, será realizado o planejamento e a construção de uma bancada experimental que simula o escoamento bifásico e horizontal que ocorre nas linhas de escoamento do sistema submarino de produção de petróleo.

Com a variação da velocidade superficial das fases envolvidas no escoamento bifásico horizontal que transita na bancada experimental, será possível analisar o comportamento do escoamento em função da mudança dos padrões de escoamento.

No entanto, a obtenção dos dados da bancada proposta não foi possível devido a pandemia do Covid-19, portanto, para análise serão utilizados dados de bancadas similares fornecidos pela Universidade de Campinas (Unicamp) e pelo Professor Felipe Chagas Storti.

A modelagem matemática proposta por Taitel e Dukler, 1976 e o mapa de padrão de escoamento horizontal proposto por Mandhane, 1973 serão utilizados para realizar as análises comparativas entre a prática e a teoria.

Por fim, podemos destacar que a aplicação na indústria petrolífera, será o foco deste trabalho, em especial o escoamento multifásico que transitam nas linhas de escoamento, apresentadas na Figura 1. A motivação para tal estudo é a melhoria no desempenho do sistema de produção de petróleo *offshore*, sendo um dos principais fatores para manter os produtos da produção dentro das especificações de qualidade, além da segurança, proteção e garantia de escoamento ao sistema.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem por objetivo geral realizar um estudo experimental e teórico acerca do escoamento bifásico e horizontal, assim como da transição dos padrões de escoamento nesta característica, visando conhecer com mais especificidade a influência da velocidade superficial de cada fluido nas características dos padrões de escoamento.

1.1.1 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Planejar e construir uma bancada de testes;
- Analisar dados experimentais com vistas aos mapas de padrão de escoamento propostos por Mandhane, 1973 e Taitel e Dukler, 1976; e

- Analisar dados experimentais com base na modelagem matemática proposta por Taitel e Dukler, 1976.

1.2 HIPÓTESE

Os escoamentos bifásicos e multifásicos possuem comportamento distintos de um escoamento com característica monofásica, onde se tem na literatura uma boa descrição do seu comportamento e equacionamento.

A hipótese a ser verificada neste estudo é que o comportamento do escoamento multifásico varia dependendo dos fluidos envolvidos, local em que ocorre e principalmente das velocidades superficiais dos fluidos envolvidos, podendo gerar padrões de escoamento diferentes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em mais cinco capítulos. No capítulo 2, é apresentado uma revisão bibliografia sobre a produção de petróleo, garantia de escoamento nas linhas de escoamento e uma breve explicação sobre o escoamento multifásico no sistema submarino de produção de petróleo. No capítulo 3, é descrito fundamentos teóricos que estão diretamente relacionados com este trabalho, como a modelagem para escoamento multifásico proposta por Taitel e Dukler, 1976, descrição dos tipos de padrão de escoamento, é apresentado o mapa de padrão de escoamento proposto pelo Mandhane, 1973, e por fim é apresentado a influência dos padrões de escoamento no gradiente de pressão. No Capítulo 4, é descrito como foram realizados o planejamento e a operação da bancada experimental para o estudo dos padrões de escoamento horizontal bifásico, como foi realizada construção da bancada, como é a metodologia de ensaio e, por fim, é disposto os problemas enfrentados durante este período. No capítulo 5, devido a pandemia, os resultados analisados serão com base nos dados experimentais obtidos por Storti, 2013 e pela bancada experimental coordenada pelo professor Marcelo Castro da Unicamp. Por fim, no capítulo 6, será apresentado as considerações finais deste trabalho.

A ordem de elaboração dos referidos capítulos deste trabalho foram as dispostas no organograma a seguir.

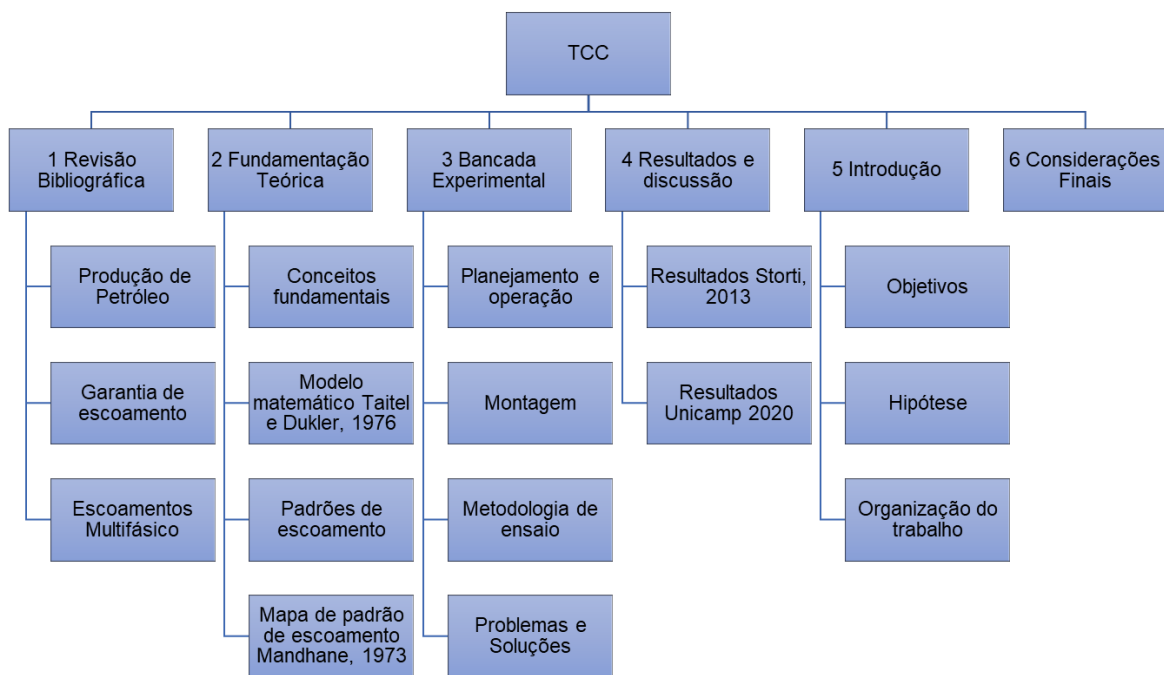


Figura 2: Organograma com as etapas elaboração do trabalho.

2. ESTADO DA ARTE

Uma breve revisão sobre os conceitos teóricos existentes e necessários para o desenvolvimento deste trabalho será apresentada neste capítulo. Inicialmente é disposto como ocorre a produção de petróleo desde o reservatório até a unidade estacionária de produção, em seguida é mostrado a importância da garantia de escoamento dentro de um sistema submarino de produção de petróleo, especificamente nas linhas de escoamento, por último é feita uma explicação a respeito do escoamento multifásico, pois, é o tipo de escoamento presente em algumas etapas da produção de petróleo submarina e seu comportamento pode influenciar na eficiência dos equipamentos que compõe esse sistema e na garantia e qualidade de escoamento.

2.1 PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Com o aumento do consumo de energia mundial, desde 1950, os combustíveis fósseis possuem grande representatividade na matriz energética global por gerar segurança, apesar das consideráveis iniciativas e invenções na área de recursos energéticos renováveis, e aumento da participação na matriz energética mundial, essas fontes não podem garantir suprimento por possuírem características intermitentes.

O petróleo é um óleo de origem fóssil que leva milhões de anos para ser formado nas rochas sedimentares, em áreas marítimas e terrestres. Da descoberta dos campos até a transformação em produto, o petróleo percorre uma longa jornada, que envolve muito estudo e investimento.

Com a redução das reservas localizadas em terra e em águas rasas, a exploração e a produção de petróleo em águas profundas tornaram-se um desafio para a indústria. No caso do Brasil, a produção em águas profundas teve de ser enfrentada rapidamente, uma vez que era a única alternativa para alcançar os níveis de produção desejados e atender ao ritmo de desenvolvimento dos campos de petróleo.

Foi a partir de 1953, ano no qual foi instituído o monopólio estatal do petróleo com a criação da Petrobras, que deu partida decisiva nas pesquisas relacionadas ao petróleo brasileiro. A produção de petróleo cresceu de 750 m³/dia na época da criação da Petrobras, para mais de 182.000 m³/dia no final dos anos 1990, graças aos contínuos avanços tecnológicos de perfuração e produção na plataforma continental. A Figura 3 ilustra os sucessivos recordes mundiais de produção marítima de petróleo (Petrobras, 2012).

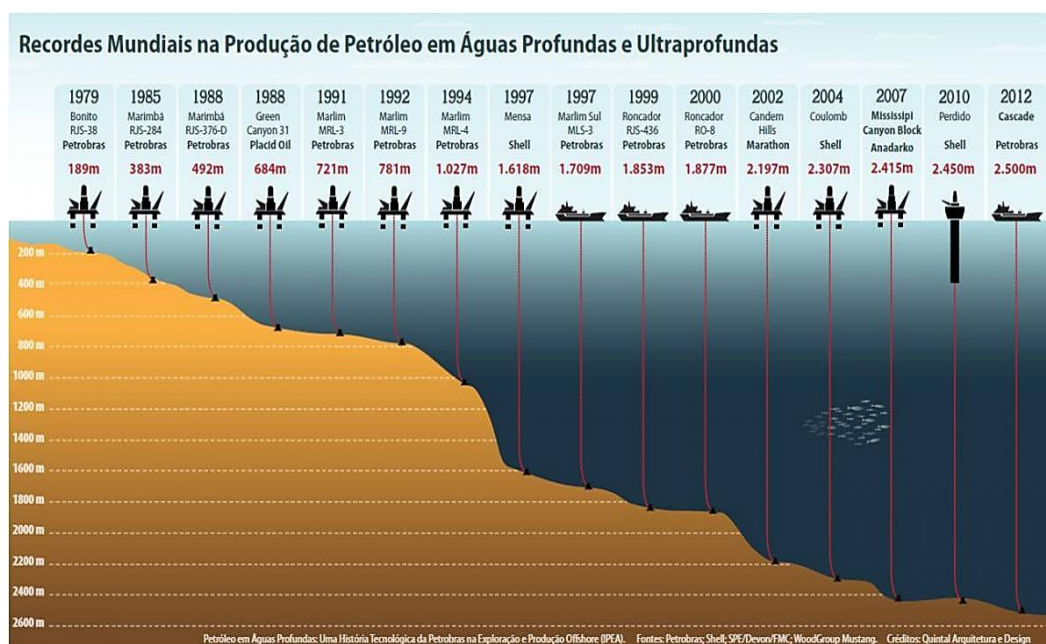


Figura 3: Evolução do recorde mundial de produção de petróleo

Fonte: Petrobras, 2012.

A evolução do recorde mundial, apresentada na Figura 3, é comprovada pela constante evolução de técnicas e materiais na busca de reservas de petróleo em águas profundas, ou seja, a tecnologia submarina aplicada na produção em grandes profundidades marítimas de petróleo e gás, é um campo de aplicação altamente especializado que estabelece demandas específicas de engenharia e exige uma contínua expansão e também o desenvolvimento de novas tecnologias que torne esse processo de produção economicamente viável.

Na Figura 4, mostra um histórico de produção de petróleo no Brasil no período de fevereiro de 2018 a fevereiro de 2019, onde em azul representa a quantidade de

óleo extraído dos poços brasileiros e em verde a quantidade de gás extraído, podendo observar a proporcionalidade entre os dois fluidos retirados dos reservatórios.

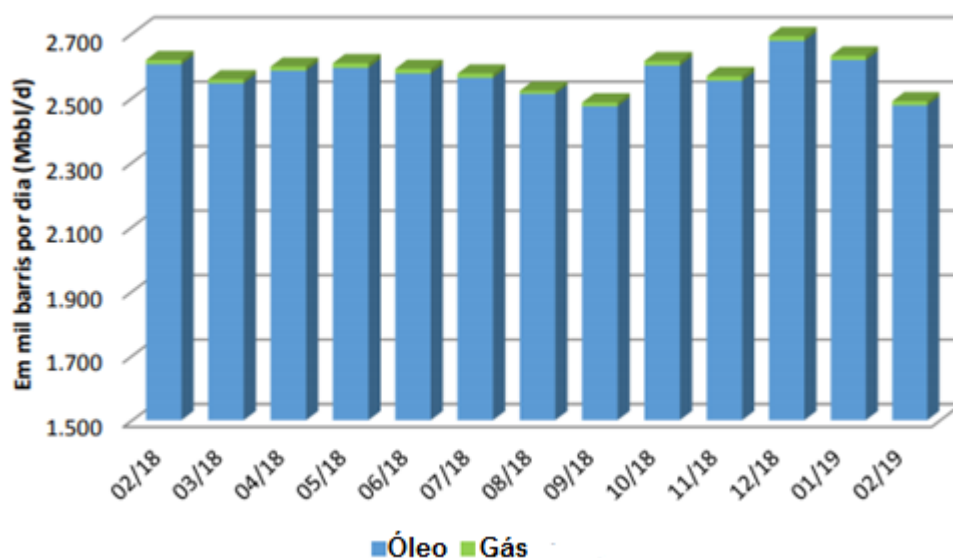


Figura 4: Histórico de produção de petróleo.

Fonte: ANP, 2019.

Neste contexto, da expressiva representatividade do petróleo na produção de energética mundial e brasileira, uma das soluções propostas é o contínuo desenvolvimento da tecnologia do sistema submarino de produção, com intuito de melhorar a exploração e extração dos fluidos de petróleo em águas ultra profundas. No âmbito do sistema submarino de produção de petróleo, o foco deste trabalho será o escoamento horizontal multifásico presente nas linhas de escoamento, que será apresentada do próximo tópico, com o objetivo de melhorar garantia de escoamento na UEP.

2.2 GARANTIA DE ESCOAMENTO DAS LINHAS DE ESCOAMENTO

Em geral, os sistemas submarinos de produção de petróleo estão dispostos como mostrado na Figura 1. O sistema submarino é uma forma eficiente de aumento de produção de petróleo e gás em áreas desafiadoras ou em águas ultra profundas, sendo o objetivo do desenvolvimento do campo submarino, a maximização do ganho

econômico com segurança, utilizando a solução mais confiável, segura e de melhor custo benefício disponível no momento.

A garantia de escoamento é um processo de análise de engenharia usado para assegurar que o petróleo seja economicamente transportado desde o reservatório até o usuário final, em diversos ambientes ao longo da vida de um projeto. Para a melhor garantia de escoamento, o conhecimento sobre as propriedades dos fluidos e análises termo hidráulicas de um sistema são utilizadas para desenvolver estratégias para garantir um melhor escoamento no usuário final (Young, 2015).

O termo garantia de escoamento foi usado pela primeira vez pela Petrobras, no início dos anos 1990, e, originalmente, referia-se apenas às questões termo hidráulicas e químicas encontradas durante a produção de petróleo e gás. Embora o termo seja relativamente novo, os problemas relacionados com a garantia de escoamento tem sido um problema crítico na indústria de petróleo desde o princípio.

Nos últimos anos, a garantia de escoamento tem se tornado mais desafiadora no desenvolvimento de sistemas submarinos, pois envolve interligações de longa distância e águas ultra profundas. Os desafios incluem uma combinação de baixa temperatura, alta pressão hidrostática para águas ultra profundas e razões econômicas para longos deslocamentos.

Portanto, a análise de garantia de escoamento é uma parte crítica reconhecida do projeto e operação de sistemas submarinos de óleo e gás. Sendo que os desafios concentram-se principalmente na prevenção e controle de depósitos sólidos que poderiam bloquear o fluxo da produção. Em conjunto com o fluido de hidrocarboneto, estes sólidos aparecem em certas combinações de temperatura e pressão e na forma de depósitos sobre as paredes dos equipamentos de produção e nas linhas de escoamento (Young, 2015).

As linhas de escoamento são trechos estáticos dentro do sistema submarino de produção de petróleo, mostrado na Figura 1, que podem ser rígidas ou flexíveis, apoiadas no leito marinho, que interliga a Árvore de Natal Molhada de um poço ou *Manifold* até a UEP, permitindo assim a condução dos fluidos produzidos nos poços de petróleo até a superfície da UEP, através dos *risers* que transitam o escoamento verticalmente.

Levando em consideração a realidade crítica da necessidade de uma melhor garantia de escoamento e tendo o foco nas linhas de escoamento do sistema submarino, neste trabalho será proposto uma bancada experimental para estudar o escoamento horizontal multifásico no âmbito das linhas de escoamento, que devido as características multifásica desse escoamento, possuem diferentes padrões, em função especialmente das velocidades superficiais das fases constituintes, o que pode influenciar diretamente na eficiência dos equipamentos constituintes do sistema submarino de produção de petróleo, bem como na qualidade e garantia do fluido que chega até a UEP.

2.3 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

Os fluidos oriundos do reservatório de petróleo são compostos por mistura de hidrocarbonetos, podendo ainda conter água e sedimentos. As condições termodinâmicas do escoamento desde o meio poroso até a unidade de produção favorecem a liberação dos componentes leves da mistura, formando fase de gás ao longo do sistema de escoamento. O escoamento de petróleo em tubulações é formado pelas correntes de óleo vivo, gás livre, água, emulsão e sedimentos. Assim, a modelagem do escoamento de petróleo é de uma forma mais geral, multifásica. Os sedimentos presentes no escoamento, embora impliquem sérios problemas operacionais para modelagem do escoamento multifásico normalmente, não possuem importância relevante e são desconsiderados (Andreolli, 2016).

No caso particular em que os fluidos são constituídos apenas de óleo e gás, o escoamento seria ou monofásico ou bifásico. Mesmo quando há presença de água é comum se adotar que as velocidades da água e do óleo são iguais e as duas correntes são tratadas como fase líquida transformando o equacionamento num problema bifásico.

Além disso, dentro do sistema marítimo de produção, o escoamento multifásico pode ocorrer em trechos verticais, inclinados ou horizontais, e alguns métodos tiveram que ser desenvolvidos a fim de entender o comportamento desse escoamento durante

seu percurso nas tubulações, e permitir a determinação da queda de pressão e seu comportamento ao longo da tubulação com qualquer ângulo de inclinação.

As modelagens matemáticas para escoamento multifásico são complexas devido o deslizamento entre fases, as mudanças de padrão de escoamento e a transferência de massa entre fases, com isso modelagens foram desenvolvidas no intuito de estabelecer uma metodologia confiável para a aplicabilidade na prática de sistemas que utilizam esse tipo de escoamento.

Logo, quando se possui a presença de escoamento multifásico formado por fluidos nas fases gasosa e líquida, os fluidos podem escoar de forma bem definida, ou então, apresentar uma distribuição qualquer. O termo padrão de escoamento se refere à distribuição das fases assumida pelo escoamento multifásico, ou seja, diferentes padrões de escoamento são formados devido aos diversos fatores que governam o este tipo de escoamento, tais como:

- Velocidade superficial do gás e do líquido e velocidades das fases;
- Parâmetros geométricos: inclinação da tubulação, diâmetro, rugosidade, singularidade;
- Propriedades dos fluidos: viscosidade, densidade e tensão superficial das fases; e
- Pressão e temperaturas do escoamento.

Na modelagem do escoamento multifásico em que o modelo selecionado utiliza informações do padrão de escoamento, torna-se necessária a determinação do padrão em que o escoamento ocorre em cada seção. Em geral, utilizam-se mapas que estimam o padrão de escoamento em função de variáveis ou grupos adimensionais. Esses mapas estão disponíveis na literatura e são construídos através de observações diretas e medições das variáveis do escoamento em experimentos. Define os valores em planos bidimensionais determinando-se os contornos de acordo com o observado em experimentos. Alguns padrões encontrados na literatura foram disponibilizados em gráficos que possuem diferentes sistemas de coordenadas, porém, muitos sem base física, e as vezes adimensionais. Nesses casos, devem-se

utilizar esses padrões apenas para condições de escoamento similares as que foram obtidas experimentalmente (Andreolli, 2016).

De uma forma geral, os mapas de padrões de escoamento apresentam nos eixos as velocidades superficiais do gás e do líquido multiplicadas por algum parâmetro estipulado pelo autor, e se compararmos mapas de diferentes autores serão observadas diferenças notáveis ficando evidente as incertezas existentes nesses estudos relacionados aos escoamentos com presença de mais de uma fase.

Por fim, neste trabalho será utilizado para análise e comparação com os resultados obtidos experimentalmente, o mapa de padrão de escoamento bifásico ar-água proposto por Mandhane, 1973, e quanto a modelagem matemática, será analisado o modelo para escoamento bifásico proposto por Taital e Dukler, 1976.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A modelagem matemática para escoamento bifásico que será utilizada neste trabalho, proposta por Taitel e Dukler, 1976, será apresentada neste capítulo com o objetivo de ser aplicada nos dados obtidos experimentalmente comparando o que é disposto na teoria com o que acontece na prática. Primeiramente é disposto conceitos fundamentais que serão utilizados nos modelos apresentados neste capítulo, em seguida a modelagem matemática citada. De modo a contextualizar, é apresentado os tipos de padrões de escoamento tanto para tubulações horizontais como para verticais, para em seguida apresentar o modelo proposto por Mandhane, 1973, que dispõe o mapa de padrão de escoamento bifásico horizontal. Por fim, é discutido a influência dos padrões de escoamento no gradiente de pressão.

3.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O equacionamento do escoamento multifásico é caracterizado por um grande número de variáveis, quase o dobro do fluxo monofásico. Além disso, a configuração é bastante complexa e seu comportamento ainda não possui um amplo conhecimento. As soluções podem ter abordagens empíricas, soluções exatas e simulações numéricas, podendo ser muito complicadas ou impraticáveis dependendo da quantidade de fases que o escoamento possui e o estado que as fases se encontram. Um grande número de variáveis leva a muitos grupos adimensionais quando a análise dimensional é aplicada. A natureza complexa se origina de motivos variados, sendo eles:

- A presença de mais de uma fase no escoamento, exigindo um número adicional de equações para o fechamento dos modelos matemáticos que expressam o fenômeno físico;
- No escoamento multifásico geralmente há uma distribuição espacial das fases, tornando-se um fenômeno de difícil quantificação. Em muitos casos a interface gás-líquido que separa as fases tem forma complicada, além de apresentar movimento aleatório;

- Há mudanças de padrões de escoamento, que dependem de características físicas e operacionais do sistema; e
- Há grande influência uma das fases do escoamento na outra, o que mostra que as variáveis locais de cada fase, como a velocidade, a pressão etc., podem flutuar no tempo com amplitude considerável.

A modelagem do escoamento de duas ou mais fases é uma aproximação dos resultados de experimentos e soluções exatas das equações de conservação com as condições de fronteira apropriadas. Podendo assim obter mais de um modelo, ou seja, quanto mais próximo o modelo físico estiver do fenômeno real, melhor é o modelo matemático e suas previsões (Shohan, 2005).

A seguir será apresentado as principais propriedades físicas, conceitos fundamentais que serão utilizados e a modelagem matemática para escoamento bifásico proposta pelos autores Taitel e Dukler, 1976, que se origina dos equacionamentos para escoamento monofásico, adaptando para o escoamento multifásico.

3.1.1 Viscosidade

A origem das tensões de um fluido, é proveniente das tensões de cisalhamento, que aparecem devido ao escoamento viscoso. Para um fluido em repouso, não existirá tensão de cisalhamento.

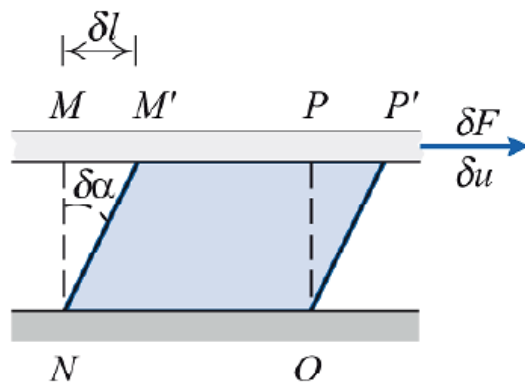


Figura 5: Deformação de um elemento fluido.

Fonte: Fox, 2014.

