

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Estudo do Escoamento Bifásico em Risers em
Movimento na Produção Marítima de
Petróleo em Águas Profundas**

**Autor: Elinaldo Santos Silva
Orientador: Prof. Dr. Sérgio N. Bordalo**

04/2006

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

Estudo do Escoamento Bifásico em Risers em Movimento na Produção Marítima de Petróleo em Águas Profundas

Autor: Elinaldo Santos Silva

Orientador: Prof. Dr. Sergio Nascimento Bordalo

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2006
SP – Brasil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Estudo do Escoamento Bifásico em Risers em Movimento na Produção Marítima de Petróleo em Águas Profundas

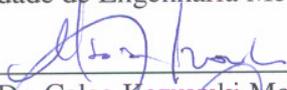
Autor: **Elinaldo Santos Silva**

Orientador: **Prof. Dr. Sérgio Nascimento Bordalo**

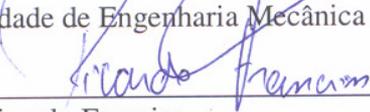
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Sérgio Nascimento Bordalo, Presidente
Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP



Prof. Dr. Celso Kazuyuki Morooka
Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP



Dr. Ricardo Franciss
Petrobrás S.A.

Campinas, 05 de Abril de 2006

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus, meus pais e irmãos.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de Deus que iluminou e guiou meus caminhos e diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais e irmãos pelo incentivo e apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, que me mostrou os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores e colegas do Departamento de Engenharia de Petróleo, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

A ANP pela bolsa de estudos fornecida.

Aos funcionários do Departamento de Energia pela construção e operação do aparato experimental.

A todo o quadro de funcionários do Departamento de Engenharia de Petróleo pelo incentivo e ajuda na realização do meu trabalho.

*A preguiça e a indecisão são
traidoras. Pelo medo de arriscar, às
vezes pode-se perder bens, que se
poderia conquistar se não fosse o
medo de tentar.*

William Shakespeare

Resumo

SILVA, Elinaldo Santos. Estudo do Escoamento Bifásico em Risers em Movimento na Produção Marítima de Petróleo em Águas Profundas. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 87 p. Dissertação (Mestrado).

O escoamento vertical bifásico é de suma importância na produção de petróleo, uma vez que os reservatórios petrolíferos produzem óleo e gás simultaneamente, e estes devem fluir até a superfície submarina através de poços, e destes até a plataforma de produção através de dutos verticais (*risers*) no mar. Ao longo de seu escoamento, a mistura pode desenvolver vários padrões de fluxo. Os padrões identificados no escoamento vertical são bolhas, golfadas, transição e anular, e essas configurações físicas apresentam características próprias que exigem modelagens distintas, apresentando relações particulares de perda de carga em função da vazão. A caracterização correta do padrão, sob dadas condições operacionais, é fundamental para modelar a dinâmica do escoamento e determinar a relação entre perda de carga e vazão.

Na literatura, estudos sobre o estabelecimento dos padrões de fluxo foram realizados com água e ar, e estão restritos ao caso de dutos estáticos, enquanto que os *risers* de produção estão em constante movimento devido à ação das ondas, das correntezas e da plataforma de produção. Sendo assim, a aplicação destes mapas nas condições de produção em águas profundas são questionáveis. O presente trabalho é importante para a produção de óleo e gás em águas profundas, porque aborda as condições de movimento de dutos verticais longos e esbeltos sob oscilações. Nestes dutos, as forças decorrentes do movimento do mar e da plataforma de produção geram sobre o duto um movimento transversal alternado. Para se estudar esse efeito, um aparato experimental foi construído em escala de laboratório, com um duto flexível de 8,0 m de comprimento e 25,4 mm de diâmetro, provido de um sistema de oscilação e de injeção de água e ar para se estudar os padrões de fluxo vertical ascendente bifásico em dutos em movimento.

Palavras chaves

- Escoamento Vertical Bifásico, Riser de Produção de Petróleo em Águas Profundas, Padrões de Fluxo, Perda de Carga.

Abstract

SILVA, Elinaldo Santos. Study of Two-phase Flow in Moving Risers for Offshore Petroleum Production in Deep Waters. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 87 p. Dissertation (Master's degree).

The two-phase vertical flow is of utmost importance for petroleum production, since petroleum reservoirs produce oil and gas simultaneously, which must flow up to the undersea surface through wells, and from these to the production platform through vertical pipes (risers) in the sea. Throughout the flow, the mixture of oil and gas may develop several flow patterns. The flow patterns identified in the vertical flow are bubbles, slugs, churn and annular, and these physical configurations present specific characteristics that demand distinct modeling and, presenting particular relations of head loss as function of the flow rate. The correct characterization of the flow patterns, under given operational conditions, is fundamental to the modeling of the dynamics of the flow and to determine the relation between head loss and flow rate. In the literature, studies on the establishment of the flow patterns had been carried with water and air, and were restricted to the case of static pipes, while production risers are in constant movement due to the action of waves, sea currents and the displacement of the production platform. Therefore, the application of these static maps for the conditions of production in deep waters is questionable. The present work is important for the production of oil and gas in deep waters, because it takes into account the oscillatory movement of long and slender vertical pipelines. In these pipes, the forces resulting from of the movements of the sea and the production platform generate an alternated transversal movement on the pipeline. An experimental apparatus built in the laboratory scale to study this effect, with a flexible duct of 8,0 m of length and 25,4 mm of diameter, attached to a system of oscillation and connected to an injection nozzle of water and air to study the patterns of two-phase vertical upward flow in moving pipes.

Keys words - Two-phase Vertical Flow, Offshore Petroleum Production Riser, Flow Patterns, Head Loss Deepwater Operation.

Índice

Dedicatória.....	iv
Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Índice.....	ix
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Nomenclatura.....	xiv
Capítulo 1-Introdução.....	1
1.1 Escoamento Bifásico.....	2
1.1.1 Mapas de Padrões de Fluxo Vertical Ascendente.....	4
1.1.2 Gradiente de Pressão.....	5
1.2 Risers.....	7
Capítulo 2-Revisão Bibliográfica.....	8
2.1 Escoamento Bifásico.....	8
2.1.1 Mapa de Padrões.....	8
2.1.2 Gradiente de Pressão.....	18
2.2 Risers em Movimento.....	29
Capítulo 3-Aparato Experimental.....	34
3.1 Circuito de Fluxo.....	34
3.2 Movimentação de Fluidos.....	36
3.3 Sistema de Instrumentação.....	40
3.4 Riser Bifásico Oscilante.....	42
3.5 Procedimento Experimental.....	46

Capítulo 4-Resultados.....	48
4.1 Sistema Estacionário.....	49
4.1.1 Padrões de Fluxo.....	49
4.1.2 Gradiente de Pressão.....	52
4.2 Sistema Oscilante.....	59
4.2.1 Padrões de Fluxo.....	59
4.2.2 Gradiente de Pressão.....	60
Capítulo 5-Conclusões.....	67
5.1 Mapas de Padrão de Fluxo.....	67
5.2 Gradiente de Pressão.....	67
5.3 Comentário e Sugestões.....	68
Referências Bibliográficas.....	70
Anexo I.....	73
Apêndice A.....	87
CD com filmagens.....	91

Lista de Figuras

Figura 1.1. Mapa de Taitel e Dukler mostrando todas as transições para o escoamento vertical de água e ar em um duto de 5,0 cm de diâmetro, a 25 °C e 100 kPa.....	5
Figura 1.2. Fator de fricção bifásico.....	6
Figura 2.1. Padrões do escoamento bifásico gás-líquido vertical ascendente: (1) escoamento em bolhas; (2) escoamento em golfadas; (3) escoamento de transição; (4) escoamento anular.....	10
Figura 2.2. Mapa de padrão de escoamento vertical ar-água e pontos experimentais.....	12
Figura 2.3. Mapa de Gouvier e Aziz para escoamento vertical.....	13
Figura 2.4. Transição entre escoamento em bolhas e o escoamento intermitente vertical, de acordo com o mapa de Taitel e Dukler.....	14
Figura 2.5. Mapa de Taitel e Dukler mostrando todas as transições para o escoamento vertical de água e ar em um duto de 5,0 cm de diâmetro, a 25 °C e 100 kPa.....	15
Figura 2.6. Mapa de Griffith e Wallis para escoamento vertical.....	17
Figura 2.7. Mapa de Dun e Ross para escoamento vertical.....	17
Figura 2.8. Mapa de Oshinovo e Charles para escoamento vertical.....	18
Figura 2.9. Correlação do fator de fricção de Poettmann e Carpenter.....	22
Figura 2.10. Correlação do fator de fricção de Fancher e Brown.....	23
Figura 2.11. Esquema de funcionamento do riser.....	29
Figura 2.12. Riser flexível.....	31
Figura 2.13. Camadas de um riser flexível.....	32
Figura 2.14: Configuração do riser rígido de produção.....	33
Figura 3.1. Esquema do aparato experimental.....	35
Figura 3.2. Tanque de água.....	37
Figura 3.3. Tanque pulmão.....	37
Figura 3.4. Bomba centrífuga usada no bombeamento da fase líquida.....	38