Considerando o comportamento de um fluido entre duas placas infinitas, conforme mostra a Figura 5, a placa superior move-se a velocidade constante δV , sob influência de uma força constante aplicada, δF , a tensão de cisalhamento, τ_{xy} , aplicada ao elemento fluido é dada por:

$$\tau_{xy} = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\delta F}{\delta Ay} = \frac{dF}{dAy} \quad \text{Equação 1}$$

Onde, δAy , é a área de contato do elemento fluido com a placa e δF , é a força exercida pela placa sobre aquele elemento. O fluido se deforma continuamente em resposta a uma tensão de cisalhamento, ou seja, é um elemento fluido viscoso (Fox, 2014).

Durante o intervalo de tempo δt , a taxa de deformação do fluido é dada por:

$$\text{Taxa de deformação} = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy} \quad \text{Equação 2}$$

Dessa forma, quando submetido à tensão de cisalhamento, o elemento fluido experimenta uma taxa de deformação. Os fluidos para os quais a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação são fluidos newtonianos, ou seja, possuem viscosidade constante. A expressão não newtoniana é empregada para classificar todos os fluidos em que a tensão cisalhante não é diretamente proporcional à taxa de deformação (Fox, 2014).

A aplicação desta teoria na prática experimental deste trabalho é referente aos diferentes valores de viscosidades (μ) dos fluidos que serão submetidos aos testes.

Para comparação ao que acontece nas linhas de escoamento na produção submarina de petróleo, os fluidos utilizados no experimento serão todos fluidos newtonianos, e para aplicabilidade real no que acontece na produção de petróleo, basta considerar as propriedades físicas do hidrocarboneto, tais como, viscosidade, massa específica e tensão superficial.

3.1.2 Tensão superficial ou interfacial

Outra propriedade física que vai influenciar no comportamento do escoamento bifásico que será submetido aos testes, é a tensão superficial (σ). Sempre que um líquido está em contato com outros líquidos ou gases, ou com uma superfície gás/líquido, como no caso experimental deste trabalho, uma interface se desenvolve agindo como uma membrana elástica esticada e criando uma tensão superficial. Esta membrana exibe duas características: o ângulo de contato e o módulo da tensão superficial (Fox, 2014).

Dessa forma, essa propriedade pode influenciar os comportamentos da interação entre os fluidos no escoamento no qual serão submetidos, consequentemente influenciando os padrões de escoamento em determinada faixa de velocidade superficial e na perda de carga. Porém, segundo Andreolli, 2016, a influência dessa tensão no escoamento multifásico ainda é pouco conhecida, dependendo das particularidades do experimento de cada autor com o que se compara, para assim poder estimar comportamentos paralelos.

3.1.3 Escoamento laminar e turbulento

Um escoamento viscoso, como mostra a Figura 6, pode ser laminar ou turbulento, respectivamente. Um escoamento laminar é aquele em que as partículas fluidas se movem em camadas lisas ou lâminas, um escoamento turbulento é aquele em que as partículas fluidas rapidamente se misturam enquanto se movimentam ao longo do escoamento devido a flutuação aleatórias no campo tridimensional de velocidades (Fox, 2014).

A velocidade do escoamento laminar é simplesmente em uma direção, enquanto a velocidade do escoamento turbulento é composta pela velocidade média mais três componentes de flutuação aleatória de velocidade. Nos experimentos apresentados neste trabalho, o escoamento bifásico poderá ser submetido aos dois tipos, laminar e turbulento, a depender da velocidade e comportamento dos fluidos.

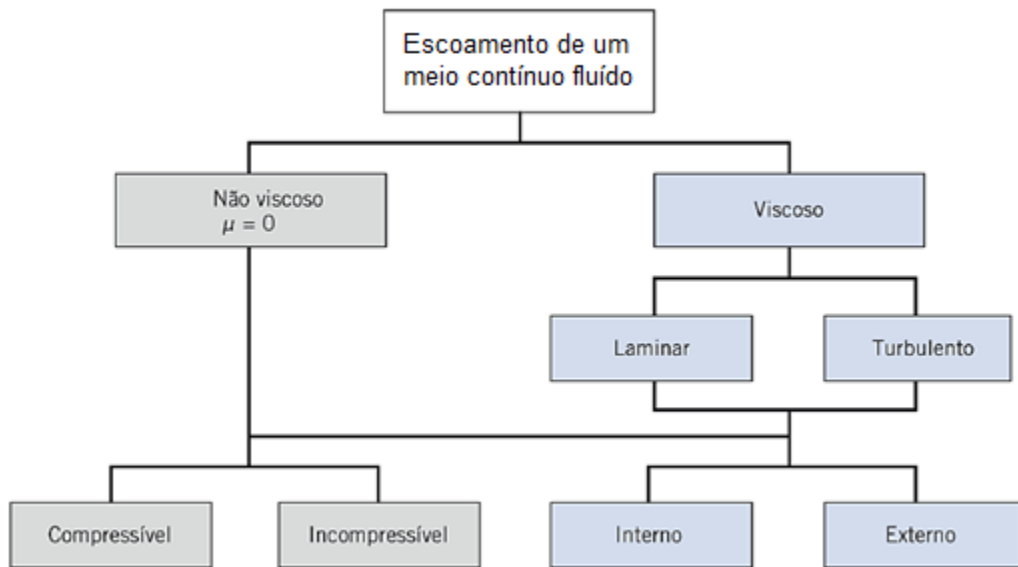


Figura 6: Classificação do escoamento de um meio contínuo fluido.

Fonte: Fox, 2014 – adaptado.

Por meio de um clássico experimento em 1883, Osborne Reynolds determinou o clássico grupo adimensional denominado número de Reynolds. Esse parâmetro pode ser definido como uma relação entre forças inerciais e forças viscosas de cada fluido, como pode ser observado na Equação 3.

$$Re = \frac{\rho \cdot V_m \cdot D}{\mu} \quad \text{Equação 3}$$

Onde D é o diâmetro interno da tubulação, V_m a velocidade média dos fluidos, ρ a massa específica dos fluidos e μ é a viscosidade dinâmica dos fluidos.

O número de Reynolds classifica o escoamento em regime laminar, turbulento ou transicional. Para este trabalho será considerado que a transição entre o regime laminar e turbulento está na faixa $2000 < Re < 4000$.

Segundo Fox, 2014 não há um valor único do número de Reynolds para o qual ocorre a transição de escoamento laminar para turbulento em uma camada-limite. Entre os fatores que afetam a transição estão o gradiente de pressão, a rugosidade superficial, a transferência de calor, as forças de campo e as perturbações da corrente livre.

3.1.5 Escoamento interno

Escoamentos completamente envoltos por superfícies sólidas são chamados de escoamentos internos ou em dutos. Este tipo de escoamento pode ser laminar ou turbulento, compressível ou incompressível, e será o tipo de escoamento operado na bancada experimental que simula o que ocorre nas linhas de escoamento na produção submarina de petróleo (Fox, 2014).

3.1.6 Índices

Os índices utilizados nas variáveis para escoamento multifásico são relacionados com a fase na qual a variável se refere. No caso deste trabalho, quando for utilizado L se refere a fase líquida e quando for utilizado G se refere a fase gasosa.

3.1.7 Vazão Mássica

É a quantidade de massa de um fluido que escoar através do tubo em um intervalo de tempo considerado. A unidade considerada é kg/s (Shohan, 2005).

$$\dot{m} = \rho VA \quad \text{Equação 4}$$

$$\dot{m}_L = \text{Vazão mássica fase líquida}$$

$$\dot{m}_G = \text{Vazão mássica fase gasosa}$$

$$\dot{m} = \dot{m}_L + \dot{m}_G = \text{Vazão mássica total} \quad \text{Equação 5}$$

3.1.8 Vazão Volumétrica

É a quantidade de volume que escoar através do tubo em um intervalo de tempo considerado. A unidade considerada é m^3/s (Shohan, 2005).

$$\dot{Q} = VA \quad \text{Equação 6}$$

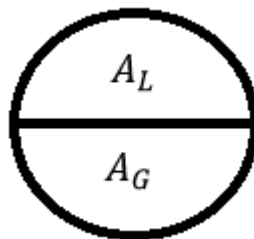
$$\begin{aligned} \dot{Q}_L &= \text{Vazão volumétrica fase líquida} \\ \dot{Q}_G &= \text{Vazão volumétrica fase gasosa} \\ \dot{Q} &= \dot{Q}_L + \dot{Q}_G = \text{Vazão volumétrica total} \end{aligned}$$

Equação 7

3.1.9 Holdup e Fração a Vazio

No interior de uma tubulação em que transita o escoamento multifásico, cada fase ocupa uma fração da área total da seção. Como característica desse escoamento, as fases interagem entre si, criando topologias de escoamento.

O Holdup representa uma dessas topologias, sendo a fração de volume ocupada pela fase líquida em relação ao volume total da seção. De forma análoga, o mesmo entendimento pode ser dado à fração de vazio, ou seja, fração de volume ocupada pela fase gasosa em relação ao volume total da seção (Shohan, 2005).



Considerando o esquemático acima onde A_L é a área da fase líquida, A_G é a área da fase gasosa e A_t é a área total da seção.

Hold-up líquido $H = \frac{A_L}{A_t}$ (fase líquida) Equação 8

Fração de vazios $G = \frac{A_G}{A_t}$ (fase gasosa) Equação 9

$$H + G = 1 \quad \text{Equação 10}$$

A determinação do *holdup* é de fundamental importância para as análises de escoamento multifásicos. A determinação dessa variável é o primeiro passo para o cálculo de propriedades médias da mistura, tais como viscosidade, massa específica e entalpia. Na prática não é uma tarefa fácil a determinação do *holdup*. Utilizam-se correlações empíricas para sua estimativa e informações do arranjo de fases ao longo do escoamento (padrões de escoamento).

3.1.10 Velocidade Superficial

A Velocidade Superficial é conceituada como aquela que uma fase, em particular, exibiria caso escoasse sozinha na seção transversal da tubulação (Shohan, 2005).

$$v_{SL} = J_L = \frac{Q_L}{A_t} \quad \text{Equação 11}$$

$$v_{SG} = J_G = \frac{Q_G}{A_t} \quad \text{Equação 12}$$

$$\text{Mistura: } J = J_L + J_G \quad \text{Equação 13}$$

$$\text{Combinada: } \frac{J_L}{J_G} = \frac{Q_L}{Q_G} \quad \text{Equação 14}$$

3.1.11 Velocidade Real

É a velocidade exibida por cada fase em um escoamento multifásico. Como cada fase ocupa uma área de seção diferente da área total do tubo, a velocidade real é diferente da velocidade de superfície (Shohan, 2005).

$$V_L = \frac{Q_L}{A_L} \quad \text{Equação 15}$$

$$V_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad \text{Equação 16}$$

Observando as equações de velocidade superficial e velocidade real, podemos concluir que $V_k \geq J_k$, visto $\varepsilon \leq 1$.

$$J = J_L + J_G = V_L \cdot \varepsilon_L + V_G \cdot \varepsilon_G \quad \text{Equação 17}$$

3.2 PADRÃO DE ESCOAMENTO

Uma breve revisão dos diferentes tipos de padrão de escoamento em tubos horizontais e verticais é necessária para o entendimento do modelo proposto pelo Mandhane, 1973 e da modelagem proposta por Taitel e Dukler, 1976 que serão a base para o desenvolvimento deste trabalho. Com isso, será possível identificar experimentalmente na bancada qual tipo de padrão de escoamento se obteve com a variação da velocidade superficial das fases do escoamento, podendo assim validar a prática com a teoria.

A diferença fundamental entre escoamento monofásico e escoamento bifásico gás-líquido é a existência de padrões de escoamento ou regimes de escoamento em escoamentos bifásicos (Shohan, 2005).

Quando um gás e um líquido escoam simultaneamente em uma tubulação, as fases se distribuem em configurações particulares, isto é, há uma distribuição topográfica das fases na mistura bifásica, comumente chamados de padrões de escoamento.

Esta distribuição topográfica das fases depende de características do sistema de transporte de fluidos, de variáveis operacionais e de propriedades físicas das substâncias que compõem a mistura de duas ou mais fases.

Em tubos horizontais e inclinados, os padrões de escoamento adotam formas mais complexas do que em tubos verticais devido à assimetria causada pela ação da

gravidade que, neste caso, atua de forma transversal ao duto. Os padrões mais comuns, para escoamento multifásico horizontal, segundo Shoham, 2005 são:

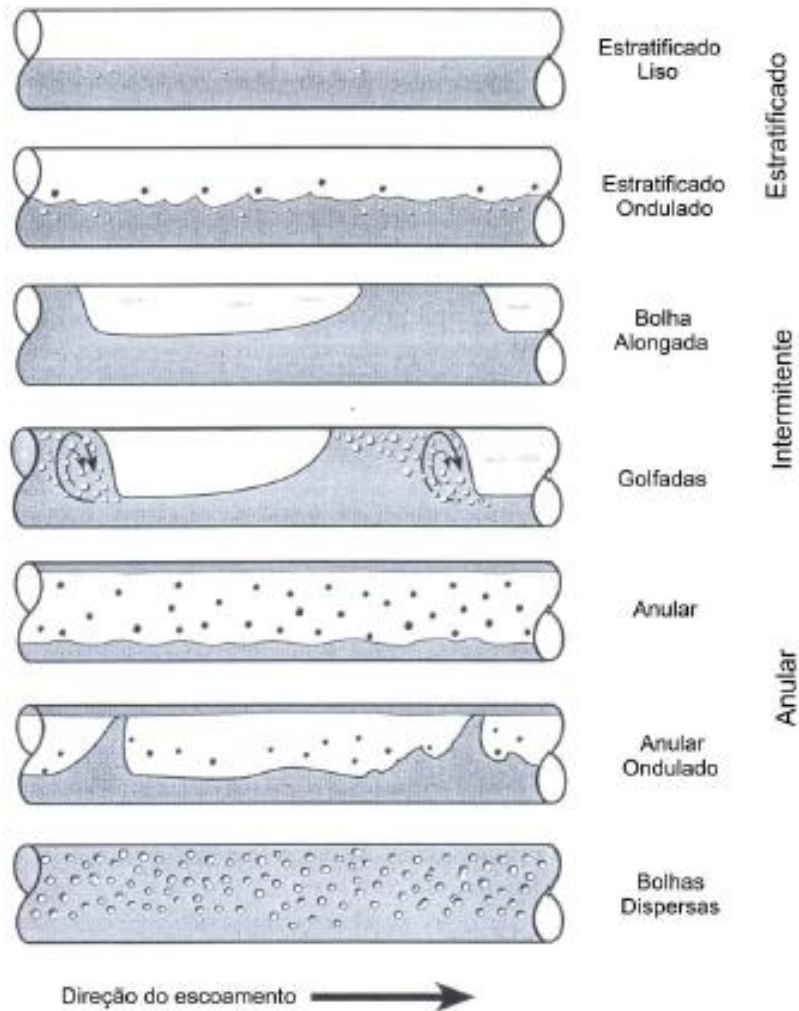


Figura 7: Padrões de escoamento em tubos horizontais

Fonte: adaptado de Shoham, 2005.

Os padrões de escoamento existentes em tubo horizontal são classificados em Escoamento Estratificado (Estratificado Liso e Estratificado Ondulado), Intermitente, Anular e Bolhas Dispersas. As definições e os aspectos de cada classificação do escoamento para tubo horizontal são apresentados abaixo:

- *Escoamento Estratificado*: tem uma forte tendência em ocorrer em escoamento horizontal e em declive com velocidades superficiais de gás e líquido baixas. As duas fases são separadas por gravidade, onde a fase líquida escoar na parte inferior do tubo e a fase gasosa escoar na parte superior do tubo. Esse tipo de escoamento é subdividido em Estratificado Liso, onde a interface gás-líquido é lisa e em Estratificado Ondulado, na qual são formadas ondas instáveis na interface, por consequência de uma velocidade maior da fase gasosa.
- *Escoamento Intermitente*: caracteriza-se pela alternância do escoamento do líquido e do gás. Pistões de líquido que ocupam todo o diâmetro do tubo são separados por bolhas de gás, que se movem sobre um filme de líquido presente na parte inferior do tubo. O escoamento de bolhas alongadas é regido pelos mesmos mecanismos de padrão intermitente, porém com uma velocidade superficial de gás um pouco menor. No padrão golfadas, as vazões de gás são mais elevadas, aerando o líquido por pequenas bolhas dispersas na parte superior do pistão.
- *Escoamento Anular*: ocorre para elevadas velocidades superficiais de gás. A fase gasosa concentra-se na parte central enquanto a fase líquida escoar em forma de filme na parede do tubo. A interface entre o filme de líquido e o núcleo de gás é dinâmica, apresentando um perfil ondulatório, provocando altas tensões de cisalhamento. Pode ser anular ou anular ondulado com mais ondulação na interface.
- *Bolhas Dispersas*: ocorre para velocidades superficiais muito altas de líquidos, a fase gasosa é distribuída na forma de bolhas discretas no interior de uma fase líquida contínua, com a tendência de aglomerarem-se na parte superior da tubulação devido aos efeitos gravitacionais. Um ponto importante nesse padrão é que as fases se movem na mesma velocidade e o escoamento é considerado homogêneo, ou seja, sem escorregamento.

Os padrões de escoamento que ocorrem na direção vertical ascendente são semelhantes aos que ocorrem na horizontal, porém os padrões de escoamento na vertical são simétricos na parede interna do tubo e menos influenciados pela gravidade. Os principais padrões de escoamento bifásicos de gás-líquido em tubos

verticais são classificados em Escoamento em Bolhas, Intermitente, Agitado e Anular, como mostra a Figura 8.

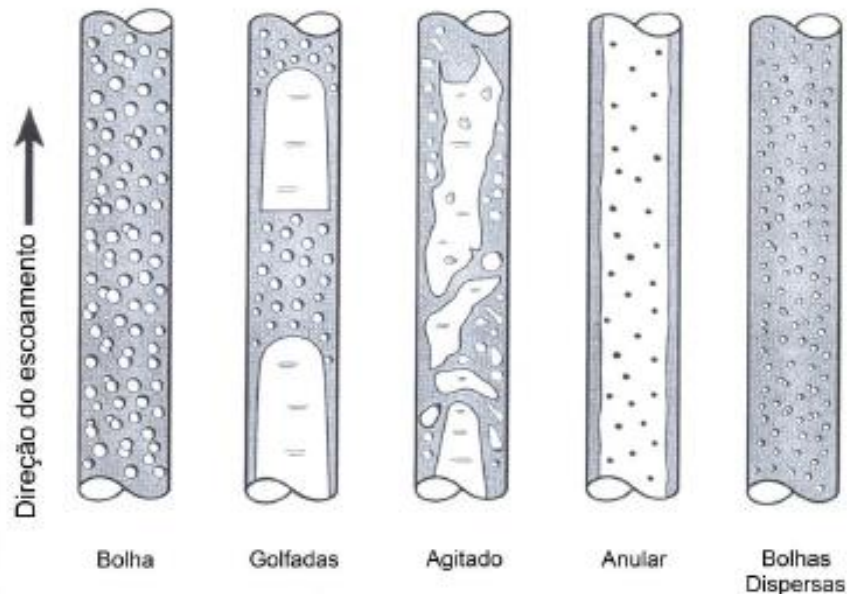


Figura 8: Padrão de escoamento para tubos verticais

Fonte: adaptado de Shoham, 2005.

- *Escoamento em Bolhas*: ocorre em baixas velocidade superficial da fase gasosa e o tubo é preenchido quase completamente de líquido e a fase de gás livre está presente na forma de pequenas bolhas. As bolhas movem-se para cima em trajetória helicoidal, onde a distribuição do gás na tubulação é quase homogênea com baixo nível de turbulência apresentando escorregamento entre as fases.
- *Escoamento com Golfadas (Intermitente)*: a fase gasosa é a mais pronunciada. Esse tipo de padrão em tubos verticais é simétrico em torno do eixo do tubo. As bolhas possuem um formato alongado e estas ocupam, transversalmente, quase a totalidade do diâmetro interno do tubo.
- *Escoamento Agitado*: é caracterizado pela instabilidade de padrão de escoamento intermitente, quando ocorre a fragmentação das bolhas principais devido ao comportamento altamente turbulento do escoamento.

- *Anular*: é caracterizado pela formação de um filme líquido na parede interna do tubo e a região central ocupada pela fase gasosa com a presença de gotículas da fase líquida desprendida do filme, ou seja, esse padrão de escoamento é semelhante ao padrão em tubos horizontais.

3.3 MODELO MATEMÁTICO TAITEL E DUKLER, 1976

Este modelo foi desenvolvido especialmente para escoamento com presença de fluidos newtonianos, e que transitam em tubulações horizontais e levemente inclinadas, ou seja, entre $\pm 10^\circ$. Efeitos transitórios, de entrada e saída podem causar desvio da previsão. O modelo foi testado com sucesso principalmente em dados coletados em tubos de pequeno diâmetro sob condições de baixa pressão. (Shohan, 2005).

O ponto de partida do modelo é o fluxo estratificado em equilíbrio. Supondo que ocorra um fluxo estratificado em equilíbrio, o nível de cada fase é determinável, através de análise de estabilidade para determinar se o fluxo é estável ou não. Se o fluxo for estável, ocorre o fluxo estratificado. Se o fluxo não for estável, ocorrerá uma alteração no fluxo estratificado e o fluxo resultante o padrão é determinado (Shohan, 2005).

Para esse modelo o mapa de padrão de escoamento proposto por Taitel e Dukler, 1976, são os dispostos na Figura 9 e Figura 10. As coordenadas utilizadas serão mais bem compreendidas ao longo da modelagem.

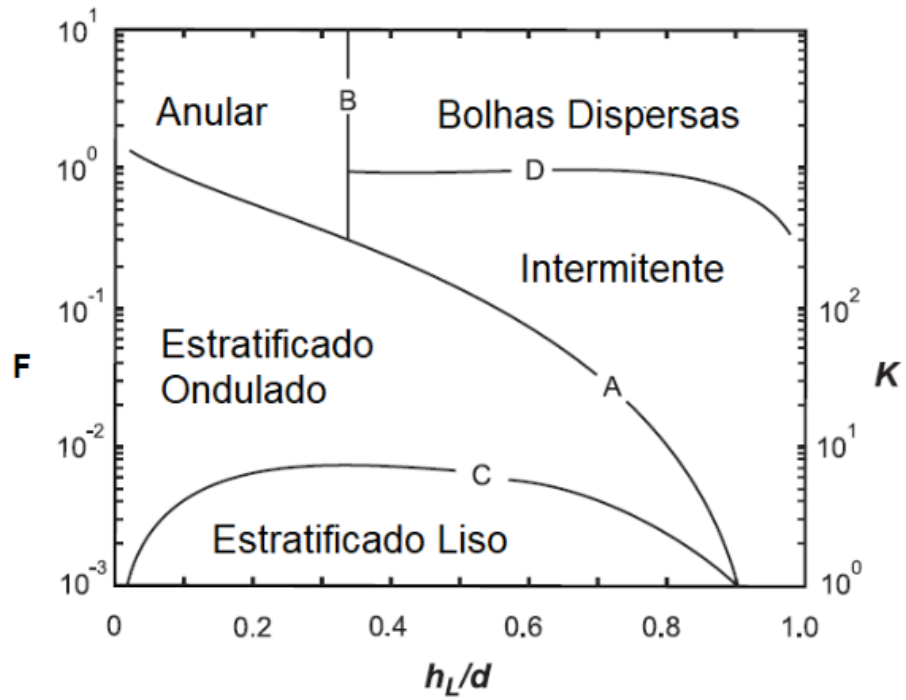


Figura 9: Mapa de padrões de escoamento bifásico horizontal e levemente inclinado segundo Taitel e Dukler, 1976.

Fonte: Shohan, 2005.

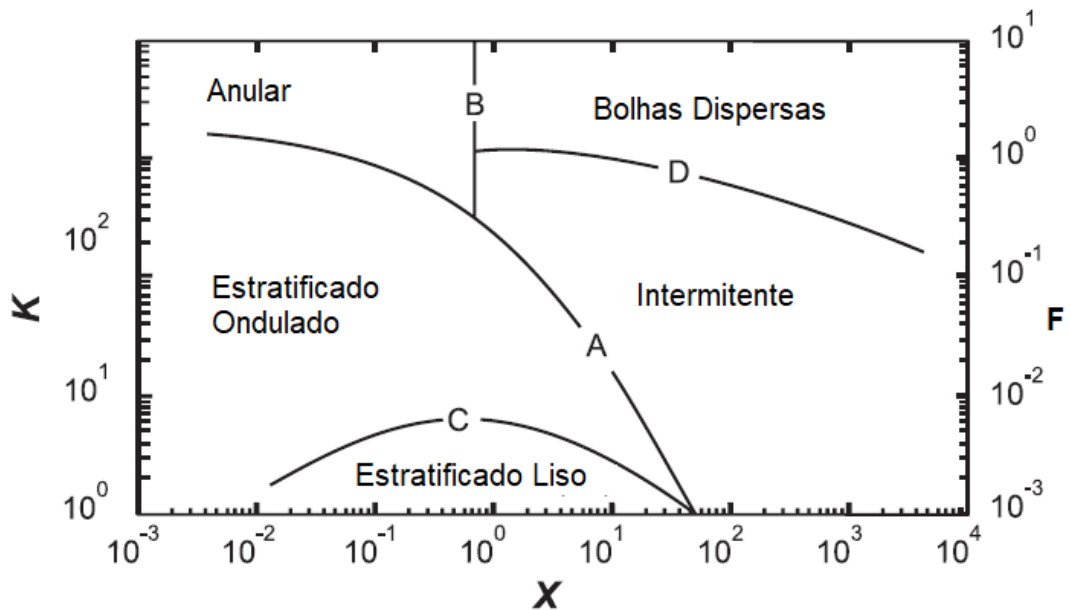


Figura 10: Mapa de padrões de escoamento bifásico horizontal segundo Taitel e Dukler, 1976.

Fonte: Shohan, 2005.

Considerando a Figura 10, por se tratar de mapa de padrões de escoamento bifásico horizontal, o qual será o tipo de escoamento submetido na bancada experimental, as coordenadas do mapa são calculadas da seguinte forma, segundo Taitel e Dukler, 1976.

$$F = \sqrt{\frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G)} \frac{J_G}{D \cdot g \cdot \cos\theta}} \quad \text{Equação 18}$$

$$K = \frac{\rho_G \cdot J_G^2 \cdot \rho_L \cdot J_L}{(\rho_L - \rho_G) \cdot \mu_L \cdot g \cdot \cos\theta} \quad \text{Equação 19}$$

Onde, ρ representa a massa específica das fases constituintes do escoamento, D o diâmetro da tubulação, g o valor da gravidade, J e μ a velocidade superficial e viscosidade das fases, respectivamente.

A coordenada X, parâmetro definido por Lockhart e Martinelli, 1949, será descrita em breve neste trabalho, durante a modelagem matemática disposta pelos autores.

Nas próximas subseções será apresentada uma revisão detalhada dos equacionamento proposto por Taitel e Dukler, 1976 para analisar a transição entre os padrões de escoamento por ele apresentado acima. Destaca-se que o foco está sobre as equações regente de cada uma das transições, maior detalhamento pode ser analisado no próprio artigo publicado pelos autores em questão.

3.3.1 Fluxo estratificado em equilíbrio

A configuração de fluxo estratificado em equilíbrio é mostrada na Figura 11. A tubulação pode ser horizontal ou inclinada na angulação (θ) que o modelo permite, V_G e V_L são as velocidades médias das fases gasosa e líquida, respectivamente, S_G , S_L e S_i , representam o perímetro úmido definido pelas fases gasosa, líquida e de interface entre elas, respectivamente, e h_L é a altura da fase líquida (Shohan, 2005).

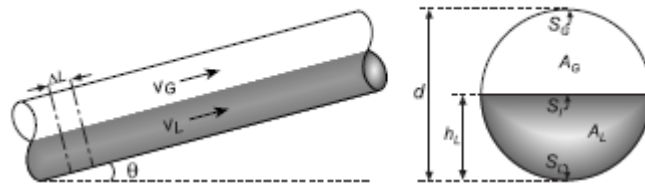


Figura 11: Fluxo Estratificado em equilíbrio.
Fonte: Shohan, 2005.

O objetivo desta parte do modelo é determinar o nível da fase líquida em equilíbrio no tubo, h_L , para um determinado conjunto de condições de fluxo, ou seja, determinar as taxas de fluxo de gás e líquido presente no diâmetro interno da tubulação, assim como as propriedades físicas presentes em cada fase do escoamento. Isso é realizado aplicando o balanço de energia nas fases presentes em um volume de controle diferencial com um comprimento axial de ΔL , como mostra a figura a seguir:

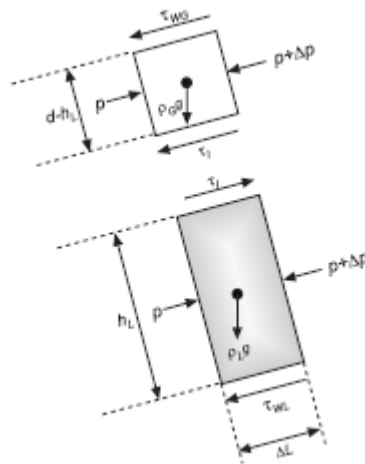


Figura 12: Balanço de força da fase líquida e gasosa do padrão de escoamento estratificado em equilíbrio.
Fonte: Shohan, 2005.

O balanço de força da fase líquida e gasosa é:

$$-A_L \cdot \frac{dp}{dL} - \tau_L \cdot S_L + \tau_I \cdot S_I - \rho_L \cdot A_L \cdot g \cdot \sin\theta = 0$$

Equação 20

$$-A_G \cdot \frac{dp}{dL} - \tau_G \cdot S_G + \tau_I \cdot S_I - \rho_G \cdot A_G \cdot g \cdot \sin\theta = 0 \quad \text{Equação 21}$$

Igualando o gradiente de pressão nas equações e assumindo o gradiente hidráulico nas condições de transição é desprezível temos:

$$\tau_G \cdot \frac{S_G}{A_G} - \tau_L \cdot \frac{S_L}{A_L} + \tau_I \cdot S_I \cdot \left(\frac{1}{A_L} + \frac{1}{A_G} \right) - (\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \sin\theta = 0 \quad \text{Equação 22}$$

Onde, ρ , τ e S representam, respectivamente, a massa específica, tensão cisalhante e perímetro úmido das fases constituintes do escoamento, e g o valor da gravidade.

A tensão cisalhante é avaliada em função da velocidade média das fases:

$$\tau_L = f_L \cdot \frac{\rho_L \cdot V_L^2}{2} \quad \text{Equação 23}$$

$$\tau_G = f_G \cdot \frac{\rho_G \cdot V_G^2}{2} \quad \text{Equação 24}$$

$$\tau_i = f_i \cdot \frac{\rho_G \cdot (V_G - V_L)^2}{2} \quad \text{Equação 25}$$

Onde, ρ e V representam, respectivamente, a massa específica e velocidade real das fases constituintes do escoamento e f , o fator de atrito das fases constituintes.

Neste modelo os fatores de atrito na interface são próximos ao fator de atrito da fase gasosa, além disso a velocidade da interface é negligenciada, com essas aproximações a tensão de cisalhamento interfacial é igual a tensão de cisalhamento da fase gasosa.

Os fatores de atrito das fases são avaliados a partir de:

$$f_L = C_L \cdot \left(\frac{D_L \cdot V_L \cdot \rho_L}{\mu_L} \right)^{-n} \quad \text{Equação 26}$$

$$f_G = C_G \cdot \left(\frac{D_G \cdot V_G \cdot \rho_G}{\mu_G} \right)^{-m} \quad \text{Equação 27}$$

Onde, D representa o diâmetro hidráulico, V, ρ e μ representam, respectivamente, a velocidade real, massa específica e viscosidade das fases constituintes do escoamento. Para as demais variáveis, Taitel e Dukler, 1976 utilizaram os seguintes valores: $C_G = C_L = 0,045$, $n = m = 0,2$ para escoamento turbulento e $C_G = C_L = 16$, $n = m = 1$ para escoamento laminar.

Para o cálculo do diâmetro hidráulico é utilizado o método Agrawal, 1973:

$$D_L = \frac{4 \cdot A_L}{S_L} \quad \text{Equação 28}$$

$$D_G = \frac{4 \cdot A_G}{S_G + S_L} \quad \text{Equação 29}$$

Onde, A e S representam, respectivamente, a área e o perímetro úmido de cada fase constituintes do escoamento bifásico.

Segundo os autores, as transições começam a ser observadas quando $V_G \gg V_I$. A tensão de cisalhamento interfacial no gás é avaliada com a mesma equação da tensão de cisalhamento do gás na parede do tubo.

De forma a conseguir quantificar algumas variáveis, como a área ocupada por cada fase, os autores propõem adimensionalizar as variáveis apresentadas na equação do momento. Nas equações abaixo, a variável "D" representa o diâmetro da tubulação como variável de comprimento, " J_L " e " J_G " são as velocidades superficiais do líquido e do gás, respectivamente. As variáveis adimensionais estão representadas com um til (~) para diferenciação.

$$\tilde{S}_L = \frac{S_L}{D}; \tilde{h}_L = \frac{h_L}{D}; \tilde{A}_L = \frac{A_L}{D^2}; \tilde{v}_L = \frac{V_L}{J_L} \text{ e } \tilde{v}_G = \frac{V_G}{J_G} \quad \text{Equação 30}$$

Rearranjando a Equação 22, temos:

$$\frac{\tau_L}{\tau_G} \cdot \frac{S_L}{A_L} - \left(\frac{S_G}{A_G} + \frac{1}{A_L} + \frac{1}{A_G} \right) + \left[\frac{(\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \sin\theta}{\tau_G} \right] = 0 \quad \text{Equação 31}$$

Substituindo os parâmetros adimensionais na Equação 31, e adicionando parâmetros estipulados pelos autores, temos:

$$X^2 \left[(\tilde{v}_L \cdot \tilde{d}_L)^{-n} \cdot \tilde{v}_L^2 \cdot \frac{\tilde{S}_L}{\tilde{A}_L} \right] - \left[(\tilde{v}_G \cdot \tilde{d}_G)^{-m} \cdot \tilde{v}_G^2 \cdot \left(\frac{\tilde{S}_G}{\tilde{A}_G} + \frac{\tilde{S}_L}{\tilde{A}_L} + \frac{\tilde{S}_L}{\tilde{A}_G} \right) \right] + 4Y = 0 \quad \text{Equação 32}$$

Onde, X é o parâmetro introduzido por Lockhart e Martinelli, 1949 e pode ser calculado com o conhecimento das vazões, propriedades dos fluidos e o diâmetro da tubulação. Y é zero para tubos horizontais e representa as forças relativas que atuam no líquido na direção do escoamento, devido a gravidade e as perdas de pressão.

$$X^2 = \frac{\frac{4 \cdot C_L}{D} \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot J_L \cdot D}{\mu_L} \right)^{-n} \cdot \frac{\rho_L \cdot J_L^2}{2}}{\frac{4 \cdot C_G}{D} \cdot \left(\frac{\rho_G \cdot J_G \cdot D}{\mu_G} \right)^{-m} \cdot \frac{\rho_G \cdot J_G^2}{2}} = \frac{-(dP/dL)_L}{-(dP/dL)_G} \quad \text{Equação 33}$$

$$Y = \frac{(\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \sin\theta}{\frac{4 \cdot C_G}{D} \cdot \left(\frac{\rho_G \cdot J_G \cdot D}{\mu_G} \right)^{-m} \cdot \frac{\rho_G \cdot J_G^2}{2}} = \frac{(\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \sin\theta}{-(dP/dL)_G} \quad \text{Equação 34}$$

Onde, D representa o diâmetro da tubulação, g representa a gravidade, J , ρ e μ representam, respectivamente, a velocidade superficial, massa específica e viscosidade das fases constituintes do escoamento.

Adicionalmente, outro conjunto de variáveis adimensionais são apresentadas pelos autores, de modo que todas as variáveis adimensionais dependem apenas do nível do líquido (h_L), como mostra a seguir:

$$\widetilde{A}_L = 0,25 \cdot \left[\pi - \cos^{-1}(2 \cdot \widetilde{h}_L - 1) + (2 \cdot \widetilde{h}_L - 1) \sqrt{1 - (2 \cdot \widetilde{h}_L - 1)^2} \right] \quad \text{Equação 35}$$

$$\widetilde{A}_G = 0,25 \cdot \left[\cos^{-1}(2 \cdot \widetilde{h}_L - 1) + (2 \cdot \widetilde{h}_L - 1) \sqrt{1 - (2 \cdot \widetilde{h}_L - 1)^2} \right] \quad \text{Equação 36}$$

$$\widetilde{S}_L = \pi - \cos^{-1}(2 \cdot \widetilde{h}_L - 1) \quad \text{Equação 37}$$

$$\widetilde{S}_G = \cos^{-1}(2 \cdot \widetilde{h}_L - 1) \quad \text{Equação 38}$$

$$\widetilde{S}_I = \sqrt{1 - (2 \cdot \widetilde{h}_L - 1)^2} \quad \text{Equação 39}$$

$$\widetilde{v}_L = \frac{\widetilde{A}}{\widetilde{A}_L} \quad \text{Equação 40}$$

$$\widetilde{v}_G = \frac{\widetilde{A}}{\widetilde{A}_G} \quad \text{Equação 41}$$

$$\widetilde{d}_L = \frac{4\widetilde{A}_L}{\widetilde{S}_L} \quad \text{Equação 42}$$

$$\widetilde{d}_G = \frac{4\widetilde{A}_G}{\widetilde{S}_G + \widetilde{S}_I} \quad \text{Equação 43}$$

Trata-se de um exemplo de análise de similaridade das equações básicas, a Equação 22 deve ser aplicável a todas as condições de fluxo estratificado, ou seja, qualquer diâmetro, ângulo de inclinação do tubo, taxas de fluxo e propriedades dos

fluidos. A decisão sobre se o escoamento é laminar ou turbulento em cada fase deve ser baseada no cálculo do número de Reynolds.

3.3.2 Transição entre o escoamento estratificado e intermitente

A primeira parte do modelo, as condições de escoamento estratificado são consideradas o equilíbrio estável e o nível do líquido é determinado. Quando o escoamento deixa de ser estável, haverá transição para outros padrões de fluxo, que requer análise de estabilidade, neste caso a Teoria da estabilidade de Kelvin-Helmonholtz (Milne-Tomsom, 1960) será utilizada, uma vez que se aplica tanto para fluidos invíscidos, quanto viscosos.

Com o aumento da vazão da fase líquida, conseqüentemente o nível da fase aumenta e uma onda é formada rapidamente e tende a bloquear o escoamento de gás. Isto se processa em decorrência da diminuição do diâmetro hidráulico do gás, que, em função disto, vê sua velocidade aumentada. De acordo com o efeito de Bernoulli, a pressão é então diminuída neste ponto, o que tende a fazer a onda da fase líquida crescer ainda mais. O equilíbrio entre estas tendências e os efeitos da força da gravidade e das tensões superficiais, que atuam em sentido contrário, é o princípio da Teoria citada anteriormente de Kelvin-Helmonholtz (Milne-Tomsom, 1960). Este princípio, após adimensionalizado estabelece que:

$$C = 1 - \frac{h_L}{D} \quad \text{Equação 44}$$

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G)}} \cdot \frac{J_G}{\sqrt{D \cdot g \cdot \cos\theta}} \quad \text{Equação 45}$$

Onde, D é o diâmetro da tubulação, h_L a altura do líquido, ρ , J representam, respectivamente, a massa específica e a velocidade superficial das fases constituintes do escoamento, e Fr é o número de Froude, que pode ser calculado pela Equação 46.

$$Fr = \frac{Vm^2}{g \cdot D} \quad \text{Equação 46}$$

Diante das equações apresentadas, considerando a teoria de Kelvin-Helmonholtz (Milne-Tomsom, 1960), os autores propõem que a transição entre o escoamento estratificado para intermitente ocorre quando:

$$Fr^2 \left[\frac{1}{(1 - \bar{h}_L)^2} \frac{\bar{v}_G^2 \bar{S}_I}{\bar{A}_G} \right] \geq 1 \quad \text{Equação 47}$$

ou

$$C \cdot \left[\frac{(\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \cos \theta \cdot A_G}{\rho_G \cdot S_I} \right]^{0,5} \leq V_G \quad \text{Equação 48}$$

Onde, g é a gravidade, ρ , S_I , A_G e V_G representam, respectivamente, a massa específica, perímetro úmido da interface, área ocupada pela fase gasosa e velocidade da fase gasosa.

A Equação 47 e a Equação 48, podem ser utilizadas como comparativo para a transição dos padrões de escoamento estratificado para intermitente, a diferença é a presença de variáveis em formato dimensional na Equação 48 e adimensional na Equação 47.

3.3.3 Transição entre Intermitente ou Bolhas Dispersas para Anular

O critério para a transição do fluxo intermitente ou bolhas dispersas para o fluxo anular é descrita esquematicamente na Figura 13. Quando as taxas de fluxo de gás ou líquido são aumentadas, a estrutura de fluxo estratificada se torna instável e ocorre a transição do fluxo estratificado para o não estratificado. Sob condições de fluxo

instável, os seguintes podem ocorrer: baixas taxas de vazão de gás, o nível de líquido no tubo é alto e conseqüentemente ocorre o crescimento das ondas que pode bloquear a área da seção transversal do tubo. Esse bloqueio forma uma onda líquida e fluxo com ondas se forma (Shohan, 2005).

No entanto, com baixas taxas de fluxo de líquido, o nível de líquido no tubo é baixo. Para este caso, falta suprimento de líquido e as ondas são varridas para interface, ou seja, ao redor do tubo, resultando na transição para o fluxo anular.

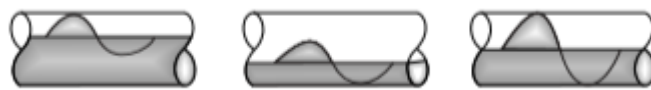


Figura 13: Esquemático de transição do escoamento intermitente-bolhas dispersas para o escoamento anular.

Fonte: Shohan, 2005.

Diante disso, sugere-se que a transição dependa exclusivamente no nível do líquido no tubo. Inicialmente e intuitivamente, o valor de $h_L = 0,5$ foi proposto para esta transição. Posteriormente, este critério foi modificado para justificar o fato de que não é só o nível do líquido que deve ser considerado, uma vez que há presença de gás. Com isso, ficou estipulado que $\tilde{h}_L \leq 0,35$, ocorre a transição para o fluxo anular, caso contrário $\tilde{h}_L > 0,35$ o fluxo será bolhas dispersas. Pode-se verificar estes dados da transição na Figura 9. Considera-se que:

$$\tilde{h}_L = \frac{h_L}{D} \quad \text{Equação 49}$$

Onde, D é o diâmetro da tubulação e h_L , a altura do líquido.

3.3.4 Transição entre os escoamentos estratificado e estratificado ondulado

A transição entre o fluxo estratificado para o fluxo estratificado ondulado ocorre quando a velocidade da fase gasosa aumenta e forma ondas na interface, mas, por outro lado, é menor que a velocidade necessária para causar instabilidade e transição para fluxo não estratificado, como anular e intermitente (Shohan, 2005).

Em termos fenomenológicos, a formação destas ondas se iniciará quando a pressão e o trabalho das tensões de cisalhamento na interface líquida forem maior que a dissipação viscosa no fluido. O presente modelo utiliza a Teoria de Jeffrey's, 1925 como critério de iniciação de onda (Shohan, 2005).

$$(V_G - C)^2 \cdot C > \frac{4 \cdot \mu_L \cdot g \cdot \cos \theta \cdot (\rho_L - \rho_G)}{s \cdot \rho_G \cdot \rho_L} \quad \text{Equação 50}$$

Onde “s” é o coeficiente para o qual Benjamin, 1959 indicou valores entre 0,01 e 0,03. Este equacionamento utiliza $s = 0,1$, e C é a velocidade de propagação das ondas. Assumindo que a transição ocorre quando $V_G \gg C$, e para simplificação o autor considera que $V_L = C$, logo o critério final para determinar a transição entre os escoamentos pode ser representado por:

$$V_G \geq \left[\frac{4 \cdot \mu_L \cdot g \cdot \cos \theta \cdot (\rho_L - \rho_G)}{s \cdot \rho_G \cdot \rho_L \cdot V_L} \right]^{0,5} \quad \text{Equação 51}$$

Onde, g representa a gravidade, ρ , V e μ representam, respectivamente, a massa específica, velocidade e viscosidade das fases constituintes do escoamento bifásico horizontal.

3.3.5 Transição entre o escoamento Intermitente para Bolhas Dispersas

Essa transição ocorre em elevadas velocidades da fase líquida e baixas da fase gasosa, o nível de equilíbrio da fase líquida se aproxima do topo da tubulação, o que

marca a tendência do gás se misturar ao líquido. Nestas condições a transição para o escoamento bolhas dispersas ocorre quando as flutuações turbulentas são fortes o suficiente para vencer as forças de empuxo que tendem a manter o gás no topo da tubulação (Shohan, 2005).

Nota: O gás imerso em um líquido, ou flutuando em sua superfície, a força líquida vertical agindo sobre ele devido à pressão do líquido é denominada, força de empuxo.

A força de empuxo por unidade de comprimento pode ser expressa por:

$$F_B = A_G \cdot g \cdot \cos \theta \cdot (\rho_L - \rho_G) \quad \text{Equação 52}$$

Onde, g representa a gravidade, A_G a área ocupada pela fase gasosa e ρ a massa específica das fases constituintes do escoamento bifásico.

A força devida à turbulência pode ser estimada como:

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot V'^2 S_i \quad \text{Equação 53}$$

Onde V' é a flutuação da velocidade radial para a qual a raiz média quadrática é estimada aproximadamente igual à velocidade de fricção:

$$\sqrt{V'^2} = V^* = V_L \cdot \sqrt{\frac{f_L}{2}} \quad \text{Equação 54}$$

Considerando as características do escoamento, segundo os autores a transição entre os padrões de escoamento intermitente-bolhas dispersas ocorre quando $F_T \geq F_B$, ou:

$$V_L \geq \sqrt{\frac{4.A_G.g.\cos \theta}{S_I.f_L} \cdot \left(1 - \frac{\rho_G}{\rho_L}\right)} \quad \text{Equação 55}$$

Onde, f_L representa o fator de atrito da fase líquida, g a gravidade, A_G a área ocupada pela fase gasosa, S_I o perímetro úmido da interface e ρ a massa específica das fases constituintes do escoamento.

3.4 MODELO PROPOSTO POR MANDHANE, 1973

Hoje na literatura existe estudos diversos referente a mapas de padrões de escoamento multifásico, esses mapas são elaborados a partir de dados experimentais obtidos pela análise do próprio autor ou baseados em dados e estudos de outros autores. Os mapas propostos geralmente são compostos por linhas de transição, que representam fronteiras nas quais a ocorrência de um padrão de escoamento específico é observada. A tabela a seguir apresenta os principais autores que se aprofundaram nesse tema.

Tabela 1: Autores que estudaram escoamento multifásico.

Autor	Diâmetro da tubulação (cm)	Fluidos utilizados	Coordenadas do mapa
Kosterin, 1949	2,54 - 5,1 - 7,62 - 10,62	ar-água	Velocidade superficial do gás e velocidade média do gás e do líquido
Bergelin e Gazley, 1949	2,54	ar-água	Vazão mássica do gás e do líquido
Abou Sabe e Johnson, 1952	2,21	ar-água	Vazão mássica do gás e do líquido
Alves, 1954	2,54	ar-água/óleo	Velocidade Superficial do gás e do líquido
Baker, 1954	dados de outros autores	óleo-gás	Vazão volumétrica do gás
White e Huntington, 1955	2,54 - 3,8 - 5,1	ar/ gás natural - água/óleo	Vazão volumétrica do gás e do líquido
Hoogendorn, 1959	2,54 - 9,1 - 14	ar-água/óleo	Velocidade superficial do gás e velocidade média do gás e do líquido
Govier e Omer, 1962	2,54	ar-água	Vazão volumétrica do gás e do líquido
Eaton et al., 1967	5,1 - 10,16 - 43,2	gás natural - água/óleo cru	Diferentes coordenadas
Al-Sheikh et al., 1970	banco de dados	variação de gás - líquido	Diferentes coordenadas
Govier e Aziz, 1972	dados de outros autores	ar-água/óleo	X/velocidade superficial do líquido e Y/velocidade superficial do gás
Simpson, 1977	12,7 - 21,6	ar-água	Velocidade Superficial do gás e do líquido
Weisman, 1979	1,2 - 2,54 - 5,1	variação de gás - líquido	Velocidade Superficial do gás e do líquido

Se for comparado os diferentes mapas existentes na literatura fica evidente o grau de incerteza que existe nesses mapas. Adicionalmente ao mapa proposto por Taitel e Dukler, este trabalho utilizará para estudo o mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973, no qual é apresentado a transição entre os padrões de escoamento em fluxo bifásico ar-água em tubulação horizontal. O autor se baseou em um vasto banco de dados para tubos horizontais de pequenos diâmetros variando de 1,27cm a 5,1 cm.