Figura 3.5. Compressor usado na compressão da fase gasosa.....	39
Figura 3.6. Esquema da medição do diferencial de pressão.....	41
Figura 3.7. Misturador de fases.....	43
Figura 3.8. Oscilador mecânico.....	45
Figura 3.9. Esquema do mecanismo de braço escocês.....	45
Figura 3.10. Inversor de frequência.....	46
Figura 4.1. Mapa de padrões de fluxo de ar e água para um duto vertical estático de 8,0 m de comprimento e 25,4 mm de diâmetro à 25 °C e 95 kPa.....	50
Figura 4.2. Mapa de padrões de fluxo empregando coordenadas sugeridas por Aziz.....	51
Figura 4.3a. Queda de pressão medida em função da velocidade superficial do gás.....	53
Figura 4.3b. Queda de pressão medida em função da velocidade superficial do gás.....	53
Figura 4.4. Queda de pressão medida em função da velocidade superficial do líquido.....	54
Figura 4.5. Queda de pressão calculada em função da velocidade superficial do gás.....	55
Figura 4.6. Queda de pressão calculada em função da velocidade superficial do líquido.....	56
Figura 4.7. Gráfico da análise de correlação.....	57
Figura 4.8. Gráfico do desvio percentual.....	57
Figura 4.9. Mapa de padrões de fluxo de ar e água para um tubo vertical em movimento, com dois modos de oscilação, de 8,0 m de comprimento e 25,4 mm de diâmetro à 30 °C e 95 kPa.....	60
Figura 4.10a. Queda de pressão medida em função da velocidade superficial do gás para duto com segundo modo de oscilação.....	61
Figura 4.10b. Queda de pressão medida em função da velocidade superficial do gás para duto com segundo modo de oscilação.....	61
Figura 4.11. Queda de pressão medida em função da velocidade superficial do gás para duto com primeiro modo de oscilação.....	62
Figura 4.12: Diferença de pressão medida em função da frequência de oscilação do duto.....	63
Figura 4.13: Diferença de pressão medida devido ao atrito viscoso em função da frequência de oscilação do duto.....	65
Figura A.1: Diagrama de Moody para cálculo da perda de carga.....	90

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Quadro de resumo dos Modelos de escoamento bifásico.....	21
--	----

Nomenclatura

Letras Latinas

A – Área da seção transversal do duto	m^2
C – Coeficiente	
D – Diâmetro	m
d – Diâmetro do duto	m
E_u – Número de Euler	
f_m – Fator de fricção monofásico	
f_{bf} – Fator de fricção bifásico	
g – Aceleração da gravidade	m/s^2
g_c – Constante gravitacional	m/s^2
h – Altura de carga	m
$H(\phi)$ – Holdup do líquido em função da inclinação do duto	
H_L – Holdup do líquido	
L_1, L_2, L_3, L_4 – Limites de fronteiras segundo Beggs e Brill	
M – Número de Mach	
F_r – Número de Froude	
N_{GV} – Número de velocidade do gás	
N_{LV} – Número de velocidade do líquido	
N_D – Número de diâmetro do duto	
N_L – Número de viscosidade do líquido	
Re – Número de Reynolds	
p – Pressão	Pa
dp/dz – Gradiente vertical de pressão	Pa/m
Q – Vazão volumétrica	m^3/s

s – Fator de correlação	
T – Temperatura	°C
V – Velocidade	m/s
V_{SL} – Velocidade superficial do líquido	m/s
V_{SG} – Velocidade superficial do gás	m/s
V_m – Velocidade de fluxo da mistura	m/s
We – Número de Weber	
z – Cota vertical do escoamento axial	m

Letras Gregas

ϕ – Ângulo de inclinação do duto em relação à horizontal	
λ_L – Conteúdo de líquido	
μ_G – Viscosidade do gás	Pa.s
μ_L – Viscosidade do líquido	Pa.s
μ_n – Viscosidade da mistura	Pa.s
ρ_G – Densidade do gás	Kg/m ³
ρ_L – Densidade do líquido	Kg/m ³
ρ_L – Densidade para condição de não deslizamento	Kg/m ³
ρ_S – Densidade da mistura bifásica	Kg/m ³
σ – Tensão superficial da água	N/m
ψ – Fator de correção de inclinação	

Abreviaturas

RPM	revoluções por minuto
cv	cavalo vapor

Capítulo 1

Introdução

A produção de petróleo em um poço está geralmente associada ao escoamento bifásico uma vez que as frações mais leves de hidrocarbonetos são liberadas da fase líquida a medida que a pressão do reservatório diminui e atinge a pressão de bolha, ou à medida que o óleo escoar e perde pressão ao longo de seu escoamento através no poço. Na produção de gás o mesmo pode ser dito, na medida em que as frações mais pesadas de hidrocarbonetos se mantêm na fase líquida ou se liquefazem à medida que a temperatura do gás produzido diminui no seu escoamento dentro do poço para a superfície. Isto pode ser ainda mais complicado, considerando que o escoamento pode também conter água e areia.

Os cálculos do escoamento bifásico são complexos devido a fenômenos tais como deslizamento entre fases, mudança de padrão de escoamento e transferência de massa entre fases. A diferença de velocidades e a geometria das duas fases fortemente influenciam a queda de pressão e constituem a base para caracterizar o escoamento bifásico. Este estudo será focado no escoamento bifásico porque este é o tipo de escoamento dominante e de interesse na produção de petróleo.

Além das complexidades citadas, a perda de carga nas linhas submarinas suspensas (*risers*) de produção de petróleo em águas profundas pode depender do constante movimento devido ao deslocamento da plataforma de produção, da corrente marinha e das ondas. Ao longo do escoamento, a mistura bifásica pode desenvolver diferentes padrões de fluxo, que se caracterizam pela sua configuração física, e que exigem diferentes modelos para determinação da dinâmica do escoamento e determinar a relação entre perda de carga e vazão da mistura.

Estudos anteriores consideram o caso de dutos estáticos; neste trabalho serão abordados casos de *risers* em movimento devido a sua importância para a produção marítima em águas profundas.

1.1 Escoamento Bifásico

O estudo do escoamento bifásico traz consigo a necessidade de, primeiramente, definir alguns termos básicos referentes ao escoamento. Considerando o escoamento bifásico de líquido e gás no interior de uma tubulação com determinada área de seção transversal A , temos que as velocidades superficiais do líquido e do gás, V_{SL} e V_{SG} , serão dadas pela razão da vazão volumétrica Q da referida fase e a área total da seção transversal do duto.

$$V_{SL} = \frac{Q_L}{A}, \quad V_{SG} = \frac{Q_G}{A} \quad (1.1)$$

Estas velocidades poderiam ser definidas como as velocidades que as fases exibiriam se estivessem escoando sozinhas através da área total da seção do duto. A velocidade superficial aparece como variável nas coordenadas dos eixos dos mapas de escoamento, e é usada na modelagem fenomenológica, as correlações que expressam a interação entre as fases. Note-se que, para um certo duto de diâmetro dado, a velocidade superficial representa diretamente a vazão da fase. A velocidade superficial não depende do deslocamento real da fase ao longo do duto.

A velocidade média de cada fase é definida pela razão entre a vazão volumétrica de cada fase e a área da fração da seção transversal do duto ocupado por ela, sendo dada por

$$V_L = \frac{Q_L}{A_L}, \quad V_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad (1.2)$$

A velocidade média da fase traduz verdadeiramente o deslocamento da fase. Quando, num escoamento, duas fases diferem uma da outra em densidade e ou viscosidade, uma delas tende a escoar com velocidade mais elevada que a outra. Isto gera no fluxo uma importante característica de deslizamento de uma fase sobre a outra.

A fração volumétrica ocupada pela fase líquida denomina-se *holdup*, definida como

$$H_L = \frac{\text{Volume de líquido no segmento do duto}}{\text{Volume do segmento duto}} \quad (1.3)$$

Esta fração varia de zero, para o caso de se ter apenas gás escoando, até um, no caso de se ter apenas líquido escoando. O método mais comum de se medir o *holdup* do líquido é isolar um segmento do escoamento entre duas válvulas de fechamento rápido e medir o líquido retido. Outra forma de se determinar o *holdup* é através de correlações consagradas existentes na literatura, e esta será a forma de cálculo deste parâmetro no nosso trabalho. A fração de vazio, que representa o volume da fase gasosa na seção vale

$$\alpha_G = 1 - H_L \quad (1.4)$$

Com o *holdup*, as velocidades reais e as velocidades superficiais podem ser correlacionadas da seguinte forma:

$$V_L = \frac{Vs_L}{H_L}, \quad V_G = \frac{Vs_G}{1 - H_L} \quad (1.5)$$

A fração de descarga λ pode ser definido para cada fase por

$$\lambda_L = \frac{Q_L}{Q}, \quad \lambda_G = \frac{Q_G}{Q} \quad (1.6)$$

onde Q é a vazão total dada por

$$Q = Q_L + Q_G \quad (1.7)$$

1.1.1 Mapas de Padrões de Fluxo Vertical Ascendente

Quando dois fluidos escoam juntos no interior de uma tubulação num movimento vertical ascendente, a interface das duas fases pode assumir diferentes configurações de escoamento, compatíveis com a vazão de cada fase, as propriedades dos fluidos e o diâmetro da tubulação.

O método tradicional de identificação dos padrões de escoamento é a observação do escoamento através de um duto transparente. O registro destas imagens pode ser realizado com a utilização de câmeras de alta velocidade por se tratar de um fenômeno muito rápido.

O trabalho teórico realizado por Taitel e Dukler (1980), apresentado na Figura 1.1, se propunha a prever as transições dos padrões de escoamento durante o fluxo de uma mistura gás-líquido no interior de um duto vertical, baseando-se em mecanismos físicos estabelecidos para cada transição. Os modelos teóricos envolvem os efeitos das propriedades dos fluidos e a geometria do duto.

Muitos mapas de padrões de escoamento foram propostos e a maioria deles foi baseada, fundamentalmente, em dados experimentais, e, portanto, sob limitadas condições de medidas. O resultado do trabalho destes autores é aplicável teoricamente a ampla faixa de propriedades e geometria de dutos que poderiam ser esperados para transições determinadas experimentalmente.

É importante ressaltar que estes trabalhos foram realizados para o caso de duto estático enquanto que o presente trabalho trata de dutos em movimento.

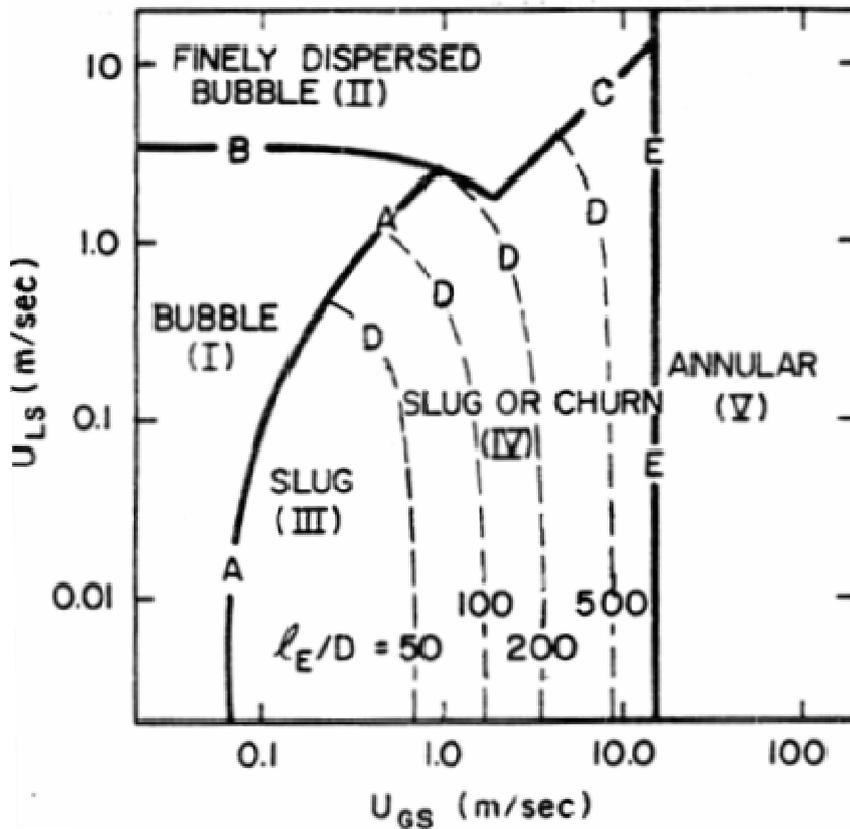


Figura 1.1: Mapa de Taitel e Dukler mostrando todas as transições para o escoamento vertical de água e ar em um duto de 5,0 cm de diâmetro, a 25 °C e 100 kPa. (Original de Taitel e Duckler, 1980)¹

1.1.2 Gradiente de Pressão

Quando uma mistura gás-líquido escoar no interior de uma tubulação, surge um gradiente de pressão. No caso de escoamento vertical, o gradiente de pressão, expresso na equação 1.8, é formado por três termos: a elevação dos fluidos contra a gravidade, a fricção viscosa causada pelo contato dos fluidos com a parede da tubulação e a aceleração do escoamento – mostrados nesta ordem no lado direito da equação 1.8.

$$-\left(\frac{dp}{dL}\right) = \rho_s g + f_{bf} \frac{\rho_f V_m^2}{2d} + \rho_n V_m \frac{dV_m}{dL} \quad (1.8)$$

¹ Tradução da figura: U_{LS} e U_{GS} – velocidades superficial do líquido e do gás, respectivamente; bubble – bolhas; slug – golfadas; churn – agitado (transição); annular – anular; finely dispersed bubbles – bolhas dispersas; l_E/D – razão do comprimento pelo diâmetro do duto.

A queda de pressão devida ao termo da elevação é função da densidade da mistura bifásica ρ_s , e é calculada com base no *holdup*. Com exceção do caso de alta vazão da fase gasosa, boa parcela da queda de pressão na vertical é causada por esta componente.

O termo referente a fricção viscosa é governado pelas tensões viscosas do fluido escoando em contato com as paredes do tubo e requer a avaliação do fator de fricção bifásico f_{bf} , o qual depende do regime de escoamento e do *holdup*. O gráfico da Figura 1.2 mostra o fator de fricção bifásico normalizado pelo fator de fricção monofásico como função do *holdup* do líquido e da fração de descarga de líquido, λ_L , segundo Beggs e Brill (1973).

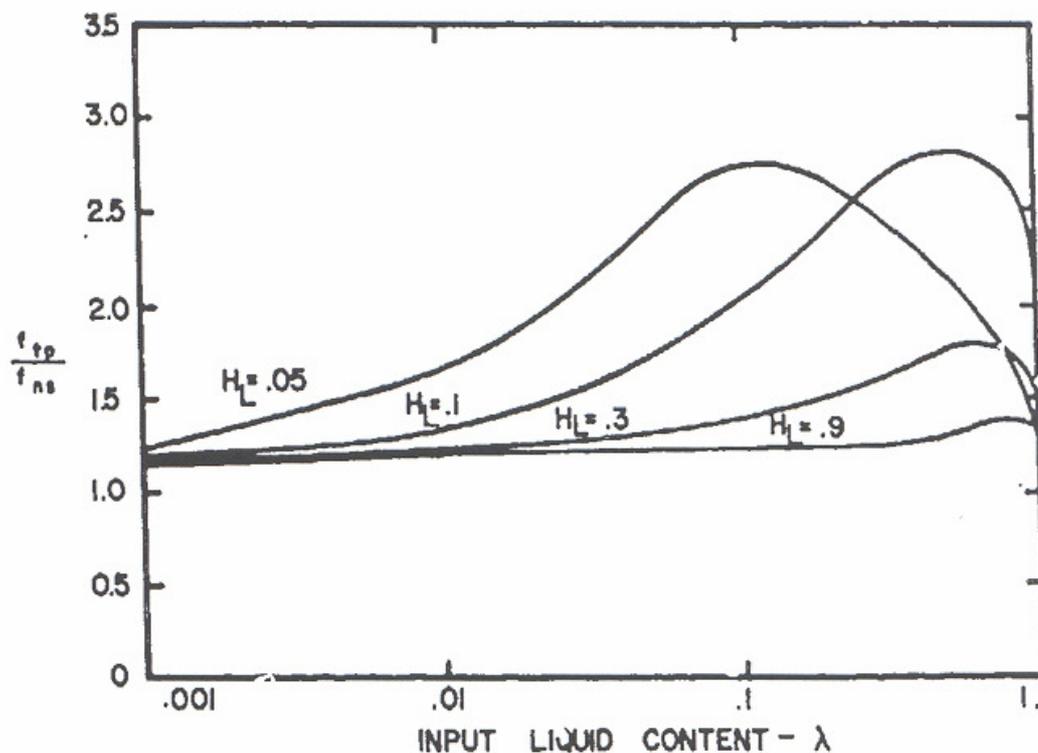


Figura 1.2: Fator de fricção bifásico
(Original de Beggs e Brill, 1973)²

O termo referente a aceleração é regido por uma relação direta com o número de Mach, que é o quociente entre a velocidade média do fluido e a velocidade do som no fluido na temperatura e pressão de trabalho. Esse termo algumas vezes não é considerado significativo, e é

² Tradução da figura: input liquid content – fração de descarga de líquido λ_L ; f_{bp} – fator de fricção bifásico, f_{bf} ; f_{ns} – fator de fricção monofásico, f ; H_L – *holdup* de líquido.

calculado apenas para o caso de altas velocidades. Segundo Hagedorn e Brown (1964), esse termo não deve ser negligenciado se ele constitui mais de 10% da queda de pressão total perto do topo do poço.

A determinação do *holdup*, fator de atrito e da perda de carga é de fundamental importância para o dimensionamento das tubulações do poço e das linhas de surgência e equipamentos de processamento de campo como tratadores, separadores etc.

1.2 Risers

Na produção de petróleo são utilizados dutos que transportam os fluidos resultantes do processo de produção (óleo, gás, água) desde o poço de petróleo no fundo do mar até a plataforma de produção na superfície. Esses dutos são conhecidos como *riser* e podem ser flexíveis ou rígidos.

Os *risers* flexíveis são dutos compostos por várias camadas de materiais diferentes tendo no seu centro uma armadura espiralada. Através destes é possível realizar a conexão da plataforma com a árvore de natal em pontos mais afastados, sendo que para isto a configuração do *riser* deve ser em forma de catenária. Devido ao seu alto grau de complacência aos deslocamentos seu uso pode ser realizado em sistemas de produção do tipo navio FPSO (*floating production storage and offloading* – sistema flutuante de produção, armazenamento e alívio), e plataforma semi-submersível. Os *risers* rígidos são dutos de aço constituídos por uma série de dutos interligados (em alguns casos encontram-se dutos de 12 m, mas também há casos em que se utilizam dutos de 8 m, com nas instalações de SCR – *Steel Catenary Riser*). Este tipo de *riser* pode ser envolvido por flutuadores para reduzir seu peso quando se trata de lâmina d'água profunda. Os *risers* rígidos são economicamente mais viáveis que os *risers* flexíveis. Tradicionalmente, os *risers* rígidos eram utilizados em casos onde não existiam grandes deslocamentos da plataforma, como as unidades Spar e TLP (*Tension Leg Platform*), porém, hoje em dia, o seu emprego está tecnicamente viabilizado em plataformas semi-submersíveis e navios (FPSO – *Floating Production Storage and Offloading*).

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Escoamento Bifásico

A descrição do gradiente de pressão, *holdup* do líquido e padrões de escoamento que ocorrem durante o escoamento simultâneo de gás e líquido no interior de um duto é necessário nos projetos na indústria do petróleo, na indústria de processos químicos e no projeto de reatores nucleares. Na indústria do petróleo, o escoamento bifásico envolve o fluxo de fases misturadas de óleo e gás natural. O escoamento pode ser vertical, horizontal ou inclinado, e os métodos devem permitir a descrição da perda de carga no duto em qualquer ângulo de inclinação. Na produção marítima existe a necessidade de transporte de gás e líquido a grandes distâncias antes da separação. Além de ser capaz de dimensionar estas linhas, sob o ponto de vista da perda de carga, o engenheiro deve ser capaz de calcular a quantidade de líquido na linha nos vários regimes de escoamento para atender a projeto dos *risers* e de equipamentos de separação e tratamento.

A proposta deste capítulo é apresentar algumas questões básicas envolvidas no projeto de fluxo bifásico, descrever algumas correlações desenvolvidas para projetos, mostrar a aplicação das várias correlações e mapas de fluxo. Vale ressaltar que nos trabalhos citados neste capítulo os estudos foram realizados com o duto na condição estática. Não foram encontradas referências sobre dutos em movimento.