Iniciando análise sobre o modelo proposto por Mandhnae, 1973 podemos observar que os termos para os tipos de padrões de escoamento observados no mapa são consistentes com as definições usadas por Govier e Aziz, 1972, sendo os padrões estratificado, intermitente, anular, bolhas e bolhas dispersas.

Baker, 1954, em seus estudos iniciais sobre padrões de escoamento propôs uma ideia de um mapa onde existia fatores de correção (λ , Ψ) da propriedade do fluido, sendo eles:

$$\lambda = \left[\frac{\rho_G}{0.075} \cdot \frac{\rho_L}{62.3} \right]^{1/2} \quad \Psi = \frac{73.0}{\sigma} \left[\left(\frac{\mu_L}{1.0} \cdot \frac{62.3}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3} \quad \text{Equação 56}$$

Onde, a massa específica (ρ) do gás e do líquido é na unidade $\frac{kg}{m^3}$, a viscosidade (μ) em Centipoise (cP) e a tensão superficial é expressa em $\frac{N}{m}$.

Hoogendoorn, 1959 em seus estudos observou variação no comportamento do padrão do escoamento devido o diâmetro da tubulação e na viscosidade do líquido inferior a 50 cP. De uma forma geral, como já discutido, no início dos estudos dos padrões de escoamento cada autor efetuou seu estudo com um diâmetro e utilizou as estipulou as coordenadas do mapa em questão.

Govier e Aziz, em 1972, apresentaram seus estudos com o sistema de coordenadas do mapa de padrão de escoamento usando a velocidade superficial do gás e do líquido. Os fatores de correção (X e Y) das propriedades dos fluidos definidas por Govier e Aziz, foram:

$$X = \left[\frac{\rho_G}{0.0808} \right]^{1/3} Y \quad Y = \left[\frac{\rho_L}{62.4} \cdot \frac{72.4}{\sigma} \right]^{1/4} \quad \text{Equação 57}$$

Onde, ρ representa a massa específica das fases constituintes do escoamento bifásico e σ a tensão superficial.

Logo, os autores propuseram que os fatores de correção são utilizados multiplicando as velocidades superficiais dos fluidos, obtendo assim uma nova velocidade superficial para o líquido e para o gás:

$$J'_L = X \cdot J_L \quad \text{Equação 58}$$

$$J'_G = X \cdot J_G \quad \text{Equação 59}$$

Mandhane, 1973 verificou que certas melhorias poderiam ser realizadas em relação às análises dos mapas de padrões de escoamento propostos pelos autores citados anteriormente. Com isso, com base no seu banco de dados, realizou análises e construiu seu próprio mapa de padrão de escoamento para escoamento horizontal bifásico ar-água.

A Tabela 2 apresenta a faixa de valores referentes às propriedades do escoamento bifásico ar-água que Mandhane, 1973 considera para o seu modelo.

Tabela 2 – Parâmetros usados para o escoamento ar-água.

Parâmetros usados para ar-água	
Densidade da fase líquida (ρ_L)	961 - 1041 kg/m ³
Densidade da fase gasosa (ρ_G)	1 - 1,44 kg/m ³
Viscosidade da fase líquida (μ_L)	0.75 - 1.1 centipoise
Viscosidade da fase gasosa (μ_G)	0.017 - 0.02 centipoise
Tensão de superfície (σ)	0,069 - 0,073 N/m

Diante ao exposto, o mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973 é mostrado na Figura 14, o autor também levou em consideração o efeito da mudança de uma propriedade física, ou seja, aplicabilidade do modelo para diferentes tipos de escoamento, podendo assim ser aplicado para o escoamento que ocorre nos poços de petróleo. O mapa é um gráfico log-log e seus eixos de coordenadas são representados pela velocidade superficial do líquido e a velocidade superficial do gás.

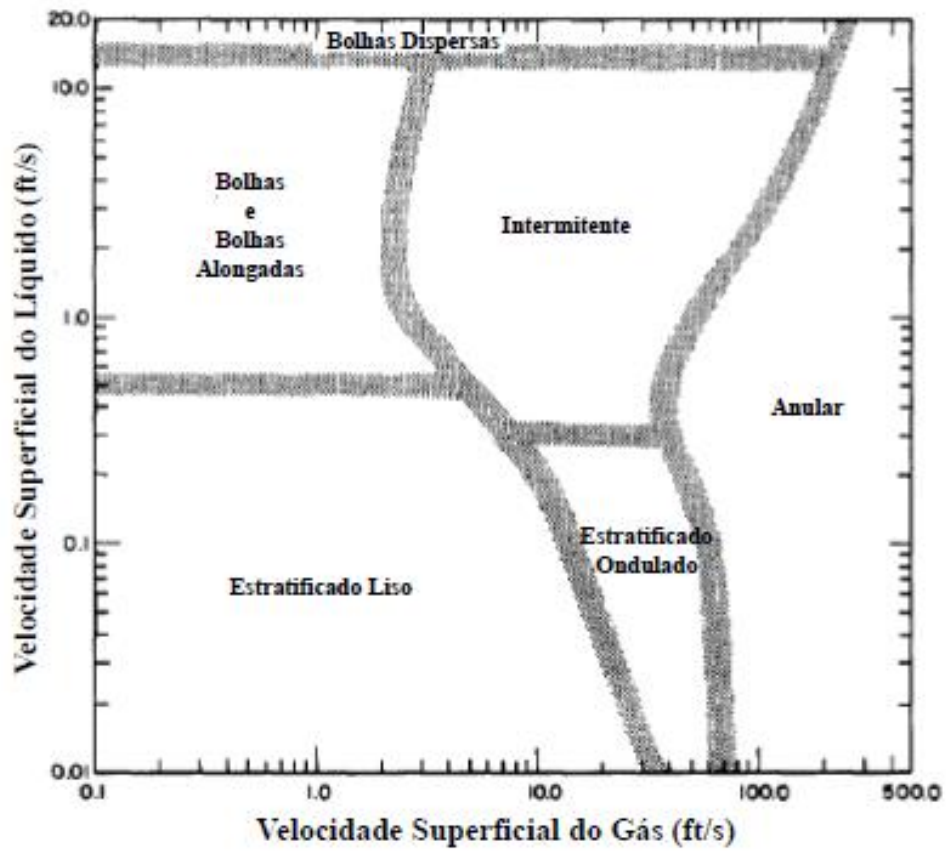


Figura 14: Mapa do padrão de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane, 1973.

O autor apresenta as coordenadas dos limites de transição entre os padrões de escoamento utilizadas na Figura 14, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Coordenadas para os limites de transições do mapa de padrões de escoamento proposto por Mandhane, 1973.

Limites de Transição	Jg (m/s)	JL (m/s)	Correção das propriedades físicas - Multiplica por:
Estratificado liso para bolhas alongadas	0,03048	0,1524	1/Y
	1,524	0,1524	Y
Estratificado liso para intermitente	2,286	0,09144	Y
	12,192	0,09144	X
Bolhas alongadas e intermitente para	0,03048	4,2672	Y
	70,104	4,2672	
Estratificado liso e bolhas alongadas para intermitente e estratificado ondulado	10,668	0,003048	X
	4,2672	0,03048	
	3,2004	0,06096	
	0,762	0,35052	
	0,762	1,46304	
Estratificado ondulado e intermitente para anular	0,9906	4,2672	X
	21,336	0,003048	
	18,288	0,03048	
	11,5824	0,09144	
	12,192	0,170688	
	15,24	0,3048	
	30,48	0,762	
Bolhas dispersas para anular	70,104	4,2672	X
	81,9912	9,144	

Para elaborar o fator de correção das propriedades físicas do escoamento ar e da água, foi analisado a influência do diâmetro da tubulação no comportamento do escoamento, além disso, todos os efeitos direcionais foram avaliados para os limites de padrão de escoamento, e várias perturbações foram simuladas nos expoentes usados nas definições dos fatores de correção. O resultado obtido após profunda análise do Mandhane, 1973, é expressa nas equações a seguir.

$$X = \left(\frac{\rho_G}{0.0808} \right)^{0.2} \left(\frac{\rho_L}{62.4} \frac{72.4}{\sigma} \right)^{0.25} \left(\frac{\mu_G}{0.018} \right)^{0.2} \quad \text{Equação 60}$$

$$Y = \left(\frac{\mu_L}{1.0} \right)^{0.2} \left(\frac{\rho_L}{62.4} \frac{72.4}{\sigma} \right)^{0.25} \quad \text{Equação 61}$$

Onde, a massa específica do gás (ρ_G) e a massa específica líquido (ρ_L), dados em $\frac{kg}{m^3}$, μ_L e μ_G são a viscosidade do ar e do líquido, respectivamente, dados em Centipoise (cP) e σ é a tensão superficial dada em $\frac{N}{m}$. Esses fatores são aplicados ao limite de padrão de fluxo, e não aos eixos do mapa. A transição limite pode ser definido usando as coordenadas da Tabela 3, e posteriormente aplicando os fatores de correção apresentado acima.

Adicionalmente, além da análise realizada para elaboração dos fatores de correção, o possível efeito de diâmetro no padrão de escoamento foi verificado no estudo do Mandhane, 1973 e claramente segundo o mapa proposto tende a ser mais bem-sucedido com dados de pequeno diâmetro do tubo, ou seja, em até duas polegadas. Porém, para diâmetros maiores o mapa proposto também é bem-sucedido, cerca de 80% de exatidão.

3.5 RELAÇÃO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO E O GRADIENTE DE PRESSÃO

Os padrões de escoamento apresentam um certo gradiente de pressão na tubulação, ou seja, uma perda de pressão por unidade de comprimento da tubulação que é dependente do padrão de escoamento evidenciando as incertezas desses padrões.

Analogamente ao escoamento monofásico, o escoamento multifásico é em geral constituído de três parcelas de pressão, sendo a parcela gravitacional, de fricção e de aceleração, conforme as equações abaixo (Andreolli, 2016):

$$\frac{dP}{dL} = \left(\frac{dP}{dL}\right)_{\text{fricção}} + \left(\frac{dP}{dL}\right)_{\text{gravitacional}} + \left(\frac{dP}{dL}\right)_{\text{aceleração}} \quad \text{Equação 62}$$

A componente de aceleração normalmente é desprezada, nos casos de escoamento em que não há grande variação de velocidade de uma seção para outra. Assim, pode-se simplificar a equação acima resultando em uma parcela de fricção e uma parcela gravitacional. O gradiente de pressão das parcelas gravitacionais e de fricção em um escoamento em que se varia a vazão do líquido, o que ocorre naturalmente na produção de poços de petróleo, tem-se um gráfico semelhante ao apresentado na Figura 15.

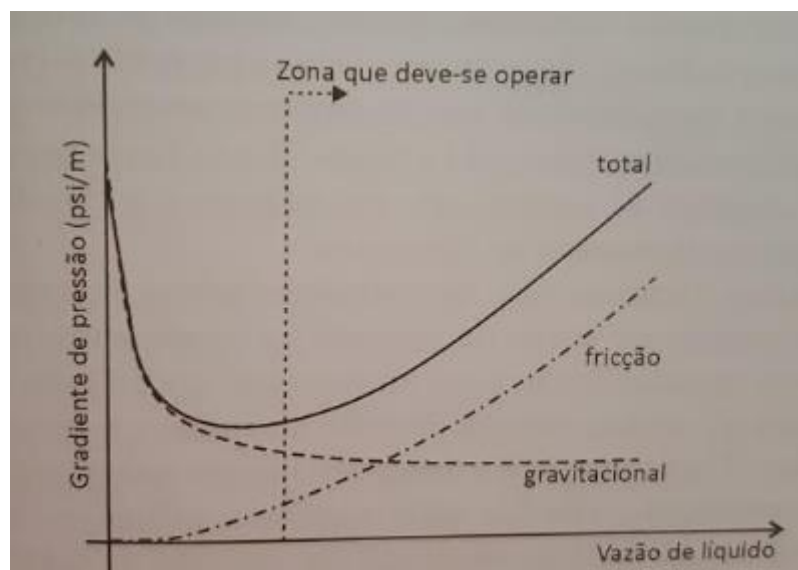


Figura 15: Gradiente de pressão hipotético de escoamento multifásico

Fonte: Andreolli, 2016

4. BANCADA EXPERIMENTAL

Para o estudo experimental do escoamento bifásico em tubulações horizontais, onde será identificado os diferentes padrões de escoamento que podem ser encontrados no sistema submarino de produção de petróleo, bem como em outros sistemas, foi proposto a construção de uma bancada experimental que simula o que ocorre nas linhas de escoamento.

Como discutido anteriormente neste trabalho, as linhas de escoamento é uma das etapas em que os fluidos retirados do reservatório são escoados até chegar a UEP. Logo, é de extrema importância que nessa etapa, o fluido escoe da melhor maneira, ou seja, garantindo o melhor escoamento até o seu destino final, harmonizando a qualidade com a quantidade desejada do fluido em questão. Para isso, é necessário estudos profundos e aprimoramento tecnológico contínuo para que isso ocorra com eficácia.

Diante ao exposto, para o estudo e simulação do escoamento que ocorre nas linhas de escoamento, com objetivo de analisar a influência que os diferentes padrões de escoamento podem ter na garantia e qualidade do escoamento até o seu destino final, em dependência da variação da velocidade superficial das fases, foi projetado e construído uma bancada experimental que possibilite tal simulação.

Essa bancada, fornecerá dados e resultados que podem ser comparados com a literatura apresentada neste trabalho, podendo assim validar a sua eficácia, e posteriormente fazer a mesma análise para outros fluidos que compõe escoamento multifásico qualquer, de um sistema de produção qualquer. Contribuindo assim, para a melhoria da qualidade desse tipo de escoamento, que até então, é bastante imprevisível.

Neste capítulo será apresentado primeiramente como foi realizado o planejamento e a operação da bancada experimental, em seguida será apresentado a faixa de vazão que a bomba, compressor e medidores de vazão escolhido podem alcançar. Posteriormente, será apresentado como foi realizado a montagem da bancada, bem como os dados disponibilizados por ela e como é realizado o ensaio. Por fim, é disposto os problemas encontrados durante todo o período, desde o

planejamento até a operação da bancada, finalizado com o empecilho que a pandemia do Covid-19 trouxe para a obtenção dos dados deste trabalho.

4.1 PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

Nesta seção do trabalho será descrito o planejamento, a compra dos equipamentos e execução da montagem da bancada experimental, com ênfase na disposição de cada equipamento no circuito de montagem, explicando a importância de cada equipamento para o experimento final, como já exposto, possui o objetivo de simular as linhas de escoamento do sistema submarino de produção de petróleo. O esquema de funcionamento da bancada experimental com a disposição dos equipamentos está representado no esquemático da Figura 16.

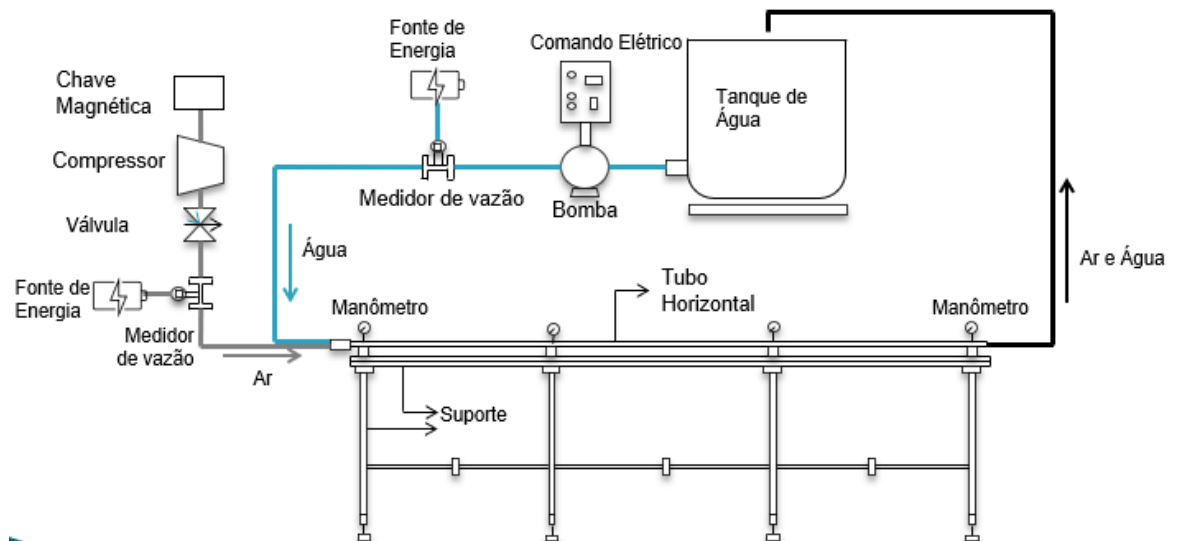


Figura 16: Esquema de funcionamento da bancada experimental

Nota-se que a linha de água é representada pelo circuito disposto em azul, a linha de ar é representada pelo circuito disposto em cinza, e a canalização que possui ambos os fluidos é representado pelo circuito sinalizado pela cor preta.

O circuito experimental da bancada é composto basicamente por 6 metros de tubulação de acrílico transparente de 30mm de diâmetro, sendo 3mm de espessura, tubos de PVC de 30mm de diâmetro com 3mm de espessura, uma moto bomba,

tanque de água, compressor, medidores de vazão para ar e água, manômetro, fontes de energia e um painel de controle.

Com isso, iniciando o planejamento da bancada experimental, foi pensado em um perfil de alumínio, que permitisse a fixação da tubulação de acrílico por meio de cantoneiras, e ao mesmo tempo o perfil seria fixado no suporte da bancada.

Dessa forma, o suporte da bancada experimental foi projetado e fabricado para fornecer rigidez à bancada e evitar que ela se movimente e vibre durante a realização do experimento, podendo assim influenciar os resultados obtidos. Nas figuras a seguir pode-se observar o desenho técnico realizado na etapa de planejamento, e como o suporte ficou após a sua fabricação.

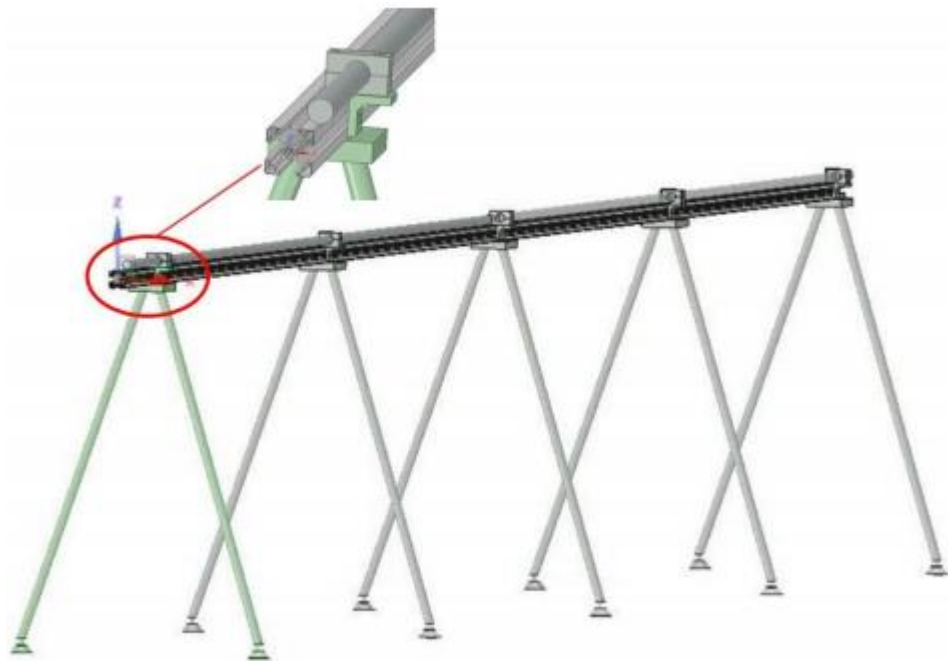


Figura 17: Desenho Técnico do suporte da bancada experimental.



Figura 18: Fabricação do suporte da bancada experimental.

A tubulação de acrílico selecionada possui o diâmetro de 0,0254 m, sendo 3 mm de espessura, porém, foram escolhidos comprimentos diferentes da tubulação se modo a permitir flexibilidade no transporte da mercadoria e na montagem, sendo tubos de 2 metros e de 1 metro. Logo, para realizar a conexão entre as tubulações de acrílico fixada no perfil de alumínio por meio das cantoneiras, foi projetado um sistema de conexão de Nylon entre os tubos, como mostra a Figura 19 e o Anexo III.

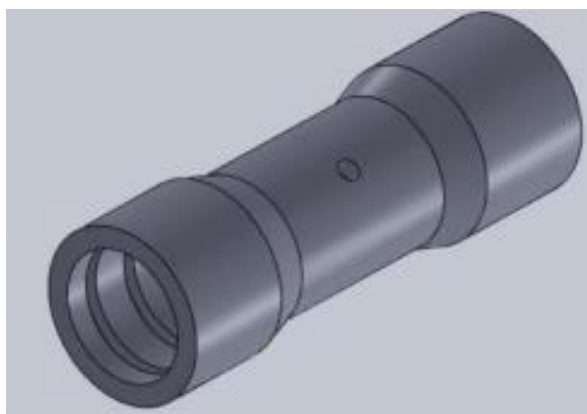


Figura 19: Desenho Técnico da conexão para tubulação de acrílico.

Essa conexão permite a instalação dos bicos de injeção de ar no interior do tubo de acrílico, bem como a conexão dos medidores de pressão ao longo da tubulação de acrílico. Além disso, no interior da conexão foi planejada de modo a se obter uma boa vedação resultando em o não vazamento dos fluídos, sem prejudicar o comportamento do escoamento no interior da tubulação.

Como citado anteriormente, a conexão para a tubulação permite a injeção de ar, com isso, foram projetados e fabricados bicos injetores que foram instalados em uma das conexões de Nylon, ou seja, na primeira conexão situada no início da tubulação, onde serão injetados ar e água concomitantemente e na mesma direção para análise do escoamento bifásico.

A Figura 20 mostra os bicos injetores de ar instalados na conexão da tubulação de acrílico, permitindo a injeção do fluido de ar na mesma direção que o fluido de água será injetado.



Figura 20: Bicos injetores de ar instalados na conexão da tubulação de acrílico.

Paralelamente a isso, foi dimensionado e escolhido o compressor e a bomba que serão utilizados no experimento. Com isso, foi verificado na bibliografia os requisitos de vazão dos fluídos que precisávamos que cada equipamento fornecesse para que fosse possível reproduzir o mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973, como mostra a Figura 14, bem como a modelagem matemática proposta por Taitel e Dukler, 1976, como foi descrito na seção 3 deste trabalho.

Após tal verificação, foi analisado o Datasheet dos fornecedores desses equipamentos, para a escolha da bomba e do compressor que atendesse com o melhor custo-benefício. No item a seguir deste trabalho, será apresentado os valores de vazão que os equipamentos selecionados podem atingir.

Portanto, a moto bomba escolhida é da Schneider, do modelo ME-AL-2250. Já o compressor escolhido é da marca Chiaperini, cujo modelo é descrito por CJ 20 + APV 250 litros. Ambos os equipamentos estão representados na figura a seguir.



Figura 21: Moto Bomba Schneider e Compressor Chiaperini.