2.1.1 Mapas de Padrões

Quando uma mistura gás-líquido escoar ascendentemente num duto vertical, as duas fases podem assumir diferentes configurações, conforme pode ser visto na Figura 2.1, cada um caracterizando a distribuição radial e axial de gás e líquido. Um padrão de escoamento em particular depende das vazões de escoamento, das propriedades dos fluidos e do diâmetro do

duto. Acompanhando a Figura 2.1 vamos designar quatro padrões para o escoamento ascendente, de acordo com a literatura tradicional (por ex: Graham B. Wallis, 1969), como segue:

1. Escoamento em Bolhas: o duto está preenchido com líquido e a fase gás está presente de maneira distribuída na forma de bolhas discretas na fase líquida contínua. As bolhas movem-se a diferentes velocidades e, exceto por sua densidade, tem pequeno efeito no gradiente de pressão. As paredes do duto estão em contato permanente com a fase líquida.
2. Escoamento em Golfadas (intermitente regular): a fase gás é mais pronunciada, apesar da fase líquida ainda ser contínua. A maioria do gás é concentrada em largas bolhas em forma de bala que tem o diâmetro quase igual ao do duto. Estas bolhas são separadas por golfadas de líquido contínuo (tampões) que atravessam o duto e contém pequenas bolhas de gás. O gás e o líquido têm, ambos, significativo efeito no gradiente de pressão. Este padrão é relativamente bem comportado e ordenado, na forma como se repetem alternadamente o líquido e o gás.
3. Escoamento de Transição ou Intermitente Agitante: este padrão apresenta uma intermitência muito intensa e grande desordenação, comparativamente ao escoamento em golfadas. É muito mais caótico, espumado e distorcido. As bolhas reduzem-se, sua forma é desordenada, e sua distribuição e frequência muito irregulares. A continuidade do líquido nas golfadas entre as sucessivas bolhas é repetidamente destruída pela alta concentração de gás local na golfada. Quando isto acontece a golfada de líquido despenca. Este líquido se acumula e forma uma barreira e é outra vez impelido pelo gás. Típico deste escoamento agitante é o movimento vertical oscilatório do líquido. Apesar do efeito da fase líquida ser significativo, a quantidade de gás é predominante. Alguns autores chamam este tipo de escoamento de transição (*transition*) e outros de agitante (*churn*). Neste texto adotaremos a nomenclatura “agitante”; e respeitaremos a nomenclatura particular de cada autor nas referências a literatura.
4. Escoamento Anular: é caracterizado pela continuidade da fase gás ao longo do centro do duto, onde o mesmo se desloca a alta velocidade. As paredes do duto são cobertas pela fase líquida que se move ascendentemente como um filme de líquido, e parcialmente na forma de gotículas (névoa) distribuídas na fase gás. A fase gás arrasta a fase líquida e

predominantemente controla o gradiente de pressão. É necessária uma alta vazão de gás para manter a coluna de líquido estável; ocorrendo uma redução na velocidade de gás abaixo de um certo valor crítico, o filme de líquido desaba, e o escoamento recai no padrão intermitente agitante.

Os padrões acima descritos, na ordem em que foram apresentados, correspondem a um aumento progressivo na vazão de gás, conforme pode ser observado no mapa da Figura 1.1.

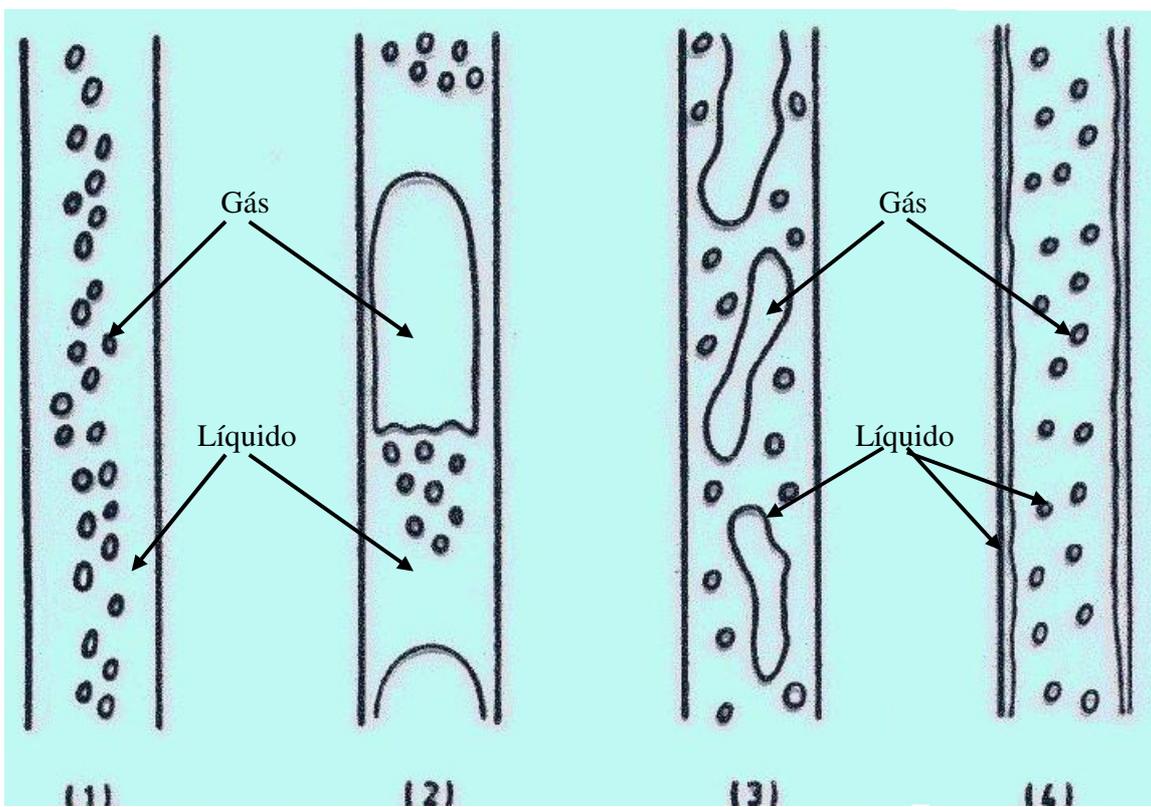


Figura 2.1: Padrões do escoamento bifásico gás-líquido vertical ascendente: (1) escoamento em bolhas; (2) escoamento em golfadas; (3) escoamento agitante; (4) escoamento anular

Os Mapas dos Padrões de Escoamento Vertical

Existe uma variedade de mapas para fluxo vertical em dutos estáticos na literatura. O que estes mapas propõem são as fronteiras de transição num sistema de coordenadas. Os padrões de escoamento ocorrem em sistemas com características definidas, em condições operacionais estabelecidas, com fluidos de propriedades conhecidas. Mapas construídos a partir de

determinadas características e propriedades do fluido não são necessariamente válidos para outros casos.

Evidentemente, quanto mais similar for o sistema em questão ao sistema de escoamento bifásico que permitiu, através de visualização ou da análise de sinais de instrumentos, a geração do mapa, mais correta será a identificação do padrão. A maioria dos mapas foi desenvolvida utilizando procedimentos de observação direta do experimentalista ou com fotografias para observação posterior para classificação dos padrões de escoamentos. A seguinte seqüência ilustra bem estes procedimentos:

montagem *ensaio* *observação* *construção*
de \Rightarrow *com* \Rightarrow *direta* \Rightarrow *dos*
circuito bifásico *parâmetros diversos* *ou com fotos* *mapas*

A Figura 2.2 ilustra um mapa de padrão de um escoamento vertical ascendente, no caso de água e ar, proposto por Chu (1980), que seguiu o procedimento acima citado. Notamos, inicialmente, que o autor menciona um padrão denominado de “*froth flow*”. Na medida em que não há aceitação generalizada da nomenclatura dos padrões de escoamento, e nem mesmo quanto à descrição característica de cada padrão, podem surgir proposições para novos padrões. No caso, “*froth flow*” indicaria o escoamento agitante (“*churn flow*”). Outro fato que surge neste mapa de Chu é a inclusão das linhas de transição, que indicam os limites de ocorrência de cada padrão. No caso específico deste mapa, que é construído em um diagrama cartesiano de velocidade superficial de gás (V_{SG}) versus velocidade superficial de líquido (V_{SL}), as linhas de transição indicam valores-limites de V_{SG} e V_{SL} para os quais os padrões ocorrem. Observamos que neste mapa o autor inclui as transições estabelecidas por Gouvier e Aziz em 1972 (traço-traço) e sua própria linha de transição (traço inclinado) entre os padrões de escoamento em bolhas e escoamento agitante. Observamos também que há razoável discordância entre os autores em relação a esta transição.

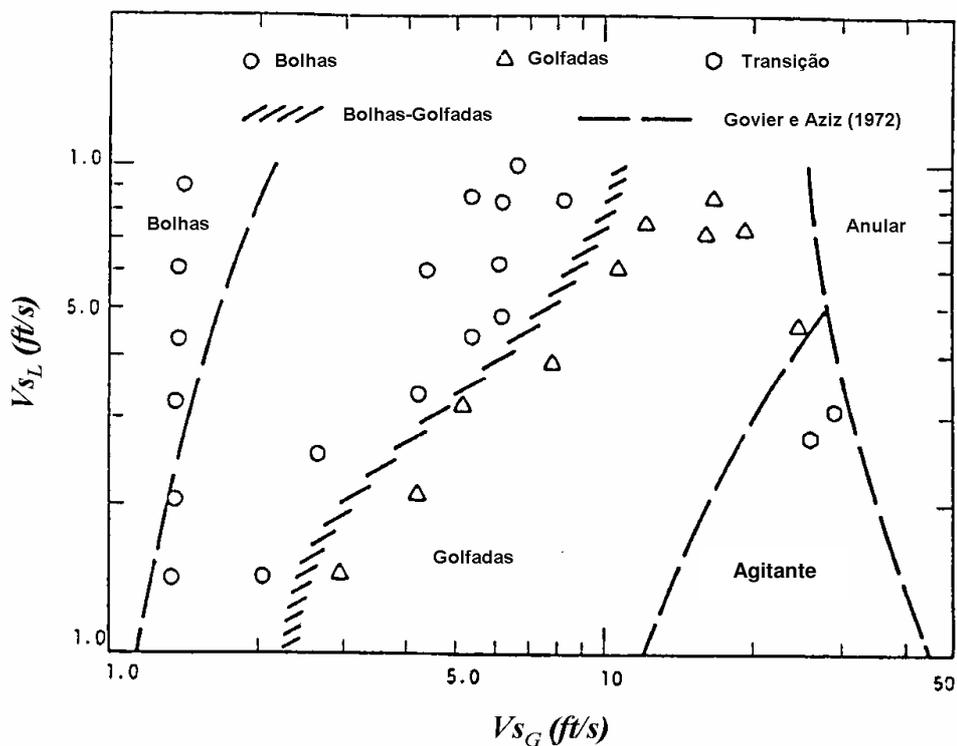


Figura 2.2: Mapa de padrão de escoamento vertical ar-água e pontos experimentais.

(Adaptado de Chu, 1980)

A grande variedade de mapas de padrões de escoamento divulgada na literatura pode ser classificada em dois tipos, de acordo com as variáveis das coordenadas do gráfico cartesiano que usualmente expressam os padrões: coordenadas dimensionais e coordenadas adimensionais.

Coordenadas dimensionais

Os primeiros autores a adotar o mapa de variáveis dimensionais V_{sG} versus V_{sL} foram Wallis (1961) e Sterling (1965). Estes mapas, mostrados como curvas 6 e 3 na Figura 2.3, na versão de Taitel e Dukler (1980) foram obtidos a partir de uma análise fenomenológica do escoamento. O mapa em questão destaca a proposição da curva 'A' para a transição entre os escoamentos em bolhas e golfadas proposta por Taitel e Dukler para o escoamento vertical ascendente de água e ar, e sua comparação com dados experimentais de outros autores. Há razoável discordância entre todos os valores constantes do mapa.

Como já foi dito antes, não há razão para se esperar que qualquer destes mapas tenha aplicação generalizada, para sistemas com características, condições operacionais e propriedades de fluidos diferentes das que foram ensaiadas para a sua obtenção. Apesar de tentativas como a de Gouvier e Aziz (Figura 2.4), modificando as coordenadas de forma a contemplar propriedades dos fluidos, além de variáveis operacionais, não há base teórica que sustente a generalização dos resultados. A ressalva deve ser feita a mapas como o proposto por Taitel e Dukler para escoamentos verticais (Figura 2.5), que têm uma base teórica em sua abordagem fenomenológica. Entretanto, como visto, nem mesmo esses mapas representam adequadamente os padrões de escoamento e suas linhas de transição, como interpretados por vários autores.

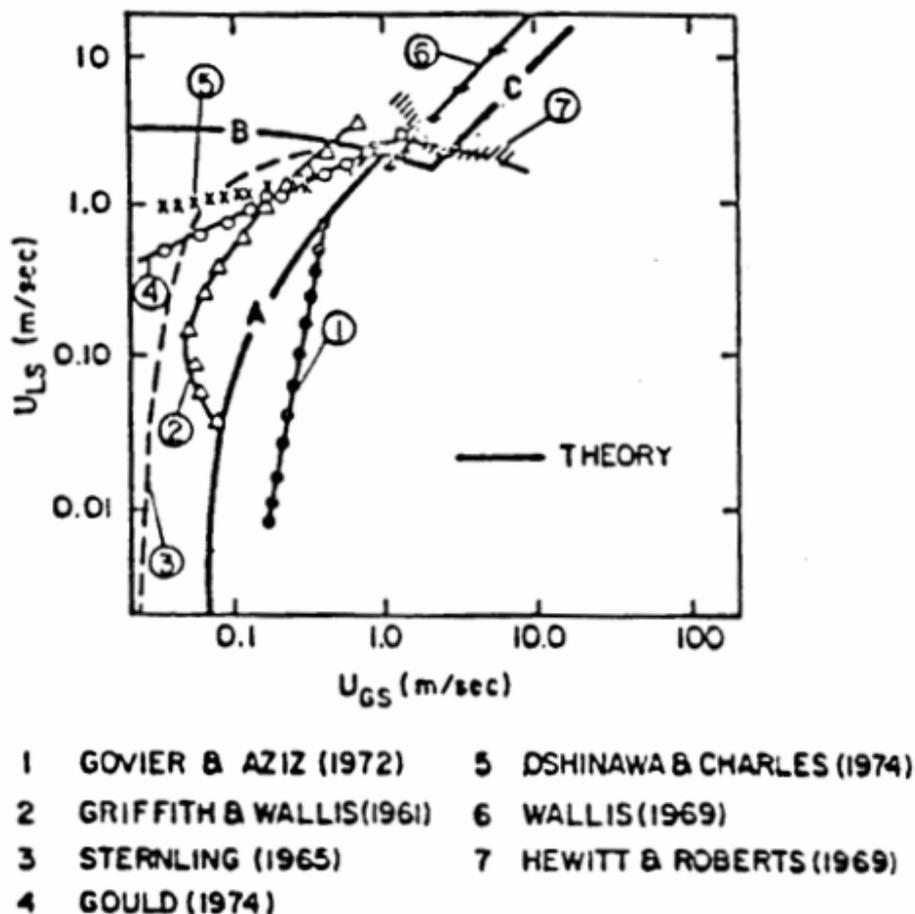


Figura 2.3: Transição entre escoamento em bolhas e o escoamento em goldadas vertical, de acordo com o mapa de Taitel e Dukler.
(Original de Taitel e Duckler, 1980)

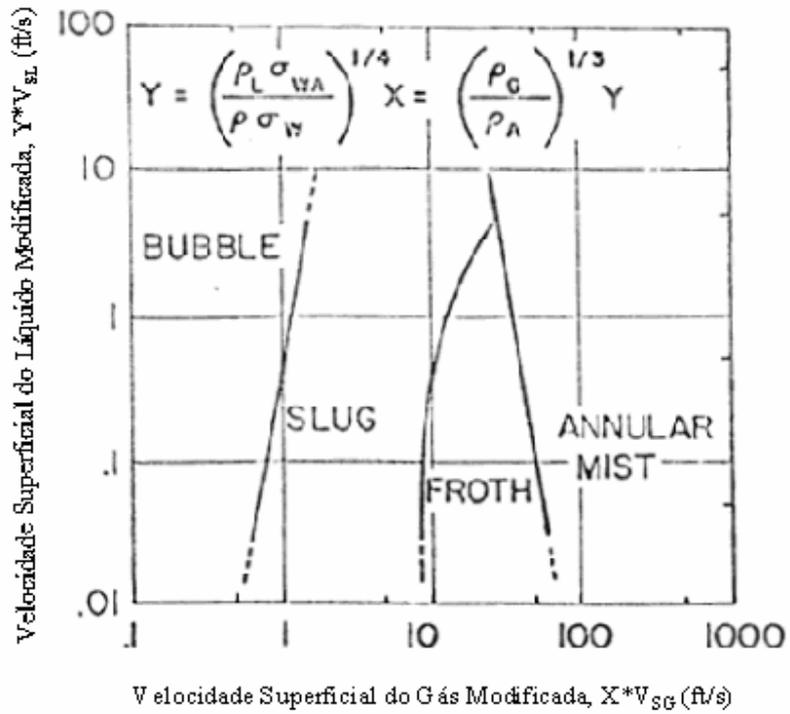


Figura 2.4: Mapa de Gouvier e Aziz para escoamento vertical.
(Adaptado de Govier e Aziz, 1972)³

³ Tradução da figura: bubble – bolhas; slug – golfadas; froth – “espuma” (intermitente agitado); annular mist – anular com névoa.

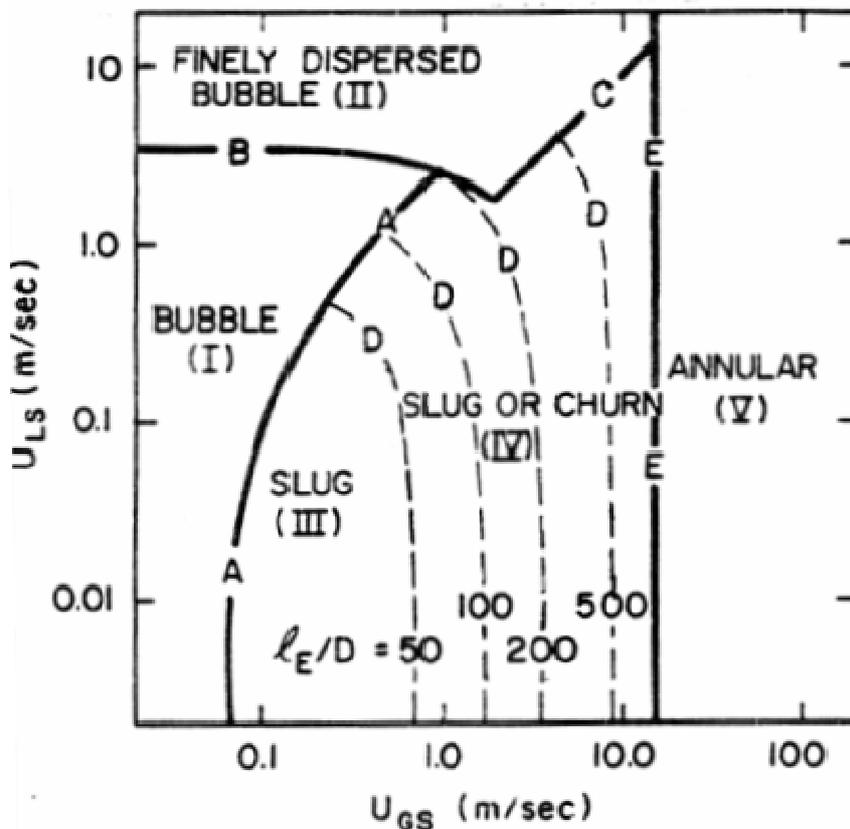


Figura 2.5: Mapa de Taitel e Dukler mostrando todas as transições para o escoamento vertical água - ar em um tubo de 5,0 cm de diâmetro, à 25 °C e 100 kPa. (Original de Taitel e Duckler, 1980)⁴

Coordenadas adimensionais

A tentativa de se utilizar mapas construídos com variáveis adimensionais para identificar os padrões de escoamento e suas linhas de transição deriva, justamente, da possibilidade de generalização para sistemas outros que não os que foram ensaiados originalmente para a geração do mapa. Diferentes forças controlam a transição entre os padrões de escoamento horizontal e vertical, e não estão contempladas nas variáveis adimensionais cartesianas dos mapas. Por exemplo, as forças gravitacional e de inércia devem controlar a transição entre os escoamentos horizontais do tipo estratificado e intermitente. A turbulência do escoamento parece controlar a formação do escoamento horizontal disperso em bolhas. A combinação de todas estas forças em uma variável adimensional não está presente em qualquer um dos mapas de padrões do

⁴ Tradução da figura: ver nota de rodapé da Figura 1.1.

escoamento horizontal que, portanto, não pode representá-los de forma generalizada. Isto é, um certo par de variáveis cartesianas adimensionais pode se referir à certa transição entre padrões de escoamento, mas não se aplicará a outra transição, ou a todo o conjunto de padrões possíveis, inviabilizando a generalização.