Para realizar o comando elétrico da bomba foi planejado e fabricado uma caixa elétrica para o acionamento, interrupção e controle de frequência da bomba por meio dela. Adicionalmente, de modo a facilitar à disposição e locomoção da bomba e do comando elétrico, foi fabricado um suporte para ambos os equipamentos, como mostra a Figura 22 e o Anexo III.



Figura 22: Suporte do comando elétrico e da bomba.

Outro ponto importante no circuito de funcionamento da bancada experimental é o reservatório de água para a sucção da bomba. Portanto, o reservatório escolhido tem capacidade de 1000 litros, pois, devido a potência da bomba escolhida era necessário um reservatório com essa capacidade para contribuir com a eficácia do experimento. A seguir a imagem deste reservatório.



Figura 23: Reservatório de água.

Finalizado a escolha e fabricação dos equipamentos necessários para a realização do experimento foram selecionados os medidores de vazão dos fluidos, ou

seja, um para o fluido gasoso e outro para o fluido líquido. Foram selecionados medidores de vazão do tipo turbina, da marca Rucken, modelo TCM – 1/2", range 1,31 a 8,7m³/h para medir a vazão de ar, e para medir a vazão de água o modelo é TCM – 1", range 0,81 a 13,8 m³/h. A Figura 24 mostra os medidores instalados, na tubulação branca, o medidor de água, na tubulação preta, o medidor de ar.



Figura 24: Medidores de vazão de ar e água.

Destaca-se que o datasheet dos medidores também foi analisado de modo a garantir que o modelo selecionado era compatível com as vazões em que seria submetido, maior detalhamento será realizado na próxima seção deste trabalho.

Para o funcionamento dos medidores de vazão, é necessária uma fonte de energia, porém, devido a pandemia do COVID-19 o equipamento não chegou a tempo na universidade. O funcionamento dos medidores é de extrema importância, pois, permitirão o cálculo da velocidade superficial de cada fluido, por meio das vazões mensuradas, para então se possível a reprodução do mapa de padrão de escoamento, proposto por Mandhane, 1973, bem como análise da modelagem proposta por Taitel e Dukler, 1976.

Por fim, foi realizado a compra das tubulações de PVC e das mangueiras flexíveis, que possibilita a interligação dos equipamentos listados com a tubulação de acrílico.

4.1.1 Faixa de vazão dos equipamentos elétricos

Nesta subseção será apresentado a faixa de vazão que a bomba, o compressor e os medidores de vazão selecionados podem atingir, segundo informações de seus manuais técnicos. Para alcançar com excelência os objetivos deste trabalho, é necessário que esses equipamentos tenha uma boa potência, para assim fornecer as vazões que é desejável para análise dos modelos apresentados.

Dessa forma, para atingir as velocidades das fases que compõe o escoamento bifásico, e com isso ser capaz de reproduzir todos os padrões de escoamento proposto por Mandhane, 1973 e Taitel e Dukler, 1976 em seus mapas, é necessário observar as velocidades superficiais mínimas e máximas que tais fluidos precisam para atingir, para obter o comportamento desejado de cada padrão de escoamento.

Como Mandhane, 1973 apresenta seu mapa com coordenadas exclusivamente em função das velocidades superficiais das fases, esse foi utilizado de base para escolha dos equipamentos, com isso, observando a Tabela 3, a maior velocidade superficial do líquido é cerca de 9 m/s, equivalente a vazão de 16,39 m³/h, para tubulações de 0,0254 m, para atingir o padrão de escoamento anular e bolhas dispersas, a menor velocidade superficial do líquido necessária é 0,003 m/s, equivalente a vazão de 0,006 m³/h, para tubulações de 0,0254 m, para atingir os padrões de escoamento estratificado liso, estratificado ondulado e anular.

Diante disso, a moto bomba da Schneider ME-AL-2250, mostrada na Figura 21, atende a necessidade do projeto uma vez que a vazão máxima fornecida pela bomba é 15 m³/h, chegando bem próxima a vazão máxima exigida por Mandhane, 1973. No entanto, vale destacar que mesmo que a vazão não chegue ao limite máximo e mínimo, é possível observar os padrões existentes nas velocidades altas e baixas de gás, pois eles podem se formar em velocidades entre as máximas e mínimas definidas nos limites de transição entre padrões, como mostra a Figura 14.

Trata-se de uma bomba de 2 estágios, com 5 cavalo-vapor de potência com vazão mínima de 3,9 m³/h e vazão máxima de 15 m³/h, das figuras abaixo mostra as curvas que esta bomba possui variando a potência, vazão e pressão. A curva característica em questão é representada pela cor preta.

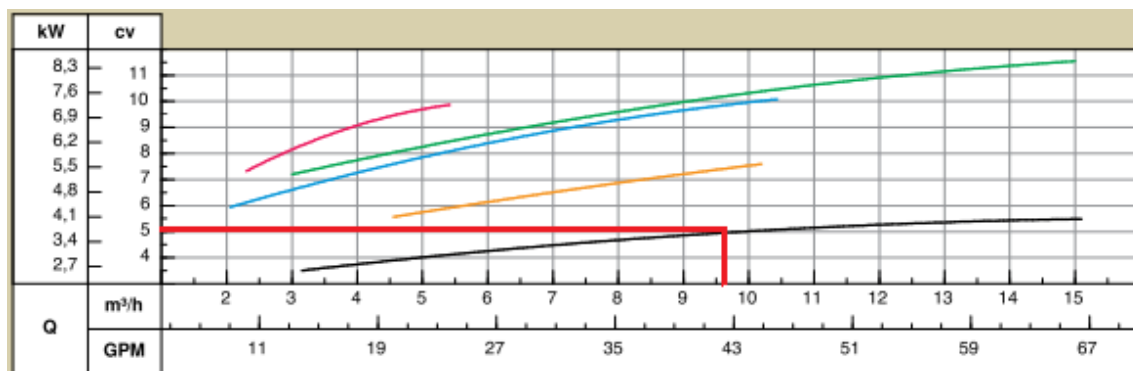


Figura 25: Curva de potência moto bomba Schneider
 Fonte: Schneider, 2019.

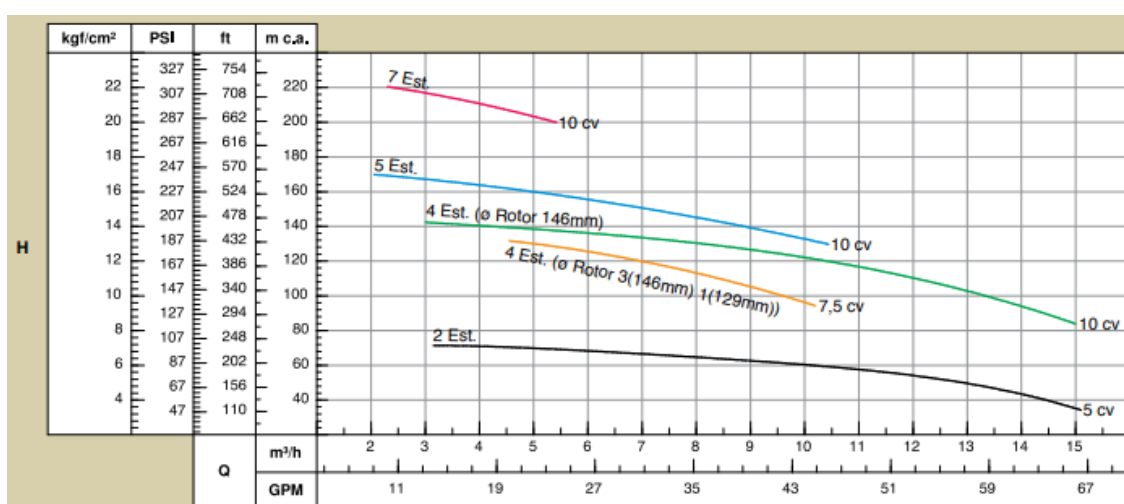


Figura 26: Curva característica moto bomba Schneider
 Fonte: Schneider, 2019.

A mesma observação foi realizada para a fase gasosa, analisando a Tabela 3, a maior velocidade superficial do gás é 82 m/s, equivalente a vazão de 165,3 m³/h, para tubulações de 0,0254 m, para atingir o padrão de escoamento anular, estratificado ondulado, intermitente e bolhas dispersas, a menor velocidade superficial do gás necessária é 0,03 m/s, equivalente a vazão de 0,06 m³/h, para tubulações de 0,0254 m, para atingir os padrões de escoamento estratificado liso e bolhas alongadas.

Para atingir tais velocidades superficiais da fase gasosa, foi escolhido o compressor da Chiaperini, CJ 20 + APV 250 litros, que possui 2 estágios, e possui o deslocamento teórico de 34 m³/h, sendo capaz de atingir altas vazões de gás no diâmetro da tubulação que será utilizado no experimento, de 0,0254 m. Logo, o

compressor escolhido atenderá os requisitos do projeto, para atingir os padrões que demandam altas vazões da fase gasosa.

	Deslocamento teórico	567 l/min - 20 pcm
	Pressão máxima	175 psi - 12 bar
	Reservatório	250L
	Tempo enchimento	6'29"
	Nº de cilindros	2
	Nº de estágios	2
	RPM do bloco	1050
	Motor elétrico	5 hp - 3.75 kW - 2P
	c/embalagem [mm]	1600x670x1260
	Óleo Lubrif. Volume	0.900 ml
	Peso do cabeçote	40 kg
	Peso c/ embal c/m	190 kg
	Ø Polia	128 mm
	Diâmetro do volante	422 mm
	Correia	A65

Figura 27: Descrições Técnicas do Compressor.
Fonte: Chiaperini, 2020.

Adicionalmente, utilizando a análise citada anteriormente nesta seção, sobre os limites mínimos e máximos das velocidades superficiais que as fases líquida e gasosa precisam atingir para observar os padrões de escoamento propostos pelos autores, foram selecionados os medidores de vazão para cada fase constituinte do escoamento bifásico, com base nas seguintes informações técnicas.

Código TCM	DN	Conexão ao processo					Faixa de medição (m³/h)	
		Roscas externas BSP	Roscas externas NPT	Flanges ANSI B16.5 #150 lbs RF	Flanges ANSI B16.5 #300 lbs RF	Flanges DIN PN10 a PN25	Líquido	Gás
12	1/2"	•	■				0,288 - 2,34	1,31 - 8,7
19	3/4"	•	■				0,633 - 6,8	3,42 - 33
25	1"	•	■	■	■	■	0,81 - 13,8	4,05 - 80,5
37	1.1/2"	•	■	■	■	■	1,71 - 2 9,5	8,64 - 204
50	2"	•	■	■	■	■	3,15 - 52	16,2 - 340
62	2.1/2"			•	■	■	5,58 - 91,8	22,5 - 850
75	3"			•	■	■	8,1 - 143,8	31,5 - 1020
100	4"			•	■	■	16,47 - 282,8	46,8 - 1.850
150	6"			•	■	■	42,12 - 648,8	459 - 4,453
200	8"			•	■	■	76,5-1082,6	738 - 8200

Figura 28: Descrições técnicas dos medidores de vazão.

Fonte: Rucken, 2020.

Com base nas informações, foi selecionado o modelo da Rucken para fase gasosa destacado em vermelho na Figura 28, apesar de não mensurar altíssimas vazões de ar, ele é capaz de mensurar vazões baixas de ar, a partir de 1,31 m³/h, sendo o suficiente para análise experimental em questão. Para a fase líquida foi selecionado o modelo da Rucken destacado em azul, por mensurar altas e baixas vazões, ou seja, de até 13,8 m³/h.

4.2 MONTAGEM DA BANCADA EXPERIMENTAL

Nesta seção, será apresentado como foi realizado a montagem da bancada experimental, após a escolha e fabricação dos equipamentos que irá constituir o circuito experimental, como disposto nesta seção.

Iniciando a construção da bancada, foi nivelado o suporte da tubulação de acrílico, pois, os pés selecionados permitem regular a inclinação de modo a deixar a tubulação retilínea ou com alguma angulação desejada. Para este trabalho foi regulado o suporte de modo a ficar completamente horizontal.

Em seguida, foi fixado o perfil de alumínio no suporte, permitindo assim a disposição da tubulação de acrílico. Consequentemente, a próxima etapa da montagem foi a disposição da tubulação de acrílico, que foi fixada no perfil por meio de cantoneiras e conectado umas às outras por meio da conexão de nylon, mostrada na Figura 19.

A linha de água e de ar foram montadas simultaneamente. Para a linha de água, tubulação de PVC de diâmetro interno de 1 polegada, foi utilizada para interconectar a bomba com o medidor de vazão. Na saída do medidor, foi conectado mangueiras até o início da tubulação de acrílico.

Adicionalmente, o reservatório de água foi conectado na entrada da bomba por meio de mangueira rígida, bem como a ligação elétrica da bomba foi realizada por meio do comando elétrico mostrado na Figura 22.

Já para a linha de ar, a tubulação de PVC de diâmetro interno de 1 polegada foi conectada na saída do compressor conectando o medidor de vazão de ar. A saída da tubulação em questão foi conectada mangueiras flexíveis, que foram introduzidas na entrada da conexão de nylon para assim injetar o fluido gasoso no escoamento.

Após a montagem das linhas de ar e de água, foram realizados os testes de partida da bomba e do compressor, seguindo religiosamente o manual técnico de cada equipamento. Detalhes sobre esta etapa será descrito na próxima seção.

Logo, após os passos citados, a bancada foi finalizada. A figura a seguir ilustra o real circuito experimental após a conclusão da montagem.



Figura 29: Circuito experimental.

4.3 METODOLOGIA DE ENSAIO

Antes de iniciar os experimentos da bancada, foi realizado segundo o manual técnico do compressor e da bomba, ambos referenciados neste trabalho, todas as etapas para a partida inicial destes equipamentos. A validação dos equipamentos elétricos, é importante para o seu correto e seguro funcionamento.

Após a partida inicial, os equipamentos citados podem ser utilizados por meio do acionamento direto, no caso do compressor via a chave magnética, e no caso da bomba, via o comando elétrico montado para essa finalidade.

Logo, para o experimento, é realizado o acionamento do compressor e da bomba, onde a vazão é mensurada através dos medidores de vazão instalados na linha de água e de ar, e em seguida os fluidos são injetados na tubulação de acrílico, para assim observar os padrões de escoamento em função da variação da vazão de cada fluido.

Para observar os diferentes padrões de escoamento possíveis para um escoamento bifásico horizontal, como mostrado na Figura 7, é realizado o controle da vazão de cada fluido presente no escoamento, aumentando ou diminuindo cada fase. Sendo assim possível reproduzir e validar o mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973, bem como a modelagem matemática proposta por Taitel e Dukler, 1976.

Adicionalmente, para possibilitar a mensuração das vazões dos fluidos presentes no escoamento bifásico ar-água, é necessário o funcionamento dos medidores de vazão, para assim atingir o objetivo proposto inicialmente.

No entanto, devido a Pandemia da Covid-19, as fontes elétricas que permitirão o funcionamento dos medidores em questão não foram entregues, logo não será possível a mensuração de vazão dos fluidos. Destaca-se que é o único instrumento restante para o funcionamento da bancada.

4.4 DADOS DISPONIBILIZADOS PELA BANCADA EXPERIMENTAL

Após a conclusão da montagem da bancada experimental e realização do experimento, os dados que serão disponibilizados por ela, para serem comparados com a modelagem proposta por Taitel e Dukler, 1976 e com os resultados obtidos por Mandhane, 1973, são:

1. Vazão do Líquido;
2. Vazão do gás;
3. Pressão em pontos estratégicos da tubulação; e
4. Área da tubulação.

Com esses dados será possível reproduzir o modelo matemático proposto por Taitel e Dukler, 1976 e o mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973. Com finalidade de validar de acordo com a teoria proposta pelos autores o correto funcionamento da bancada experimental, que simula o que acontece nas linhas de escoamento, uma das etapas da produção submarina de petróleo e gás.

Após a validação da bancada experimental, é possível realizar estudos com outros tipos de fluidos constituintes do escoamento multifásico, se aproximando com os fluídos que constitui realmente o escoamento retirado dos reservatórios. Uma vez que tanto a literatura quanto a bancada experimental permitem essa flexibilidade.

Com as vazões dos fluidos e a respectiva área da tubulação por onde o escoamento irá transitar, como mostrado na Equação 11 e na Equação 12, pode-se obter as velocidades superficiais do líquido e do gás para comparar com os dados apresentados na Figura 14, e elaboração do mapa de padrão de escoamento apresentado pela bancada construída.

As propriedades físicas dos fluidos constituintes do escoamento e os dados fornecidos pela bancada, também são suficientes para validar o modelo matemático proposto por Taitel e Dukler, 1976, descrito no item 3.3 deste trabalho.

Por fim, com os dados de pressão em pontos estratégicos da tubulação, pode-se mensurar a diferença de pressão entre o deslocamento do escoamento bifásico e horizontal e com isso analisar a influência que a diferença de pressão sofre em função dos padrões de escoamento.

4.5 PROBLEMAS E SOLUÇÕES

Nesta seção do trabalho serão descritos os problemas e as soluções encontradas durante o processo de escolha e construção da bancada experimental.

Inicialmente, uma boa sustentação para a tubulação de acrílico a qual será submetido o escoamento bifásico, é imprescindível, de modo que toda a estrutura que envolve o escoamento, não interfira nos resultados.

Conseqüentemente, a estrutura de sustentação foi projetada inicialmente em desenho geométrico, como mostra a Figura 30, de forma a transmitir na estrutura a ser fabricada todas as necessidades que o projeto possui, inclusive no possível desnível que o laboratório que será utilizado para a realização do experimento possa ter, ou seja, foi inserido pés no suporte que permitem ajustes para que a posição horizontal seja preservada de maneira absoluta.



Figura 30: Desenho geométrico do suporte da tubulação de acrílico.

Entretanto, o suporte planejado sofreu modificações durante a sua fabricação, de modo a intensificar o resultado que esperávamos com a sua utilização, como pode-se observar na Figura 18.

Para permitir a fixação da tubulação de acrílico no suporte em questão, foi utilizado um perfil de alumínio, como mostra a figura a seguir, possibilitando a inserção de cantoneiras para fixar a tubulação.

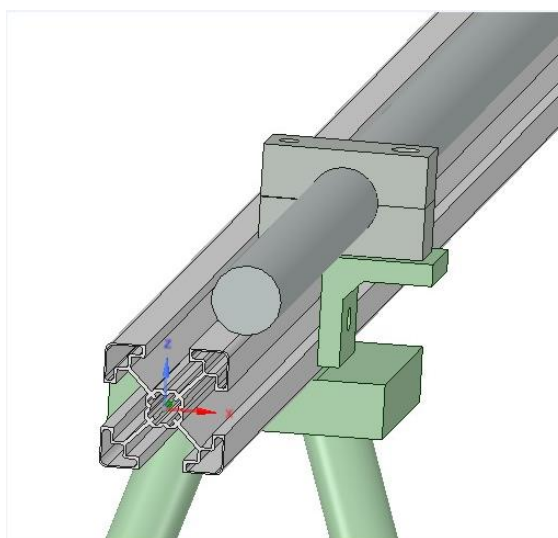


Figura 31: Perfil de alumínio.

No entanto, para trazer a sustentação que era almejada à tubulação de acrílico, foi necessário realizar a fabricação das cantoneiras sob medida a tubulação e ao perfil de alumínio, o resultado pode ser observado na Figura 32, e o planejamento técnico no Anexo III.



Figura 32: Cantoneira.

Em relação as linhas de ar e de água, foi necessário buscar soluções baratas e eficientes para realizar as ligações entre a bomba, compressor e a tubulação de acrílico. Como discutido anteriormente neste trabalho, a potência da bomba e do compressor escolhidos são altas, resultando naturalmente em preocupações quanto ao escoamento desses fluidos até a tubulação de acrílico, sem que haja vazamentos, influenciando nos resultados da bancada.

Logo, tubulações de PVC com capacidade para sustentar o escoamento o qual serão submetidas, foram escolhidas, bem como mangueiras que realizarão essa transição até a tubulação de acrílico.

Porém, mesmo com tamanho cuidado na hora da escolha dos instrumentos para a construção das linhas de ar e água, houve problemas relacionados ao vazamentos dos fluidos, principalmente na linha de água, as conexões entre as tubulações de PVC, pode-se observar vazamento, sendo necessário algumas modificações para que não interfira nos resultados.

4.5.1 Covid-19

A partir da segunda quinzena de março de 2020, o Brasil começou a ser atingido fortemente pela pandemia do Covid-19. Afetando todas as atividades do país,

como por exemplo, a educação, pois medidas de contenção tiveram que ser cumpridas e a população entrou em quarentena, com exceção apenas das atividades essenciais definidas pelo governo brasileiro.

Conseqüentemente, afetou a continuidade da finalização da bancada experimental discutida neste trabalho, a qual estava quase pronta, restando pequenos detalhes que serão discutidos nesta seção.

Primeiramente, restava a compra de um componente elétrico, a fonte de energia para os medidores de vazão, para permitir a mensuração da vazão dos fluidos constituintes do escoamento, e conseqüentemente a correta validação da bancada que é objetivo deste trabalho.

Este equipamento foi solicitado pela Universidade durante o período de pandemia, porém, devido ao atraso nos serviços de entregas, não chegou em tempo hábil para a efetuação dos experimentos e apresentação deste trabalho.

Outro ponto que restava para a conclusão da bancada, se trata dos vazamentos observados especialmente na linha de água, que necessitam de pequenos ajustes para que não influencie nos resultados gerados pela bancada experimental. Pelo mesmo motivo, pelas medidas de contenção da pandemia, não foi possível realizar a compra dos equipamentos necessários para os ajustes, bem como realizar esses ajustes na universidade, devido das medidas tomadas para a proteção aos estudantes da instituição.

Logo, uma solução encontrada para a apresentação deste presente trabalho, será utilizar dados já existentes de bancadas similares. Com isso, foram solicitados dados da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), bem como utilizado dados obtidos por Felipe Chagas Storti, em sua tese de Doutorado defendida em 2013.

4.5.1.1 Condições da bancada experimental da Unicamp

De forma a contextualizar o vínculo do projeto da bancada experimental discutida neste trabalho com a bancada experimental da Unicamp, o Professor orientador do projeto, Felipe Storti, foi pesquisador na Universidade Estadual de

Campinas, e defendeu sua tese de doutorado na mesma universidade, na área de escoamento multifásico, com ênfase em fluidos de petróleo.

Com isso, durante a construção da bancada era solicitado opinião dos professores da Unicamp, que tratam diretamente das pesquisas de escoamento multifásico, voltadas principalmente a indústria de petróleo e gás. Isso acontecia principalmente por eles já possuírem em suas instalações bancadas semelhantes, as quais foram utilizadas de inspiração em boa parte do projeto, adaptando para a realidade dos laboratórios da UnB e fazendo melhorias.

Diante ao exposto, solicitamos ao Professor da Unicamp, Marcelo Souza Castro, dados da bancada experimental que será caracterizada a seguir.

A bancada em que os dados serão analisados na próxima seção deste trabalho, possuía as mesmas características de construção que a bancada descrita neste trabalho, como por exemplo, estava disposta horizontalmente e possuía uma tubulação a qual seria submetida ao escoamento bifásico ar-água.

O que muda da bancada apresentada neste trabalho, é apenas o tamanho dos instrumentos utilizados, por exemplo, o comprimento da tubulação, que são 10 metros, e o diâmetro interno da tubulação, que é 0,052 metros, como mostra a Figura 33.