Apesar da tentativa de Griffith e Wallis (1961) de mostrar que as variáveis adimensionais V_m^2 / gD versus V_{SG} / V_{SL} (Figura 2.6) governam a transição entre os padrões de escoamento vertical tipo intermitente e anular, não se pode considerar que as mesmas variáveis governam as outras transições do escoamento vertical, como originalmente sugeriram os autores.

O mapa adimensional proposto por Dun e Ross, em 1963, apresentado na figura 2.7, tem como variáveis adimensionais N_{VG} e N_{VL} definidas por $V_{SG} \sqrt[4]{\rho_L / g\sigma}$ e $V_{SL} \sqrt[4]{\rho_L / g\sigma}$, respectivamente.

Em 1974, Oshinowo e Charles propuseram as variáveis adimensionais Fr_{bf} , $\lambda^{1/2}$ e R_V , sendo Fr_{bf} o número de Froude da mistura bifásica definido por $Fr_{bf} = V_m^2 / gD$, e λ um parâmetro definido pelas propriedades das fases $\lambda = (\mu_L / \mu_{H_2O}) / [(\rho_L / \rho_{H_2O})(\sigma / \sigma_{H_2O})^3]^{1/4}$, e R_V definido por $R_V = Q_G / Q_L$ (Figura 2.8).

A dificuldade associada a estes mapas é que as curvas de transição foram obtidas empiricamente, e não derivam de um modelo físico (exceto para o caso de Taitel e Dukler, que obtiveram analiticamente as curvas de transição), seja para generalizar a previsão de ocorrência dos regimes, ou para classificar os regimes estabelecidos experimentalmente. O modelo de Taitel e Dukler, embora desenvolvido para o caso de duto estático, serviu de base de comparação para o presente trabalho desenvolvido.

Na literatura, não foram encontrados estudos de padrões de escoamento para dutos em movimento, motivando o presente trabalho cujo interesse é a aplicação aos *risers* submarinos em águas profundas.

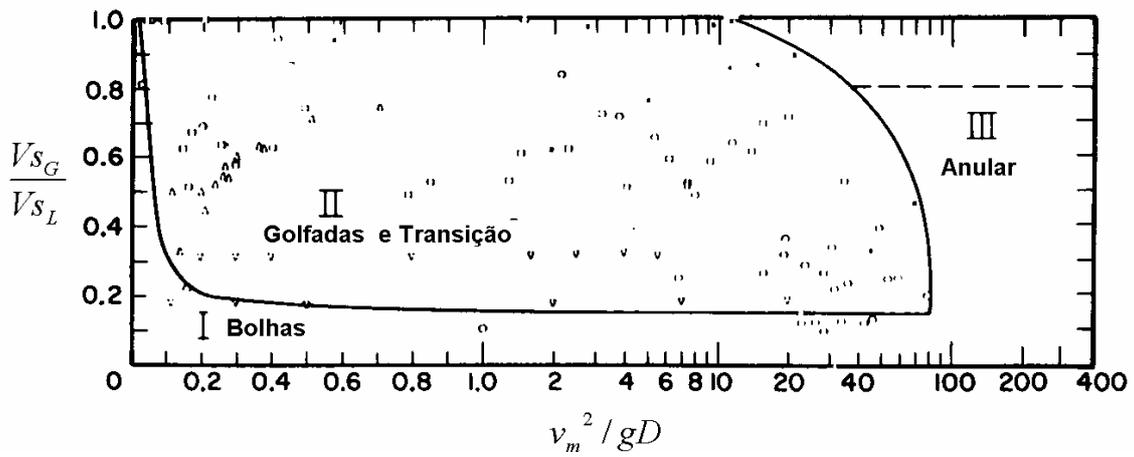


Figura 2.6: Mapa de Griffith e Wallis para escoamento vertical.
 (Adaptado de Griffith e Wallis, 1961)

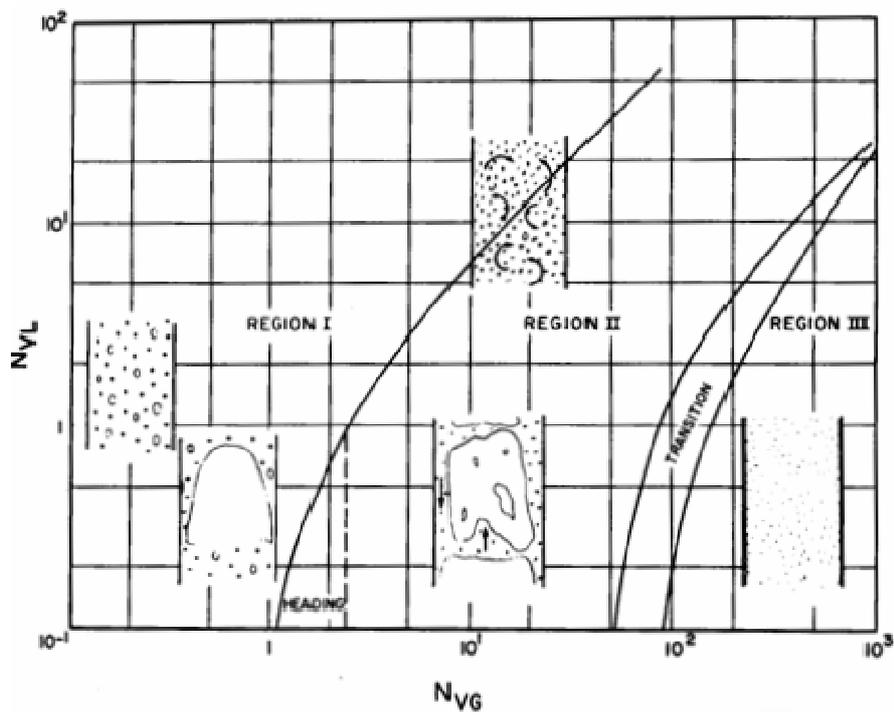


Figura 2.7: Mapa de Dun e Ross para escoamento vertical.
 (Original de Govier e Aziz, 1972)

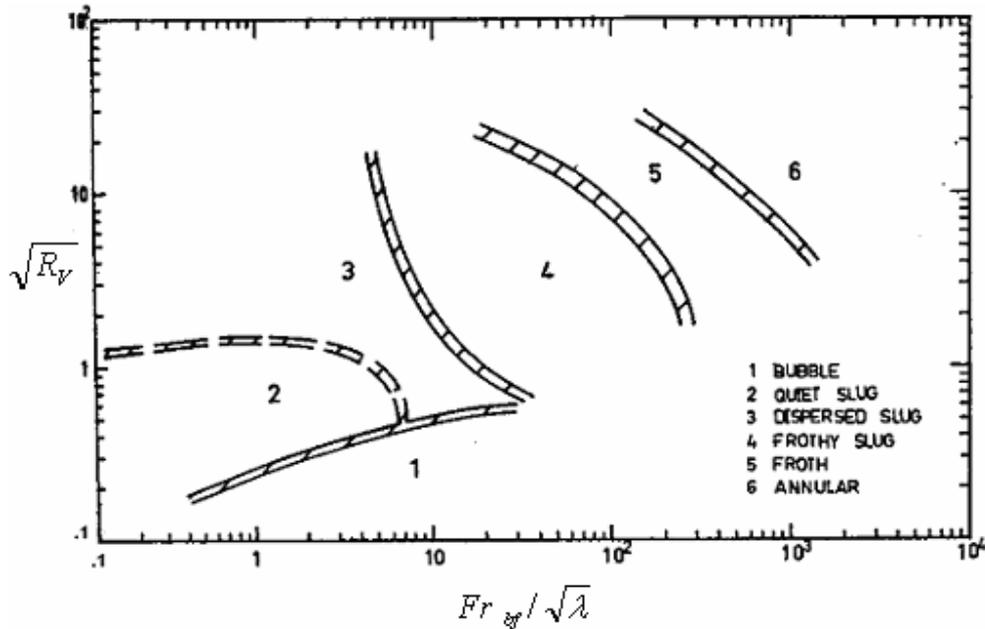


Figura 2.8: Mapa de Oshinowo e Charles para escoamento vertical.
(Adaptado de Oshinowo e Charles, 1974)⁵

2.1.2 Gradiente de Pressão

O gradiente de pressão inclui o componente de energia gravitacional (elevação), o componente devido às perdas por fricção viscosa e os efeitos de energia cinética (aceleração), como no modelo de Beggs e Brill (1973), representados pelos termos do lado direito da equação 2.1.

$$-\frac{dp}{dL} = \rho_s g \sin\phi + f_{bf} \frac{\rho_n V_m^2}{2d} + \rho_a V_m \frac{dV_m}{dL} \quad (2.1)$$

onde:

$$\rho_s = \rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L) \quad (2.2)$$

⁵ Tradução da Figura: bubble – bolhas; quiete slug – golfadas calmas; dispersed slug – golfadas dispersas; frothy slug – golfadas espumante; froth – espuma (agitante); annular – anular.

A definição de ρ_n e ρ_a variam com cada autor. Para escoamento vertical, $\phi = 90^\circ$, $\sin \phi = 1$, $dL = dz$, e a equação pode ser escrita como

$$\frac{dp}{dz} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{el} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_f + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{ac} \quad (2.3)$$

A queda de pressão causada pela variação da energia gravitacional depende da densidade da mistura bifásica, e é geralmente calculada usando o valor do *holdup* do líquido. A maior parte da queda de pressão em escoamento vertical de baixa velocidade é causada por este componente.

A queda de pressão causada pelo fator de fricção requer a avaliação do fator de fricção bifásico.

A queda de pressão causada pela aceleração é geralmente calculada apenas em casos de alta velocidade, sendo negligenciada para velocidades baixas.

Classificação das correlações

Muitas correlações têm sido desenvolvidas para descrever o gradiente de pressão no escoamento bifásico, diferindo na metodologia usada para calcular os três componentes do gradiente de pressão total. Alguns autores consideraram que o gás e o líquido se deslocam com a mesma velocidade (sem escorregamento entre as fases) para avaliar a densidade da mistura, e usam apenas um fator de fricção obtido empiricamente. Outros desenvolveram métodos de calcular o *holdup* de líquido e o fator de fricção; e ainda há aqueles que escolhem dividir as condições de escoamento em modelos ou regimes, e desenvolver correlações separadas para cada uma. As correlações discutidas nesta seção são classificadas de acordo com a sua complexidade, e o método usado para avaliar cada um dos três componentes do gradiente de pressão é apresentado em seguida.

As correlações de escoamento vertical discutidas nesta seção podem ser colocadas numa das três categorias descritas a seguir:

- a. **Não considerando escorregamento e sem distinção do regime de escoamento.** Nas correlações desta categoria, a densidade da mistura é calculada em função da razão gás-líquido de entrada, considerando que o gás e o líquido estão fluindo na mesma velocidade no duto. A única correlação requerida é o fator de fricção bifásico. Nenhuma distinção é feita para os regimes de escoamentos. Nesta categoria, que denominaremos de “**mistura**”, estão incluídos os trabalhos dos seguintes autores

Poettmann e Carpenter (1952)

Baxendell e Thomas (1961)

Fancher e Brown (1963)

- b. **Considerando escorregamento e sem distinção do regimes de escoamento.** As correlações nesta categoria requerem correlações para o de líquido-*holdup* e o fator de fricção. Desde que o líquido e o gás estão viajando com velocidades diferentes, um método deve ser fornecido para descrever a fração do duto ocupado pelo líquido em qualquer seção. A mesma correlação para *holdup* de líquido e fator de fricção é usada para todos os regimes de escoamentos. Como exemplo desta categoria, que chamaremos de “**duas fases simples**”, citaremos a correlação de

Hagendorn e Brown (1965)

- c. **Considerando escorregamento e regime de escoamento.** Não são apenas correlações necessárias para descrever o *holdup* de líquido e o fator de fricção, mas métodos para descrever quais regimes de escoamento ocorrem. Uma vez que o regime de escoamento é estabelecido, o *holdup* e o fator de fricção do líquido são determinados, geralmente com relações diferentes para cada regime de escoamento. O método para calcular o gradiente de pressão devido à aceleração também depende do regime de escoamento. Para este grupo, que denominaremos “**bifásico com padrões de fluxo**”, temos as correlações de

Duns e Ros (1963)

Orkiszewski (1967)

Aziz, Govier, e Fogarasi (1972)
 Chierici, Ciucci e Sclocehi (1973)
 Beggs e Brill (1973)

Tabela 2.1 - Quadro de resumo dos Modelos de escoamento bifásico

Categoria	Escorregamento	Padrão de Escoamento
a. Mistura	não	não
b. Duas fases simples	sim	não
c. Bifásico com padrões de fluxo	sim	sim

Correlação para a Categoria “Mistura”

As três correlações apresentadas nesta categoria são baseadas na mesma consideração e diferem apenas na correlação apresentada para o fator de fricção. Os efeitos de aceleração são desprezados. A equação básica para o cálculo do gradiente de pressão numa dada condição de pressão e temperatura é

$$\frac{dp}{dz} = \rho_n g + f \frac{\rho_n V_m^2}{2d} \quad (2.4)$$

para qualquer sistema de unidades consistentes.

Poettemann e Carpenter (1952) preferiram basear a equação na taxa de fluxo mássico diário. A equação e as unidades dadas abaixo são idênticas à equação original, exceto para a constante no denominador ($2,9652 \cdot 10^{11}$) que foi modificada para uso da equação de Moody ao invés da equação de Fanning para o fator de atrito.

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{1}{144} \left[\rho_n \frac{g}{g_c} + \frac{f w^2}{2,9652 \cdot 10^{11} \rho_n d^5} \right] \quad (2.5)$$

onde:

$\frac{dp}{dz}$ = gradiente de pressão, psi/ft

ρ_n = densidade não deslizante, lbm/ft³

w = vazão mássica, lbm/d

d = diâmetro interno do tubo, ft

f = fator de fricção bifásico adimensional

O fator de fricção foi relacionado empiricamente com o numerador do número de Reynolds de acordo com a Figura 2.9. A razão para isto estaria no fato que, sendo a turbulência alta no escoamento vertical multifásico, a viscosidade não teria maior importância. Desde que o numerador do número de Reynolds não é adimensional, as unidades devem especificadas em lbm/s.ft.

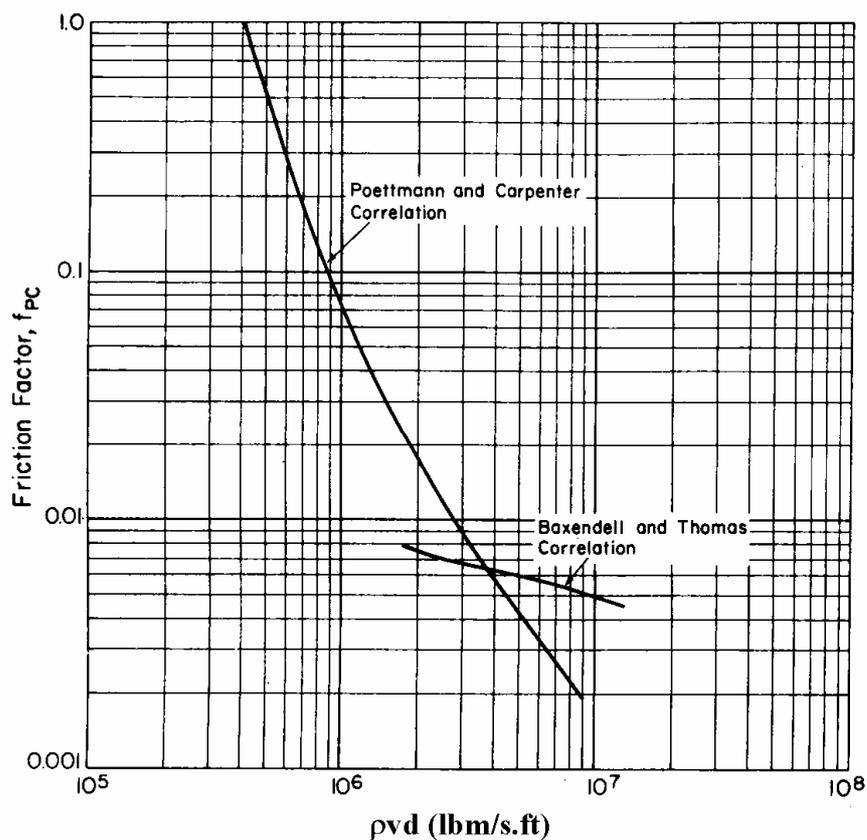


Figura 2.9: Correlação do fator de fricção de Poettmann e Carpenter (Original de Govier e Aziz, 1972)

A correlação de Poettmann e Carpenter foi estabelecida a partir da medição em 49 poços surgentes e de gás lift usando a equação 2.5. Bexendell e Thomas (1961) observaram que com o fator de fricção de Poettmann e Carpenter obtinham pressões de fundo muito menores do que as medidas para poços de altas vazões. Isso significa que fator de fricção é pequeno para $\rho_n V_m d$ grande.

Fancher e Brown (1963) concluíram que a razão gás-líquido tinha influência na perda de carga e que não foi levado em consideração por Poettmann e Carpenter. Na correlação de Fancher e Brown (Figura 2.10) as três curvas para a razão gás-líquido (G/L) podem ser consideradas para representar as razões gás-líquido de 1500 ft³/bbl, 2250 ft³/bbl e 3000 ft³/bbl para efeito de interpolação.