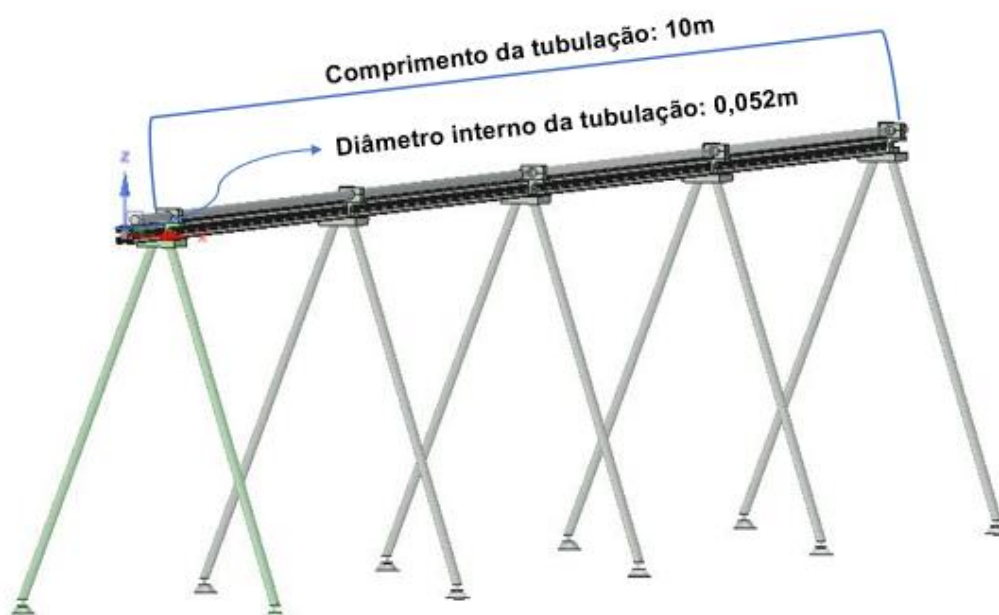


Figura 33: Esquemático da bancada experimental da Unicamp.

Vale ressaltar que essa variação na tubulação utilizada não impossibilita a utilização dos modelos teórico e matemático discutidos neste trabalho, pois estão dentro dos limites de tamanho, da tubulação e do diâmetro interno, propostos pelos autores.

Por fim, na seção 5, que será apresentado os resultados, bem como análise dos dados obtidos na bancada experimental da Unicamp.

4.5.1.2 Condições da bancada experimental Storti, 2013

A Tese de Doutorado defendida por Felipe Chagas Storti em 2013, trata-se de um estudo experimental da eficiência de separação submarina VASPS (Vertical Annular Separation and Pumping System), no qual foram realizados testes de eficiência de separação dos fluídos ar-água e da mistura ar-glicerina.

Porém, antes da entrada dos fluídos na câmara de separação, o escoamento bifásico é desenvolvido em uma tubulação horizontal, como mostra a figura a seguir, onde se pode analisar o comportamento do escoamento sob a influência da variação da vazão de cada fluido presente no escoamento bifásico. Em síntese, o experimento disposto no trabalho em questão, Storti, 2013, também permite a conclusão dos objetivos deste trabalho.



Figura 34: Tubulação do experimento analisada por Storti, 2013.

Como na bancada experimental construída e apresentada neste trabalho, a tubulação apresentada na Figura 34, possui o diâmetro interno de 0,0254 m, porém o comprimento é de cerca de 1 metro, onde o escoamento foi desenvolvido.

Logo, com base nos resultados obtidos pelas bancadas experimentais apresentadas, serão analisados seus respectivos dados experimentais na próxima seção.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido a pandemia do Covid-19, esta seção será apresentada de maneira diferente. Como disposto anteriormente, o término da construção da bancada experimental, bem como a realização dos experimentos foram inviabilizados devido as medidas de contenção da pandemia, e como solução serão analisados dados de bancadas similares, detalhadas na seção 4.5.1.

Vale ressaltar que o objetivo continua o mesmo, será analisado a efetividade para escoamentos bifásico das teses apresentadas na seção 3 deste trabalho, ou seja, o modelo matemático proposto por Taitel e Dukler, 1976 e o mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973.

Inicialmente, de modo a facilitar o entendimento da análise dos dados experimentais a ser realizada nesta seção, será apresentada uma interpretação detalhada das teses apresentadas na seção 3 deste trabalho.

Como disposto anteriormente, Taitel e Dukler, 1976, propõe uma modelagem matemática em função de algumas variáveis, tais como as propriedades físicas e experimentais e velocidades superficiais dos fluidos constituintes do escoamento, de modo a analisar a transição dos padrões de escoamento bifásico horizontal.

Dessa forma, Taitel e Dukler, 1976 também apresentam mapa de padrão de escoamento para escoamento bifásico em tubulação horizontal e levemente inclinada, disponível na Figura 9 e na Figura 10 deste trabalho. As coordenadas do mapa são definidas pelos próprios autores, e levam em consideração propriedades físicas, condições experimentais, como diâmetro da tubulação, e velocidade superficial dos fluidos constituintes do escoamento, como pode-se observar na Equação 18 e na Equação 19.

Adicionalmente, também foi apresentado neste trabalho a tese do Mandhane, 1973, a qual dispõe mapa de padrão de escoamento bifásico horizontal, para fluidos ar-água. O autor apresenta o passo a passo da construção do seu mapa, disponibilizando as coordenadas de transição utilizadas entre os padrões de escoamento, como mostra a Tabela 3, e o cálculo da correção das propriedades físicas, também utilizado pelo autor, como disposto na Equação 60 e na Equação 61

Portanto, foi possível reproduzir o mapa proposto por Mandhane, 1973, como disposto a seguir. As coordenadas do mapa são as próprias velocidades superficiais dos fluidos constituintes do escoamento, entretanto, foram redefinidas em escala logarítmicas, de modo a facilitar o entendimento, quando se tratar de velocidades muito baixas e/ou altas.

Além disso, também foram aplicadas as correções das propriedades físicas propostas pelo autor. Logo, o mapa a seguir representa o resultado da reprodução do mapa definido por Mandhane, 1973, observa-se semelhança com o mapa da Figura 14. Este mapa servirá de base para análise dos dados das bancadas experimentais apresentadas na seção 4.5.1.

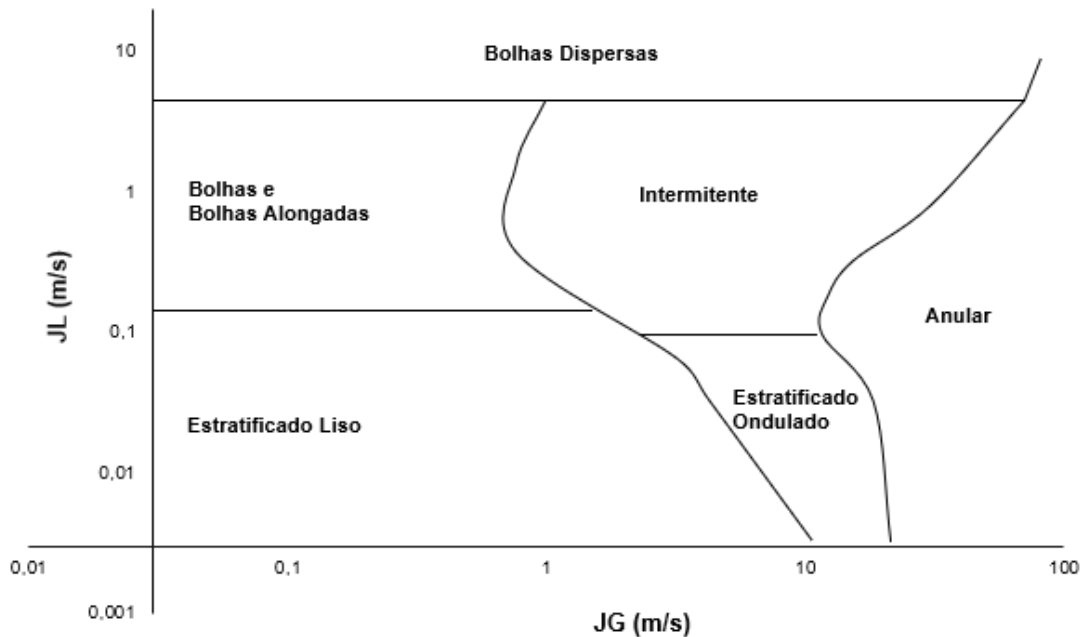


Figura 35: Mapa reproduzido dos padrões de escoamento bifásico ar-água em tubulação horizontal.

Tanto para a análise matemática comparativa entre a transição dos padrões de escoamento, quanto para análise do mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973, quando se tratar do escoamento ar-água, serão utilizadas as seguintes propriedades físicas, por se tratar dos mesmos fluidos constituintes do escoamento.

Tabela 4: Propriedades físicas utilizadas experimentalmente.

Propriedades	
$\rho(\text{ar}) \text{ kg/m}^3$	1,2
$\mu (\text{ar}) \text{ cP}$	0,02
$\rho(\text{água}) \text{ kg/m}^3$	998
$\mu (\text{água}) \text{ cP}$	1
$\sigma (\text{mN/m})$	73

O comportamento dos padrões de escoamento será analisado em ambos os mapas apresentados, ou seja, tanto o mapa proposto por Taitel e Dukler, 1976, quanto o mapa proposto por Mandhane, 1973, de modo a verificar semelhança entre as teses apresentadas.

Por fim, todos os cálculos realizados nesta seção, foram realizados via Excel, disponível para consulta no Anexo II. A seguir será apresentado os resultados dos dados experimentais obtidos por Storti, 2013 e pelo professor Marcelo Castro da Unicamp, ambas as bancadas foram detalhadas anteriormente na seção 4.

5.1 RESULTADOS STORTI, 2013

A bancada experimental apresentada na seção 4.5.1.2, resultou nos dados disponível no Anexo I, Tabelas A, C, D e E, os quais serão analisados na presente seção. Na bancada em questão, anteriormente à entrada da câmara de separação, o escoamento bifásico é submetido à uma tubulação horizontal, com diâmetro interno de 0,0254 m. Vale destacar que esse é o mesmo diâmetro da tubulação selecionada para a bancada construída na Universidade de Brasília, apresentada neste trabalho, na seção 4.

Os dados mensurados pelo medidor de vazão estão disponíveis no Anexo I, Tabelas A, C, D e E, através deles foi possível analisar o comportamento do escoamento bifásico em função da variação de vazão dos fluidos, e com isso verificar

a semelhança e validade do modelo apresentado por Mandhane, 1973 e do modelo matemático disposto por Taitel e Dukler, 1976, como mostra a seguir.

5.1.1 Análise do modelo proposto por Mandhane, 1973

Primeiramente, para cálculo da correção das propriedades físicas, assim como propõe Mandhane, 1973 a Equação 60 e a Equação 61, foram utilizados os valores das propriedades físicas apresentados na Tabela 4. Posteriormente, os fatores de correção foram aplicados assim como determina a Tabela 3.

Vale lembrar que todo o cálculo, bem como a reprodução dos pontos no mapa foram realizados via Excel, disponível no Anexo II. Com isso, em seguida foram transformadas as medidas de vazão de cada fluido mensuradas pelos medidores de vazão da bancada experimental, em velocidade superficial do ar e da água, na unidade de medida metros por segundo (m/s). Para isso, foram utilizadas a Equação 11 e a Equação 12.

Após realizar os cálculos citados, de modo a transformar os dados experimentais na mesma base do mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973, foi possível observar o comportamento do escoamento bifásico horizontal ar-água, como mostra a figura a seguir.

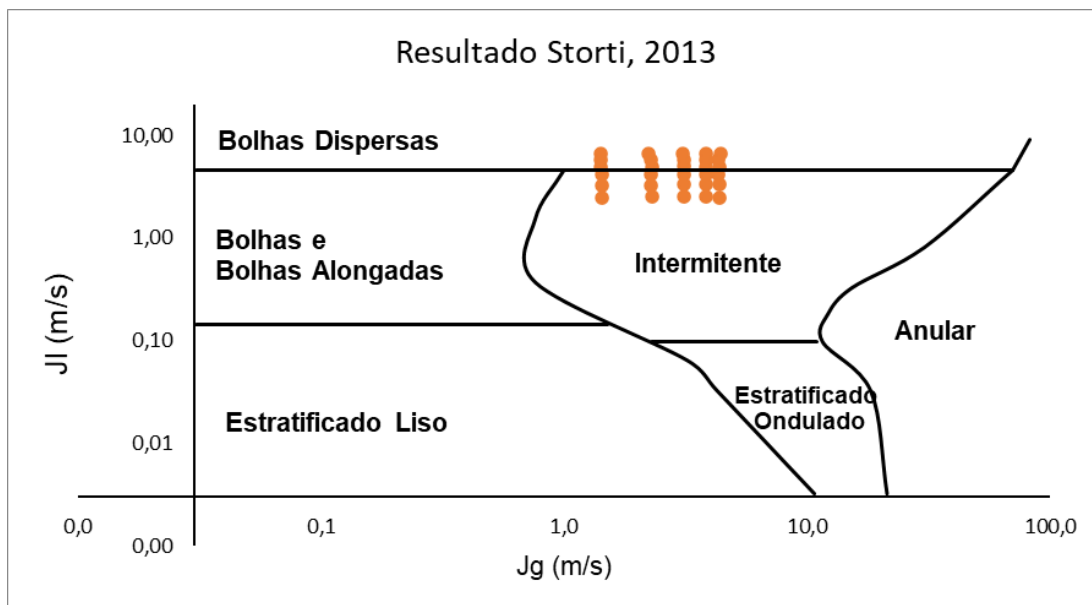


Figura 36: Resultados ar-água Storti, 2013 para mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973.

Pode-se observar que os dados obtidos transitam entre os padrões de escoamento intermitente e de bolhas dispersas, característica de escoamentos com altas vazões de água e moderadas vazões de ar. Essas características foram observadas experimentalmente por Storti, 2013.

O autor também realizou experimentos com outros tipos de fluidos, como arglicerina, variando a viscosidade da glicerina em 83 cP, 53 cP e 23 cP, de modo a também analisar o comportamento desse tipo de escoamento bifásico na tese proposta por Madhane, 1973.

Apesar do modelo proposto por Mandhane, 1973 não ter analisado comportamento de fluidos diferentes de ar-água, toda sua tese é em função das propriedades físicas dos fluidos constituintes do escoamento bifásico horizontal, ou seja, pode ser aplicado à outros fluidos ou até mesmo em condições experimentais distintas as utilizadas pelo autor, como variação do comprimento da tubulação e do diâmetro interno, para isso ele apresenta faixas que tais variações são aceitáveis para sua tese sem perda de eficiência, como apontado na seção 3.4.

Posto isso, o objetivo é comparar a diferença do comportamento do escoamento bifásico ar-água com o escoamento ar-glicerina. Dessa forma, foi

reproduzido novamente o mapa base proposto por Mandhane, 1973, de modo a representar o escoamento ar-glicerina, aplicando a correção das propriedades físicas nos limites de transição do mapa, só que agora com as características dos novos fluidos constituintes.

O mapa de padrão de escoamento bifásico horizontal ar-glicerina, foi reproduzido seguindo os mesmos passos dispostos anteriormente nesta seção para reprodução do mapa de padrão de escoamento ar-água apresentado na Figura 35, sendo a única diferença o valor das propriedades físicas, utilizando os valores dispostos na Tabela 5, o resultado foi o seguinte.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros usados como critério para o sistema ar-água e ar-glicerina.

Mistura									
Ar-água					Ar-glicerina				
ρ_L	ρ_G	μ_L	μ_G	σ	ρ_L	ρ_G	μ_L	μ_G	σ
[kg/m ³]	[kg/m ³]	[cP]	[cP]	[mN/m]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[cP]	[cP]	[mN/m]
998	1,2	1	0,02	73	1259	1,2	83/53/23	0,02	63

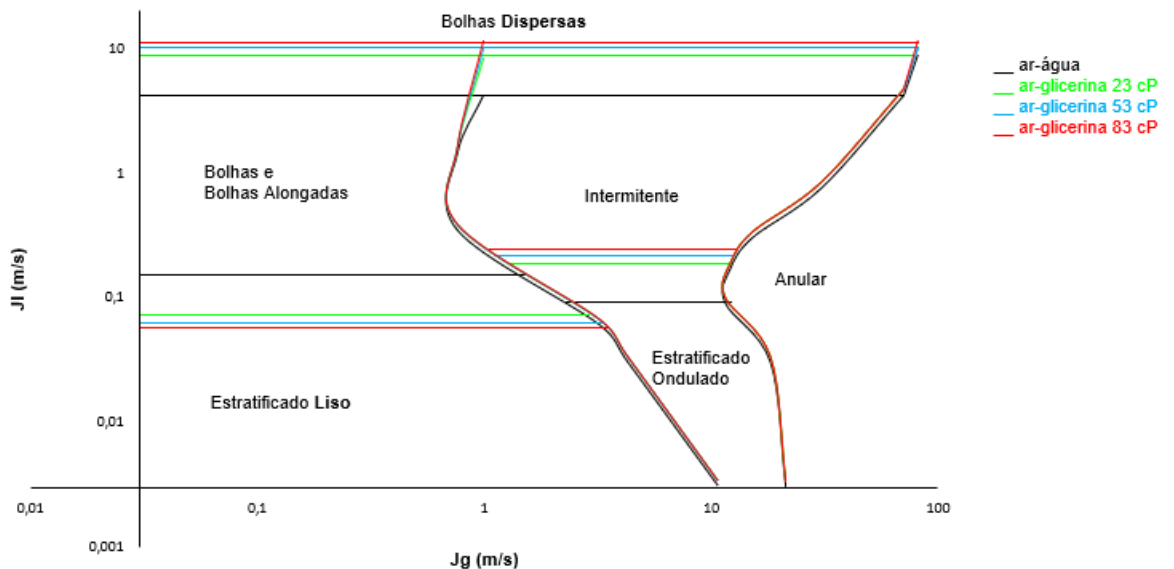


Figura 37: Comparação dos mapas de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane, 1973 para diferentes misturas.

Com a reprodução do mapa para o escoamento ar-glicerina, Figura 37, pode-se observar que há deslocamento das linhas horizontais dos limites dos padrões de escoamento do mapa proposto por Mandhane, 1973, quando se aplica a nova correção das propriedades físicas. Já as linhas verticais dos limites de transição não apresentaram grandes variações, pois as propriedades físicas do ar foram mantidas iguais para as todas as misturas.

No Anexo I, Tabelas C, D e E, encontram-se as vazões obtidas experimentalmente por Storti, 2013 com os escoamentos ar-glicerina, as quais foram utilizadas para se obter as velocidades superficiais de cada fluido em cada ponto mensurado, por meio da Equação 11 e da Equação 12. Com isso, obteve os seguinte comportamento dos escoamentos ar-glicerina, variando a viscosidade da glicerina em 83 cP, 53 cP e 23 cP.

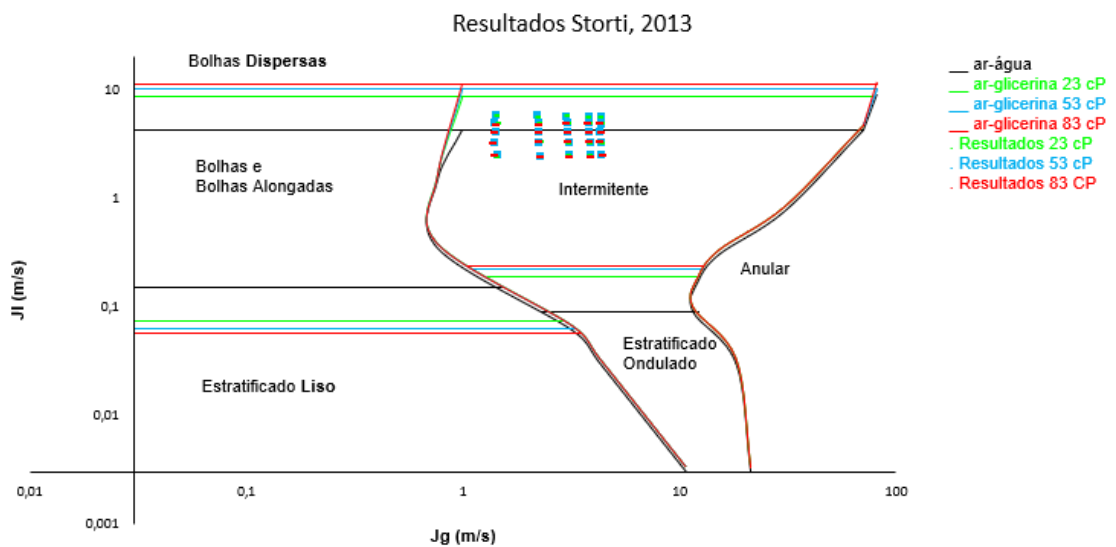


Figura 38: Resultados ar-glicerina Storti, 2013 para mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973.

Todos os escoamentos bifásicos apresentados na Figura 38 e na Figura 36, foram submetidos a mesma variação de vazão. Com isso pode-se observar que com a mudança de água para glicerina no escoamento bifásico, o escoamento possui característica apenas intermitente, segundo o modelo proposto por Mandhane, 1973,

diferentemente do escoamento ar-água, que transitou entre os padrões intermitente e bolhas dispersas.

Já em relação a variação da viscosidade da glicerina, nota-se que mesmo os escoamentos submetidos à mesma variação de vazão, eles mantiveram praticamente a mesma característica, ou seja, todos se mantiveram no padrão intermitente.

Vale destacar que as características analisadas neste trabalho, foram validadas experimentalmente por Storti, 2013.

Por fim, podemos refletir sobre a funcionalidade do modelo proposto por Mandhane, 1973 para outros tipos de escoamento, não só ar-água, podendo assim ser utilizado para outros fluidos constituintes do escoamento bifásico, inclusive diferentes diâmetro da tubulação.

5.1.2 Análise do modelo proposto por Taitel e Dukler, 1976

De modo a conferir o comportamento dos dados experimentais de Storti, 2013 para o mapa de padrão de escoamento bifásico horizontal proposto por Taitel e Dukler, 1976, foi realizado o cálculo das coordenadas do mapa em questão, como apresentado na Equação 18 e na Equação 19, para cada ponto mensurado experimentalmente e disposto no Anexo I, Tabela A, e assim analisado o comportamento desses dados no mapa em questão, como apresentado a seguir.

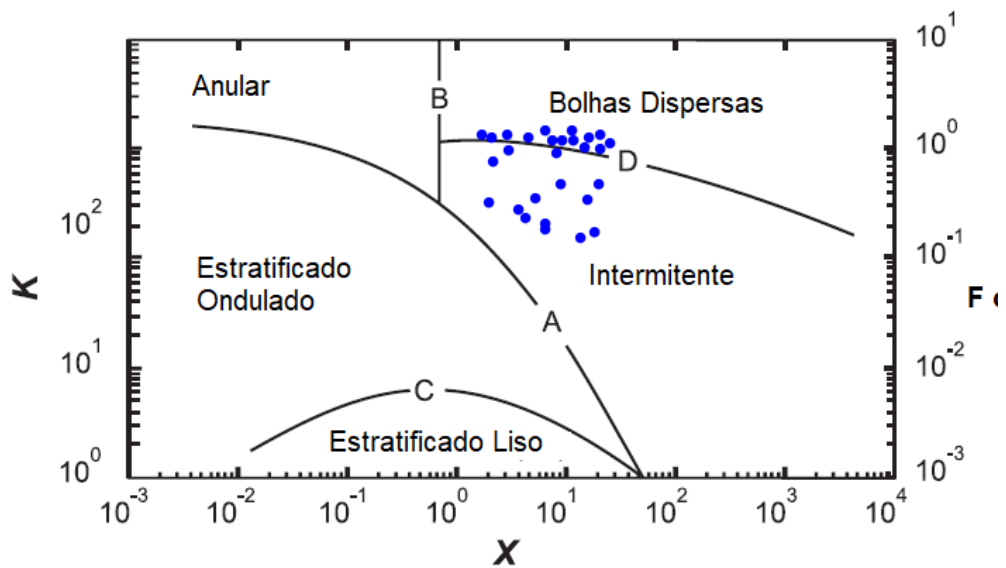


Figura 39: Resultados Storti, 2013 ar-água para mapa de padrão de escoamento proposto por Taitel e Dukler, 1976.

Como pode-se observar o escoamento ar-água transitou entre os padrões intermitente e bolhas dispersas, assim como observado no mapa proposto por Mandhane, 1973. Dessa forma, será analisado se tal transição também é atendida segundo a modelagem matemática proposta pelos autores.

Conseqüentemente, devido a transição entre os padrões intermitente e bolhas dispersas observado tanto na Figura 36 quanto na Figura 37 dos dados experimentais de Storti, 2013, será utilizado o equacionamento disposto na subseção 3.3.5, que trata exatamente da transição entre os padrões em questão.

De modo a contextualizar, a Equação 63 transmite a condição, que segundo os autores Taitel e Dukler, 1976 acontece a transição entre esses padrões de escoamento, sendo ela:

$$V_L \geq \sqrt{\frac{4 \cdot A_G \cdot g \cdot \cos \theta}{S_I \cdot f_L} \cdot \left(1 - \frac{\rho_G}{\rho_L}\right)} \quad \text{Equação 63}$$

Onde, f_L representa o fator de atrito da fase líquida, g a gravidade, A_G a área ocupada pela fase gasosa, S_I o perímetro úmido da interface e ρ a massa específica

das fases constituintes do escoamento. As propriedades físicas necessária para cálculo da Equação 63, serão utilizadas as disponíveis na Tabela 4.

Como disposto na seção 3.3.1 deste trabalho, o ponto de partida da modelagem dos autores, é por meio do padrão de escoamento estratificado em equilíbrio, onde em busca de estimar o nível do líquido (h_L) neste padrão, os autores propõem uma análise via variáveis adimensionais, que serão necessárias para as demais condições de transição entre padrões dispostas no modelo.

Neste caso, de transição entre os padrões intermitente e bolhas dispersas, é necessário estimar a área ocupada pela fase gasosa, como apontado na Equação 63. Para isso, foi necessário utilizar as relações adimensionais propostas pelos autores, como disposta na Equação 30 para a fase líquida, só que neste caso foram utilizadas equações para fase gasosa, como mostra a seguir.

Onde,

$$\widetilde{A}_G = \frac{A_G}{D^2}, \quad \text{Equação 64}$$

$$\widetilde{A}_G = 0,25 \cdot \left[\cos^{-1}(2 \cdot \widetilde{h}_L - 1) + (2 \cdot \widetilde{h}_L - 1) \sqrt{1 - (2 \cdot \widetilde{h}_L - 1)^2} \right]; \text{ e} \quad \text{Equação 65}$$

$$\widetilde{h}_L = \frac{h_L}{A} \quad \text{Equação 66}$$

Onde, h_L representa a altura do líquido e A, a área da tubulação.

Após o cálculo de todo equacionamento citado, disponível no Anexo II, o seguinte critério de comparação para transição entre os padrões de escoamento intermitente e bolhas dispersas foi obtido.

$$V_L \geq 0,78659 \text{ m/s}$$

Comparando os dados experimentais obtidos por Storti, 2013, conforme disposto no Anexo I, Tabela A, pode-se concluir que o modelo matemático proposto pelos autores Taitel e Dukler, 1976 foi validado, pois todos os pontos de medição obtiveram uma velocidade superficial e real do líquido superior à 0,78659 m/s.

Entende-se que ao obter a velocidade do líquido maior ou igual a 0,78659 m/s pode-se observar a transição entre os padrões de escoamento intermitente e bolhas dispersas. Por outro lado, se a desigualdade não for satisfeita, o padrão de escoamento predominante é intermitente.

Uma segunda análise pode ser realizada também para a modelagem matemática de Taitel e Dukler, 1976, agora com os dados obtidos por Storti, 2013, referente ao escoamento ar-glicerina, com variação na viscosidade da glicerina em 83 cP, 53 cP e 23 cP.

Ao aplicar as condições e dados experimentais obtidos Storti, 2013, nas coordenadas dispostas na Equação 18 e na Equação 19, podemos observar o seguinte comportamento para o escoamento ar-glicerina, que foi submetido à mesma variação de vazão ar-água, como destacado anteriormente.

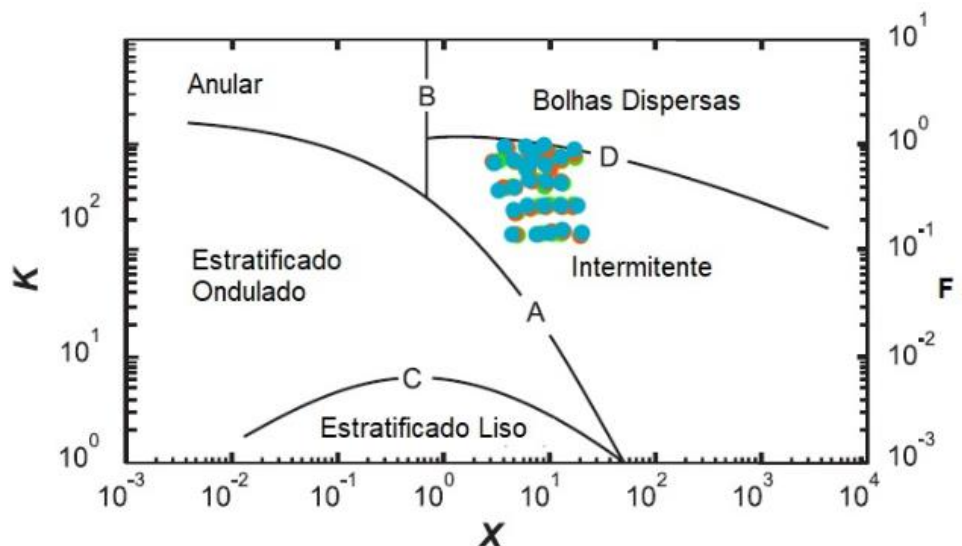


Figura 40: Resultado ar-glicerina Storti, 2013 para mapa de padrão de escoamento proposto por Taitel e Dukler, 1976.

Podemos concluir que o comportamento do escoamento bifásico ar-glicerina obteve comportamento similar ao observado no mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973, ou seja, o escoamento se manteve predominância do padrão de escoamento intermitente, com alguns pontos na transição para o padrão bolhas dispersas.

Portanto, pode-se analisar o comportamento do escoamento ar-glicerina, considerando as variações da viscosidade da glicerina em 83 cP, 53 cP e 23 cP, segundo o equacionamento proposto por Taitel e Dukler, 1976, para a transição entre os padrões de escoamento intermitente e bolhas dispersas.

Obedecendo rigorosamente os cálculos apresentados anteriormente nesta subseção, por também se tratar da transição do escoamento intermitente para bolhas dispersas, obteve as seguintes equações comparativas para a viscosidade da glicerina 83 cP, 53 cP e 23 cP, respectivamente.

$$V_L \geq 0,09705 \text{ m/s};$$

$$V_L \geq 0,12145 \text{ m/s}; \text{ e}$$

$$V_L \geq 0,18437 \text{ m/s}.$$

Todos os dados experimentais dispostos no Anexo I, Tabelas C, D e E atendem às expressões comparativas apresentadas acima, de modo que entende-se que ocorre transição entre os padrões de escoamento intermitente e bolhas dispersas.

5.2 RESULTADOS UNICAMP

Dando continuidade à análise dos resultados obtidos pelas bancadas experimentais apresentadas anteriormente, agora com ênfase na bancada descrita na seção 4.5.1.1, que resultou os dados disponíveis no Anexo I, Tabela B, os quais serão analisados na presente seção.

Destaca-se que a tubulação da bancada analisada, ilustrada na Figura 33, possui 4 metros a mais de comprimento e o diâmetro interno é 2 vezes maior ao escolhido para a bancada construída na Universidade de Brasília. Essas variações são positivas, pois permitem analisar a eficiência dos modelos em condições diversas, e em especial essas variações propostas são previstas em ambos os modelos utilizados, seja para tubulações com comprimentos maiores, ou diâmetro maior, como bem citado anteriormente neste trabalho.

A seguir serão apresentados os resultados da bancada construída na Unicamp, e coordenada pelo Professor Marcelo Castro, com base nos modelos discutidos neste trabalho, ou seja, modelo apresentado por Mandhane, 1973, e o modelo matemático disposto por Taitel e Dukler, 1976.

5.2.1 Análise do modelo proposto por Mandhane, 1973

O mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973 foi reproduzido assim como foi realizado na análise dos dados da tese de Storti, 2013, disposto na subseção 5.1.1 deste trabalho, para ser utilizado de base para análise dos dados obtidos experimentalmente na bancada da Unicamp em 2020.

Sendo assim, para o cálculo da correção das propriedades físicas, como dita o modelo de Mandhane, 1973 por meio da Equação 60 e da Equação 61, foram utilizado os dados disponíveis na Tabela 4. Nota-se que as propriedades em questão obedecem a faixa de variação em que tal modelo é recomendado, como representado na Tabela 2.

Após o cálculo das variáveis de correção, o autor propõe que sejam aplicadas nos limites de transição entre os padrões de escoamento, como mostra a Tabela 3, e assim foi feito para presente análise dos dados experimentais.

Em seguida, iniciando o tratamento dos dados de vazão mensurados pelos medidores de vazão, foi calculado a área total da tubulação, para posteriormente ser possível obter os valores das velocidades superficiais de cada fluido, como mostra a Equação 11 e a Equação 12, para assim ser analisar o comportamento do escoamento dentro dos padrões estipulados por Mandhane, 1973.

Dessa forma, com base nos dados experimentais apresentados no Anexo I, Tabela B, o comportamento do escoamento bifásico na base proposta por Mandhane, 1973 é possível observar na figura a seguir.

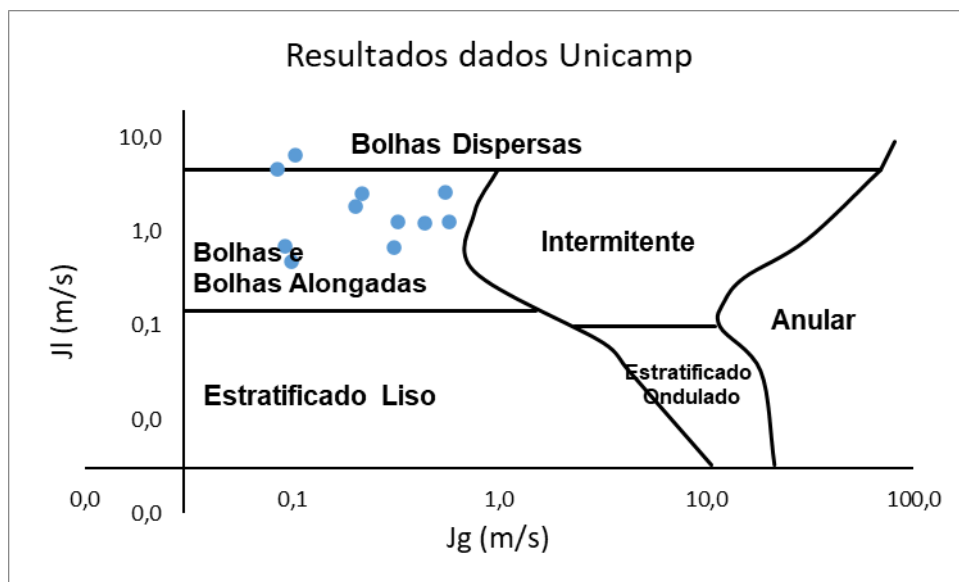


Figura 41: Resultados ar-água Unicamp, 2020 segundo o mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1973.

Pode-se observar que diferentemente dos resultados obtidos com os dados de Storti, 2013, o escoamento se manteve principalmente no padrão de escoamento bolhas, bolhas alongadas e bolhas dispersas. Isso porque as vazões de gás foram bastante inferiores as vazões de água, caracterizando um escoamento com predominância do líquido, com bolhas no seu interior.

5.2.2 Análise do modelo proposto por Taitel e Dukler, 1976

De modo a conferir o comportamento do dados experimentais da Unicamp para o mapa de padrão de escoamento bifásico horizontal apresentado por Taitel e Dukler, 1976, foi realizado o cálculo das coordenadas do mapa em questão, como apresentado na Equação 18 e na Equação 19, com base nos dados disponíveis no Anexo I, Tabela B, e assim analisado o comportamento desses dados no mapa, como apresentado a seguir.

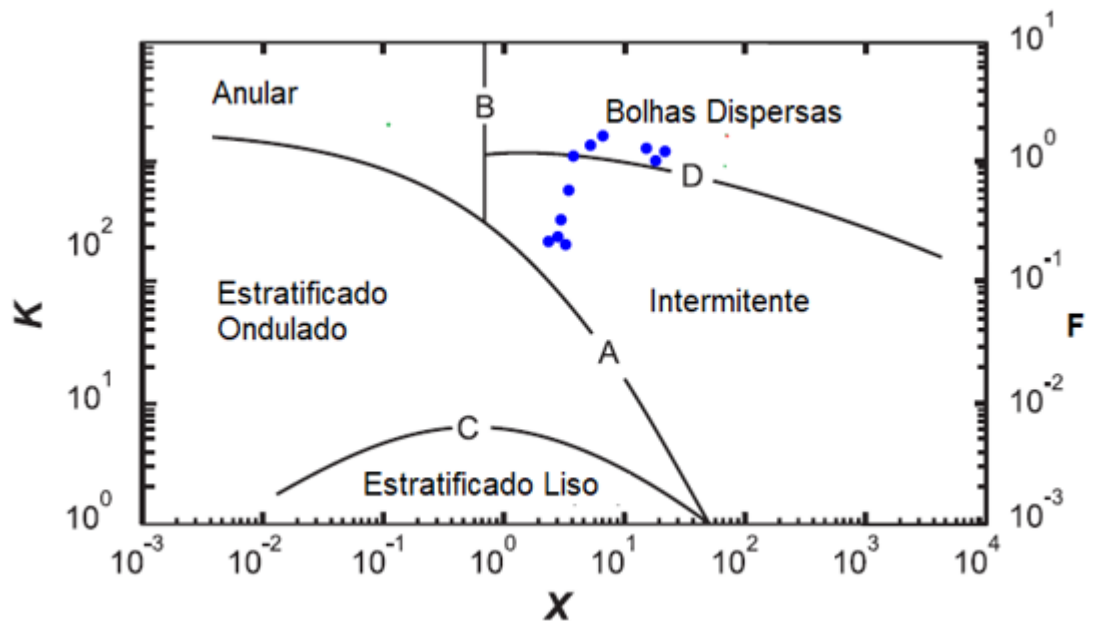


Figura 42: Resultado ar-água Unicamp, 2020 segundo o mapa de padrão de escoamento proposto por Taitel e Dukler, 1976.

O mapa de padrão de escoamento proposto de Taitel e Dukler, 1976, não diferencia os padrões de escoamento bolhas, bolhas alongadas e dispersas como o mapa proposto por Mandhane, 1973, reconhecendo um único padrão de escoamento com presença de bolhas em seu interior, o padrão bolhas dispersas, caracterizado por um escoamento com predominância de líquido, devido às altas vazões da fase líquida e baixas vazões da fase gasosa.

Ressalta-se também que o mapa em questão não possui suas coordenadas em função exclusiva da velocidade superficial das fases, sendo uma das constituintes para cálculo das coordenadas, mas não única. Dessa forma, observa-se um comportamento distinto ao de Mandhane, 1973, com transição entre os padrões intermitente e bolhas dispersas.

Dessa forma, será analisado a modelagem matemática disposta no equacionamento da seção 3.3.5, que trata exatamente da transição entre os padrões em questão.

Por se tratar do mesmo equacionamento utilizado na análise de Storti, 2013, não será duplicado os cálculos. As propriedades utilizadas constam na Tabela 4, e o passo a passo dos cálculos seguem exatamente o descrito anteriormente na seção 5.1.2, que pode ser conferido no Anexo II. Dessa forma, a equação comparativa obtida para analisar a transição entre os padrões intermitente e bolhas dispersas pode ser observada a seguir.

$$V_L \geq 1,67229 \text{ m/s}$$

Neste caso, comparando os dados experimentais obtidos por Marcelo Castro da Unicamp, 2020, conforme disposto no Anexo I, Tabela B, pode-se observar que há dados experimentais em que a velocidade superficial é inferior à 1,67229 m/s, e há dados que a velocidade superficial atende a expressão comparativa.

Logo, pode-se concluir que o modelo matemático proposto pelos autores Taitel e Dukler, 1976 foi validado, pois, segundo os autores valor inferior à expressão, o escoamento encontra-se no padrão intermitente e valor superior no padrão bolhas dispersas, caracterizando a transição, como mostra a Figura 42.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dados de bancadas experimentais similares à construída na Universidade de Brasília foram utilizados diante das restrições apresentadas na seção 4.5. Dessa forma, tais dados foram analisados com base nos modelos propostos por Mandhane, 1973 e por Taitel e Dukler, 1976. Concluindo os objetivos gerais e específicos no presente trabalho.

A bancada experimental analisada por Storti, 2013, bem como a bancada operada na Unicamp pelo professor Marcelo Castro, possuem semelhanças com a construída na Universidade de Brasília, como comentadas na seção 4.5.1, portanto, apesar de não ser utilizado os dados da bancada experimental da UnB, o processo de planejamento e construção foi importante e essencial para conhecimento técnico e operacional de cada equipamento constituinte.

Quanto aos resultados analisados na seção 5, o modelo proposto por Mandhane, 1976, permitiu observar o comportamento do escoamento bifásico em função da variação da velocidade superficial de cada fluido constituinte, onde pode-se concluir que baixas vazões da fase gasosa e altas vazões da fase líquida, pode ocorrer presença de bolhas no interior da fase líquida, que é predominante.

Adicionalmente, apesar do mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane, 1976, ter sido construído para o escoamento horizontal bifásico ar-água, foi reproduzido e analisado o mapa para o escoamento horizontal ar-glicerina, com base nas premissas utilizadas pelo autor na construção do mapa original, modificando as propriedades físicas e experimentais com base no escoamento em questão. Observando assim a possibilidade da implementação do modelo para demais fluidos constituintes de escoamentos bifásicos, bem como diferentes diâmetros, uma vez que as bancadas analisadas possuem essa característica.

Uma segunda análise a respeito do comportamento do escoamento bifásico foi realizada, dessa vez em relação ao mapa de padrão de escoamento proposto por Taitel e Dukler, 1976. De modo geral, pode-se observar os mesmos padrões de escoamento dispostos no mapa proposto por Mandhane, 1973.

Dessa forma, após análise do comportamento dos dados experimentais dos escoamentos bifásico, foi possível o conhecimento prévio dos padrões de escoamento, onde a partir disso foi aplicado na modelagem matemática proposta por Taitel e Dukler, 1976, que dispõe condições de transição entre os padrões, podendo validar a eficácia do modelo para o escoamento ar-água, objeto de estudo dos autores, uma vez que as condições experimentais atenderam a equação comparativa.

A análise para o escoamento ar-glicerina também foi realizada para o modelo matemático proposto por Taitel e Dukler, 1973, onde pode-se avaliar o comportamento do modelo para diferentes fluidos constituintes do escoamento bifásico, e conseqüentemente diferentes diâmetros, uma vez que as bancadas analisadas possuem essa diferença em sua construção.

Neste caso, de análise do escoamento ar-glicerina no modelo matemático proposto por Taitel e Dukler, 1976, obteve comportamento distinto entre o mapa de padrão de escoamento e a modelagem comparativa proposta pelos autores em questão, onde o mapa indicou presença predominante do padrão de escoamento intermitente e a modelagem matemática indicou predominância do padrão de escoamento bolhas dispersas. Portanto, a reflexão da não eficácia desse modelo para outros escoamentos além do analisados pelos autores, ou seja, ar-água, é válida, sendo necessário mais análises experimentais para comprovação.

Apesar da ressalva citada, em um contexto geral, podemos observar com base nos resultados analisados, presença de certa similaridade entre ambos os autores apresentado e discutido neste trabalho, pois, o comportamento do escoamento bifásico em ambos os modelos se convergiu.

Por fim, pode-se concluir a respeito da eficácia dos modelos analisados neste trabalho para escoamentos bifásicos horizontal ar-água. No caso de demais escoamentos bifásicos, como por exemplo aos presentes na produção submarina de petróleo, ressalta-se o bom funcionamento do modelo proposto por Mandhane, 1973, e necessidade de maior análise do modelo proposto por Taitel e Dukler, 1976.

Baseados nas conclusões citadas anteriormente, são sugeridas algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Quando possível o retorno das atividades acadêmicas de forma presencial, analisar os dados da bancada experimental construída na Universidade de Brasília;
- Analisar o modelo proposto por Taitel e Dukler, 1976 para diversos fluidos constituintes do escoamento bifásico, diferentemente do escoamento ar-água;
- Analisar o comportamento do escoamento bifásico em tubulação inclinada, em função da variação da vazão de cada fase; e
- Analisar os mesmos dados com base em outros modelos existentes, de modo a tomar conhecimento de modelos eficientes para escoamento bifásico.

7. BIBLIOGRAFIA

AGRAWALL, S. S., GREGORY, G. A., GOVIER, G. W., An analysis of horizontal stratified two-phase flow in pipes. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1973.

ANDREOLLI, Ivanildo, Introdução à elevação e escoamento monofásico e multifásico de petróleo, Petrobras, 2016.

BANWART, A. C., Carvalho, C. H. M., Oliveira, A. P., Vieira, F. F., Water-Assisted Flow of Heavy Oil and Gas in Vertical Pipe, International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Calgary, Canada, 2005.

B. YOUNG, B. Qiang, Sistemas Marítimos de Produção de Petróleo. 1 edição, 2015.

C.J. HOOGENDOORN, Chem. Eng.Sei., 1959.

CHEN, N.P., An Explicit Equation for Friction Factor in Pipe. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 1979.

CHIAPERINI, Industrial LTDA, Manual de Instruções, Compressor de Pistão, Santa Rosa de Viterbo, São Paulo, SP. Disponível em: www.chiaperini.com.br.

DUKLER, A. E., Taitel, Y., Model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow, AIChE Journal, 1976.

FOX, Robert, McDonald, Alan, Pritchard, Philip, Introdução a Mecânica dos Fluidos, LTC, 8ª Edição, 2014.

G.W. GOVIER, K. AZIZ, The flow of Complex Mistures in Pipes, Van Nostrand-Reinhold, New Yors, 1972.

ISHII, M., Hibiki Takashi. Thermo-Fluid Dynamics Theory of Two-Phase Flow, second edition Eyrolles: Paris, 1975.

J.M. MANDHANE, G. A. Gregory e K.Aziz. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. Int. J. Multiphase, Vol. 1, 1973.

JEFFREYS, J., On the formation of water waves by wind. Proc Royal Soc. A107, 1925.

LOCKHART, R. W., MARTINELLI, R. C., Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. Chem Eng. Progress, 1949.

MILNE-THOMPSON, L.M., Theoretical Hydrodynamics. The Macmilan Co., New York, 1960.

N. K. OMEBERE-LYARI, B. J. Azzopardi, A study of flow patterns for gas-liquid flow in small diameter tubes, Multiphase Flow Research Group, The University of Nottingham, Nottingham, UK.

O. BAKER, Design of Pipe Lines for Simultaneous Flow of Oil and Gas J, 1954.

PETROBRÁS, Organizado por Thomas, J. E., Fundamentos de Engenharia de Petróleo, Editora Interciência, 2004.

RUCKEN, Instrumentos de medição LTDA., Medidor de vazão tipo turbina, série TCM, São Paulo, SP. Disponível em: www.rucken.com.br.

Schneider, Manual de instruções bomba e motobombas, Joinville, Santa Catarina, SC. Disponível em: www.schneider.ind.br.

SHOHAN, O. Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes. The society of Petroleum Engineers; 2005.

SILVA, S. Elinaldo. Estudo do Escoamento Bifásico em Risers em Movimento na Produção Marítima de Petróleo em Águas Profundas. Universidade Estadual de Campinas, 2006.

STORTI, Felipe C., Estudo Experimental da Eficiência de Separação da Câmara de Expansão do separador VASPS, UNICAMP, Campinas, 2013.

UILSON, L. T. P., Lindemberg, J. N. D., Luiz Mário N. G., Fransisco P. P. S., Análise do escoamento multifásico de petróleo em linhas de produção de campos maduro, 5 Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, UFBA, 2009.

VILLELA, M. J. R. Análise do comportamento da temperatura em sistemas de produção de petróleo: comparação entre completação seca e molhada. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2004.

VALE, O. R., GARCIA, J. E., VILLA, M. VASPS Instalation and Operation at Campos Basin, Offshore Technology Conference, Houston, 1998.

WALLIS, G.B., "One dimensional two-phase flow", McGraw-Hill: New York, 1969.

ANEXO I – Dados Experimentais

Tabela A: Dados Experimentais ar-água Storti, 2013

Medição	Qg [m³/h]	Ql [m³/h]	Jg [m/s]	Jl [m/s]	X	F
1	2,6	4,43	1,43	2,43	7,8	0,1
2	2,6	5,89	1,43	3,23	9,0	0,1
3	2,62	7,63	1,44	4,18	10,2	0,1
4	2,58	8,97	1,42	4,92	10,0	0,1
5	2,58	10,47	1,42	5,74	12,0	0,1
6	2,57	11,99	1,41	6,58	12,8	0,1
7	4,19	4,62	2,30	2,53	8,0	0,2
8	4,16	5,95	2,28	3,26	9,0	0,2
9	4,17	7,51	2,29	4,12	10,2	0,2
10	4,18	9,04	2,29	4,96	10,0	0,2
11	4,15	10,53	2,28	5,78	12,0	0,2
12	4,06	12,07	2,23	6,62	12,9	0,2
13	5,69	4,6	3,12	2,52	7,9	0,3
14	5,66	6	3,10	3,29	7,0	0,3
15	5,7	7,52	3,13	4,12	10,2	0,4
16	5,69	9,07	3,12	4,97	10,0	0,4
17	5,65	10,62	3,10	5,82	12,1	0,7
18	5,6	11,96	3,07	6,56	12,8	0,7
19	7	4,6	3,84	2,52	7,9	0,7
20	7	6	3,84	3,29	8,0	0,8
21	7,01	7,59	3,84	4,16	10,2	0,8
22	7,01	8,95	3,84	4,91	10,0	0,8
23	7,01	10,48	3,84	5,75	10,2	0,9
24	7	12,01	3,84	6,59	12,8	1,0
25	7,94	4,43	4,35	2,43	7,8	1,0
26	7,94	6,08	4,35	3,33	7,5	1,0
27	7,86	7,48	4,31	4,10	10,1	1,0
28	7,97	9,04	4,37	4,96	10,0	1,0
29	7,87	10,62	4,32	5,82	12,0	1,0
30	8,02	11,95	4,40	6,55	12,6	1,0

Tabela B: Dados experimentais Unicamp 2020.

Medição	Qg [km/h]	Ql [km/h]	Jg [m/s]	Jl [m/s]	X	F
1	5244,52	7,02141	0,09288	0,69372	4,2	0,1
2	5216,13	23,69	0,03134	0,68996	4,2	0,2
3	9703,14	24,48	0,03238	1,28348	5,7	0,2
4	9352,73	33,35	0,04411	1,23713	5,6	0,3
5	9535,22	43,59	0,05766	1,26127	5,6	0,4
6	14213,8	15,29	0,20225	1,88013	6,9	0,1
7	19541	16,41	0,21706	2,58478	8,0	0,2
8	19867,9	41,53	0,05493	2,62803	8,1	0,4
9	34916	6,4	0,08466	4,61851	10,8	0,6
10	3582,67	74,75	0,09888	0,4739	10,9	0,7
11	49557,8	7,85	0,10384	6,55527	12,8	0,7

Tabela C: Dados Experimentais ar-glicerina 23 cP Storti, 2013.

Medição	Qg [m ³ /h]	Ql [m ³ /h]	Jg [m/s]	Jl [m/s]	X	F
1	2,63	4,65	1,4425	2,55043	7,98	0,1
2	2,53	6	1,38765	3,29088	9,07	0,1
3	2,56	7,56	1,40411	4,14651	10,18	0,1
4	2,53	9,06	1,38765	4,96922	10	0,1
5	2,57	10,59	1,40959	5,8084	12,05	0,1
6	4,12	4,54	2,25974	2,4901	7,9	0,15
7	4,09	6,04	2,24328	3,31282	9,1	0,15
8	4,05	7,55	2,22134	4,14102	10,17	0,15
9	4,07	9,05	2,23231	4,96374	10	0,15
10	4,01	10,66	2,1994	5,84679	12,1	0,15
11	5,61	4,57	3,07697	2,50655	7,9	0,2
12	5,61	5,97	3,07697	3,27442	7,5	0,2
13	5,56	7,54	3,04955	4,13554	10,2	0,2
14	5,52	9,09	3,02761	4,98568	10	0,2
15	5,46	10,57	2,9947	5,79743	12	0,2
16	7,03	4,57	3,85581	2,50655	7,91	0,3
17	7,03	5,98	3,85581	3,27991	8	0,3
18	6,98	7,53	3,82839	4,13005	10,16	0,3
19	6,95	9	3,81193	4,93632	10	0,3
20	6,9	10,5	3,78451	5,75903	12	0,3
21	7,91	4,6	4,33847	2,52301	8	0,3
22	7,85	6,05	4,30556	3,3183	7,9	0,3
23	7,83	7,44	4,29459	4,08069	10,1	0,3
24	7,86	8,97	4,31105	4,91986	10	0,3
25	7,84	10,46	4,30008	5,7371	9,9	0,3

Tabela D: Dados Experimentais ar-glicerina 53 cP Storti, 2013.

Medição	Qg [m³/h]	Ql [m³/h]	Jg [m/s]	Jl [m/s]	X	F
1	2,56	4,43	1,40411	2,42976	7,79	0,1
2	2,5	6	1,3712	3,29088	9,07	0,1
3	2,53	7,56	1,38765	4,14651	10	0,1
4	2,6	9,16	1,42605	5,02407	10,23	0,1
5	2,57	10,59	1,40959	5,8084	12,05	0,1
6	4,1	4,53	2,24877	2,48461	7,9	0,15
7	4,1	6,14	2,24877	3,36766	9	0,15
8	4,03	7,58	2,21037	4,15747	10,19	0,15
9	4,06	9	2,22683	4,93632	10	0,15
10	4	10,57	2,19392	5,79743	12,03	0,15
11	5,52	4,58	3,02761	2,51204	7,9	0,15
12	5,55	6,02	3,04406	3,30185	7,5	0,15
13	5,51	7,45	3,02212	4,08617	10,1	0,2
14	5,54	9,03	3,03858	4,95277	10	0,2
15	5,48	10,63	3,00567	5,83034	12	0,2
16	6,99	4,56	3,83387	2,50107	8	0,3
17	6,89	6,01	3,77902	3,29636	9	0,3
18	6,92	7,44	3,79548	4,08069	10	0,3
19	6,89	9,06	3,77902	4,96922	10,1	0,3
20	6,86	10,55	3,76257	5,78646	12	0,3
21	7,9	4,56	4,33299	2,50107	7,9	0,3
22	7,9	6,01	4,33299	3,29636	8	0,3
23	7,92	7,46	4,34396	4,09166	10,1	0,3
24	7,89	9,04	4,3275	4,95825	10	0,3
25	7,82	10,56	4,28911	5,79194	9,9	0,3

Tabela E: Dados Experimentais ar-glicerina 83 cP Storti, 2013.

Medição	Qg [m³/h]	Ql [m³/h]	Jg [m/s]	Jl [m/s]	X	F
1	2,53	4,62	1,3877	2,534	7,85	0,1
2	2,51	6,03	1,3767	3,3073	9	0,1
3	2,54	7,64	1,3931	4,1904	10	0,1
4	2,56	8,99	1,4041	4,9308	10,1	0,1
5	4,12	4,45	2,2597	2,4407	12,1	0,1
6	4,05	6,12	2,2213	3,3567	7,8	0,15
7	4,03	7,56	2,2104	4,1465	9,1	0,15
8	4,03	8,95	2,2104	4,9089	10,2	0,15
9	5,59	4,5	3,066	2,4682	10,1	0,15
10	5,53	6,17	3,0331	3,3841	12	0,15
11	5,51	7,62	3,0221	4,1794	8	0,15
12	5,46	9,05	2,9947	4,9637	7,4	0,15
13	7,01	4,44	3,8448	2,4352	10,1	0,2
14	6,95	6,17	3,8119	3,3841	10	0,2
15	6,96	7,63	3,8174	4,1849	12	0,2
16	6,85	9,08	3,7571	4,9802	7,9	0,2
17	7,97	4,6	4,3714	2,523	8,8	0,3
18	7,79	6,15	4,2727	3,3731	10	0,3
19	7,87	7,64	4,3165	4,1904	10,1	0,3
20	7,8	9,05	4,2781	4,9637	12	0,3

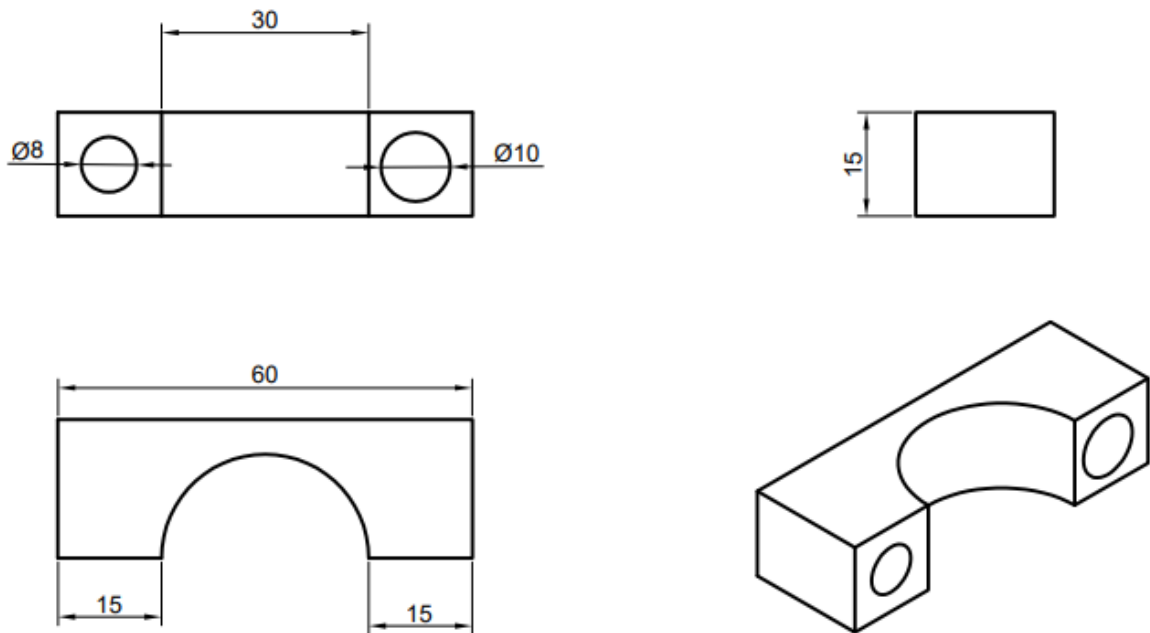
ANEXO II – Cálculos Experimentais

Todos os cálculos realizados neste trabalho foram realizados via excel, disponível para consulta em:

<https://drive.google.com/drive/folders/1TmjzRclKkelgQliWT45VJRIH37twNVn?usp=sharing>.

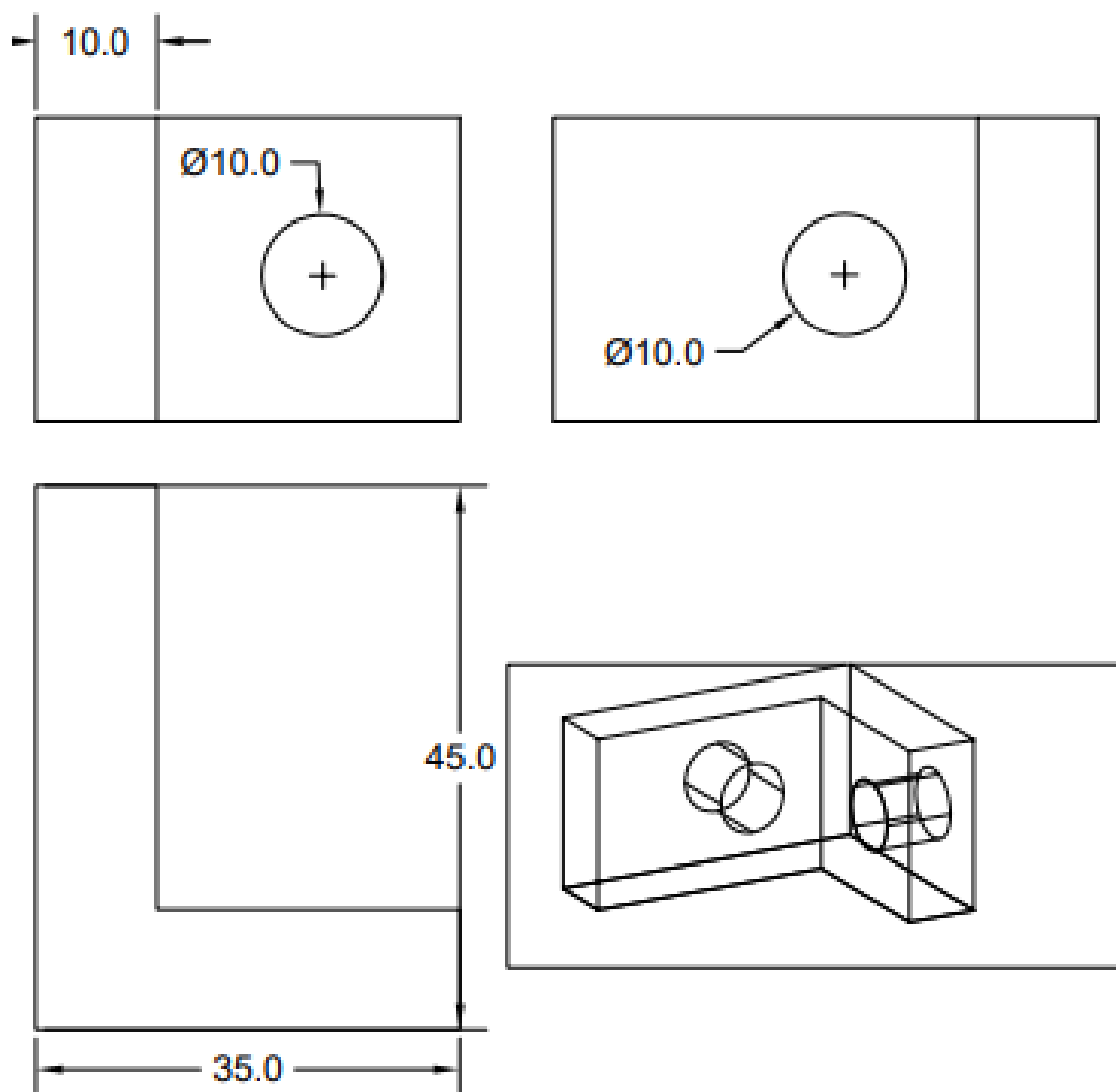
ANEXO III – Desenhos Técnicos

Figura I – Cantoneira



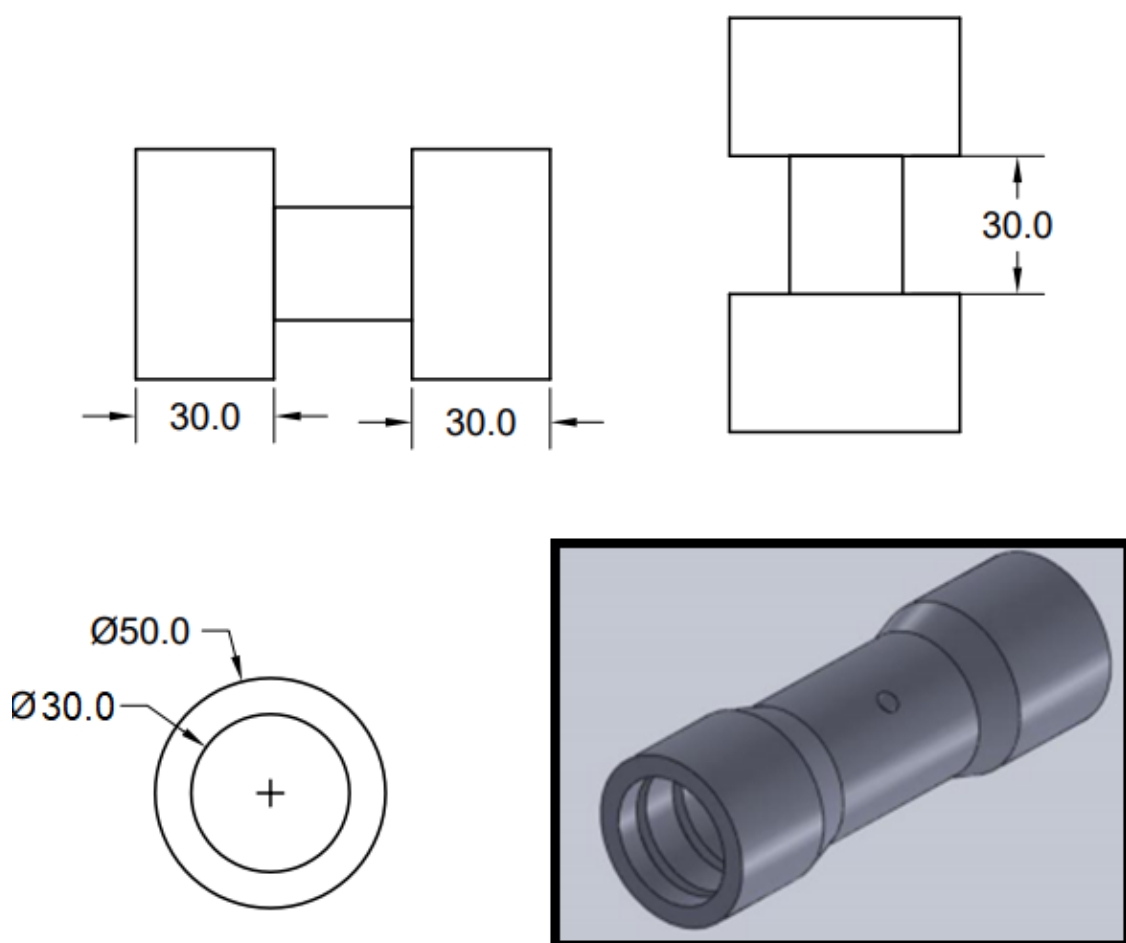
Universidade de Brasília	Bancada Experimental - Termoflúidos
Cantoneira Superior/Inferior	Unidade de medida: milímetros

Figura II – Suporte da cantoneira



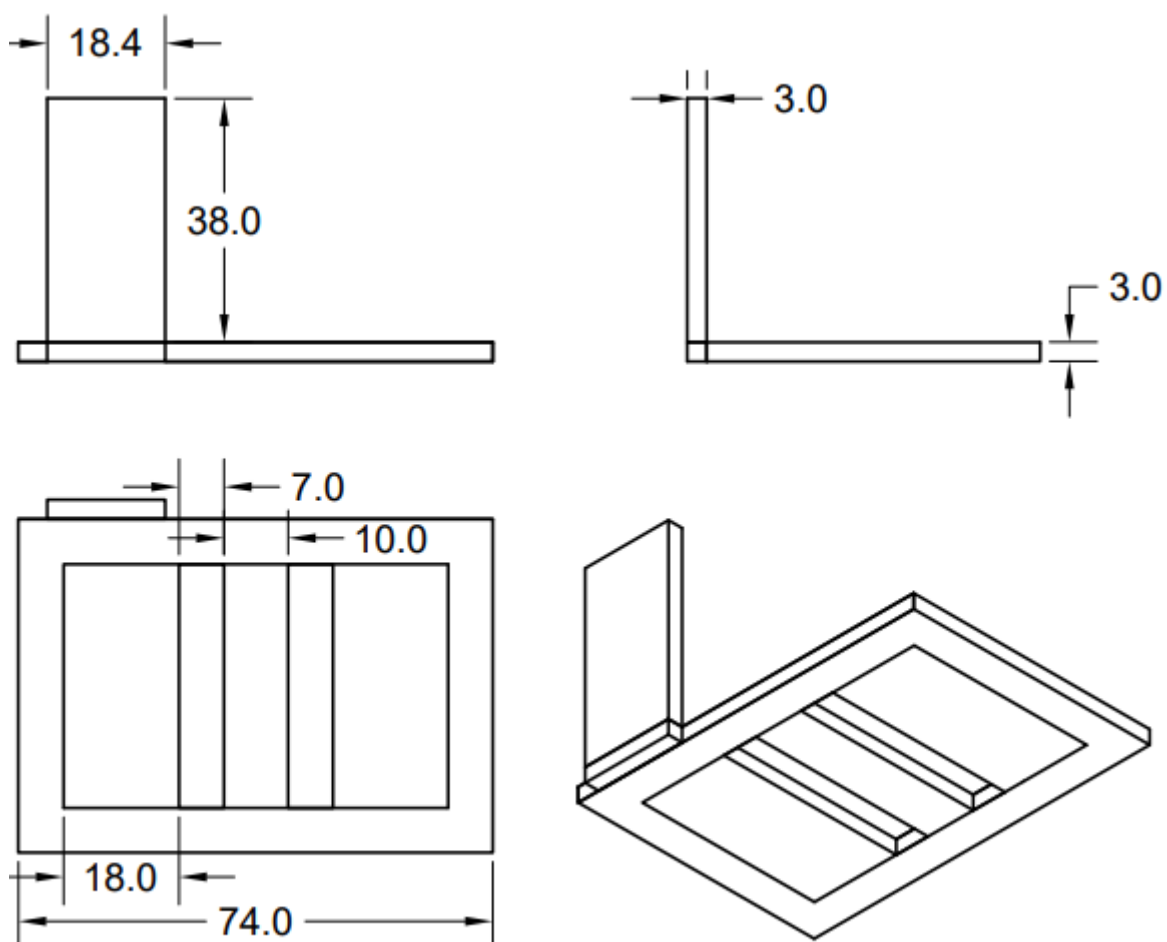
Universidade de Brasília	Bancada Experimental
Suporte Cantoneira	Unidade de medida: milímetros

Figura III – Conexão de nylon



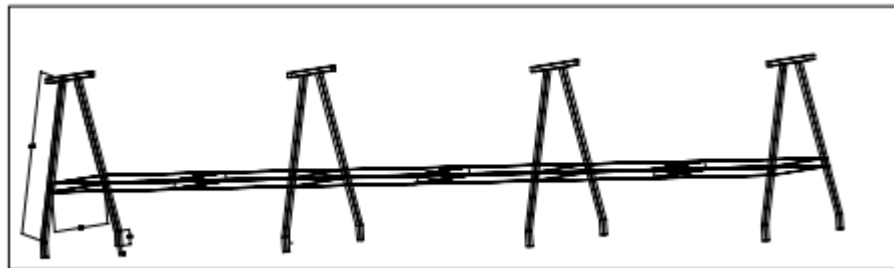
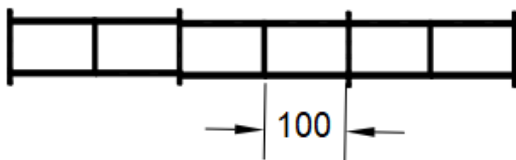
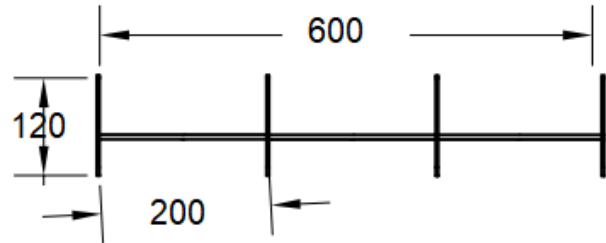
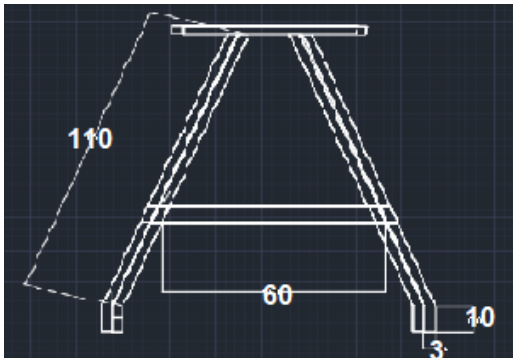
Universidade de Brasília	Bancada Experimental
Conexão de Nylon	Unidade de medida: milímetros

Figura IV – Suporte da bomba e caixa elétrica



Universidade de Brasília	Bancada Experimental
Suporte da Bomba	Unidade de medida: centímetro

Desenho V – Suporte da tubulação



Universidade de Brasília	Bancada Experimental
Suporte da Tubulação	Unidade de medida: centímetro