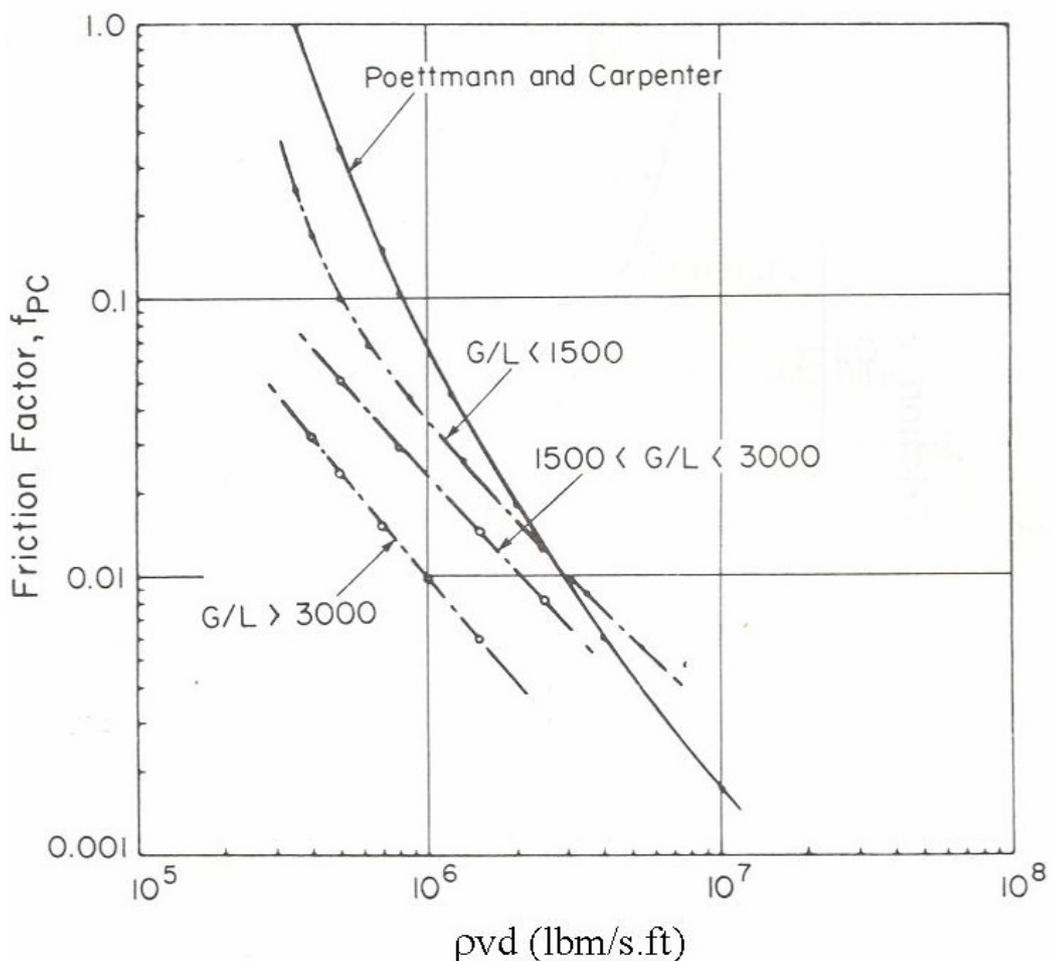


Figura 2.10: Correlação do fator de fricção de Fancher e Brown (Original de Govier e Aziz, 1972)

Correlação para a Categoria de “Duas Fases Simples”

A única correlação a ser discutida nesta categoria é a de Hagedorn e Brown (1965). As curvas geradas a partir desta correlação eram usadas na indústria de petróleo no projeto de sistema de elevação por *gas-lift* contínuo, entretanto foram superadas por correlações desenvolvidas posteriormente. Hagedorn e Brown propuseram uma modificação da correlação de Poettmann e Carpenter, especialmente para escoamento em dutos de pequeno diâmetro. Eles realizaram testes com água e óleo de várias viscosidades acima de 110 cP, e gás em um poço experimental de 1500 ft para estudar o gradiente de pressão ocorrendo durante o escoamento bifásico vertical através de tubulações de 1,0 in, 1,25 in e 1,5 in. O poço teste foi equipado com gás lift e quatro transmissores de pressão eletrônicos e instrumentos para medir a vazão de produção, a vazão de injeção, a temperatura e a pressão na superfície.

Os testes foram conduzidos para ampla variação de vazão de líquido, vazão de gás e viscosidades. Eles demonstraram que os gradientes eram independentes da viscosidade do líquido até aproximadamente 10 cP, mas mostraram que líquidos de viscosidades mais elevadas resultavam em gradientes de pressão significativamente maior. Destes dados, um gráfico de pressão vs. profundidade foi construído para cada teste em cada um dos três diâmetros de dutos usados.

Baseadas nos resultados destes testes, correlações foram desenvolvidas, as quais permitiram o cálculo do gradiente de pressão para uma variedade de diâmetro de tubos, condições de escoamento e propriedades do líquido. As correlações e equações se reduzem para as relações apropriadas ao escoamento monofásico quando a taxa de escoamento do líquido ou gás se torna zero. Todas as correlações envolvem apenas grupos adimensionais, que é uma condição geralmente exigida para análises de similaridade.

O método de solução é um procedimento passo a passo apresentado por Hagedorn e Brown para a equação de gradiente abaixo

$$\frac{\Delta p}{\Delta z} = \frac{1}{144} \left[\bar{\rho}_m + \frac{4 f q_L^2 \dot{m}}{2.9652 * 10^{11} d^5 \bar{\rho}_m} + \bar{\rho}_m \frac{\Delta \left(\frac{V_m^2}{2 g_c} \right)}{\Delta z} \right] \quad (2.6)$$

sendo $\bar{\rho}_m$ a densidade média da mistura, em lbm/ft³, definida por $\bar{\rho}_m = \rho_L H_L + \rho_G (1 - H_L)$ onde H_L é definido pelos adimensionais de N_{LV} , N_{GV} , N_D , N_L propostos por Ros (1961)

e, em termos das variáveis e unidades empregadas pelo autor tem-se:

q_L = vazão de líquido, em bbl/d

\dot{m} = vazão mássica, em lbm/d

d = diâmetro do duto, em in

V_m = velocidade média da mistura, em ft/s

A principal consideração é que o fator de fricção, f , é relacionado ao número de Reynolds e a rugosidade relativa do mesmo modo que para o caso monofásico (Figura A.1). Isto introduz o problema da definição do número de Reynolds para o caso do escoamento bifásico que foi definido por Hagedorn e Brown em unidades de campo por

$$Re_{HB} = 2,2 * 10^{-2} \frac{q_L \dot{m}}{d * \mu_L^{(1-\alpha)} \mu_G^\alpha} \quad (2.7)$$

Correlação para a Categoria “Bifásico com Padrão de Fluxo”

Todos os métodos nesta categoria usaram essencialmente os quatro regimes de escoamento discutidos na seção 2.1.1, exceto para o método de Beggs e Brill (1973). Alguns estudos envolveram alguma mudança no procedimento de cálculo de um ou mais regimes de escoamento dos métodos apresentados anteriormente. O método de Orkiszewski (1967), por exemplo, apresenta novas correlações apenas para o escoamento em golfadas. As correlações usadas nos outros regimes de escoamento foram tomadas de trabalhos publicados anteriormente.

Cada método é discutido separadamente e as correlações para o *holdup* do líquido ou densidade da mistura, fator de fricção e termo de aceleração são dados para cada regime de escoamento. Os limites para determinar qual o regime de escoamento existe são dados também.

A correlação de Duns e Ros (1963) é o resultado de um extensivo estudo de laboratório em que o *holdup* do líquido e o gradiente de pressão foram medidos. Foram desenvolvidas correlações para velocidade de deslizamento (do qual o *holdup* pode ser calculado) e o fator de fricção de cada um dos padrões de escoamento (Figura 2.1). Ros mostrou que sua correlação oferece resultados essencialmente idênticos aos de Baxendell e Thomas para altas taxas de escoamento.

Os resultados do estudo de Orkiszewski (1967) são uma extensão do trabalho feito por Griffith e Wallis (1961). No trabalho de Orkiszewski são apresentados desvios entre o valor calculado e o valor medido para os métodos modificados de Griffith-Wallis, Duns-Ros, e o trabalho publicado por Hagedorn e Brown. Quando os três métodos são comparados, apenas o método de Griffith-Wallis é suficientemente exato (erro médio) e preciso (desvio padrão) sobre as faixas de condições de entrada. Os testes de Orkiszewski foram 111 em fluxo em golfadas, 26 parcialmente em bolhas e golfadas, 7 em golfadas e agitante, 4 completamente em bolhas e nenhum em anular.

Seguindo o procedimento de Orkiszewski o gradiente de pressão pode ser calculado usando a equação abaixo:

$$\Delta p = \left[\frac{1}{144} \frac{\overline{\rho}_m + \tau_f}{1 - m q_g / 4.637 A_p^2 \overline{\rho}_m} \right] \Delta h \quad (2.8)$$

onde, em termos das variáveis e unidades empregadas pelo autor tem-se:

τ_f = gradiente de pressão por fricção, psf/ft

h = profundidade, ft

A_p = área do duto, ft²

$\overline{\rho}_m$ = densidade média do fluido, lb/ft³

Δp = queda de pressão, psi

\bar{p}_m = pressão média, psi

\dot{m} = vazão mássica, lb/s

q_g = vazão volumétrica de gás, ft³/s

Beggs e Brill (1973) desenvolveram correlações de perda de carga baseadas em dados tomados de um tubo transparente de 90 ft de comprimento. Comprimento suficiente foi fornecido desde a entrada entre o ponto de mistura gás-líquido até a seção de teste, para eliminar os efeitos de transição antes que qualquer medida fosse realizada.

Os parâmetros estudados e suas faixas de variação foram: (1) taxa de escoamento de gás de 0 a 300 Mscf/d (0,1 m³/s); (2) taxa de escoamento de líquido de 0 a 30 gal/min (2 L/s); (3) pressão média do sistema de 35 a 95 psi (241 a 655 kPa); (4) diâmetro do tubo de 1 a 1,5 in (25,4 mm a 38,1 mm); (5) *holdup* de 0 a 0,87; (6) gradiente de pressão de 0 a 0,8 psi/ft (1,7 kPa/m); (7) ângulo de inclinação de -90° a +90° e (8) padrão de escoamento (bolhas, golfadas, agitante e anular).

Os fluidos usados foram ar e água. Para cada diâmetro de duto, as vazões de ar e água foram variadas de tal forma que todos os padrões de escoamentos foram observados quando o duto estava na horizontal. Depois de testado um particular conjunto de taxas de escoamento, o ângulo do duto era variado através da faixa de ângulos, de tal forma que os efeitos da variação do ângulo no *holdup* e na queda de pressão fossem observados. O *holdup* e a queda de pressão foram medidos nos ângulos de 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 35°, 55°, 75°, 85°, 90° e -90° com relação a horizontal. Foram realizados um total de 584 testes.

A equação do gradiente de pressão pode ser usada para calcular a perda de carga pelo método Beggs e Brill de duas formas: não isotérmico e isotérmico.

No primeiro caso, se a temperatura não é constante, esta será função da distância, assim como o fator de compressibilidade Z. Assim, uma solução do tipo iterativa será necessária onde

um decréscimo de pressão é escolhido. Se a temperatura é função da distância, um incremento da distância é estimado. A equação então é resolvida para o incremento da distância correspondente à variação de pressão, e todas as variáveis são tomadas na pressão e temperatura média como mostrado na fórmula abaixo.

$$\Delta z = \Delta p \left[\frac{1 - \frac{\bar{\rho}_s \bar{V}_m \bar{V}_{sg}}{p}}{\text{sen } \phi \bar{\rho}_s g + f_{bf} \frac{\bar{\rho}_n \bar{V}_m^2}{2d}} \right] \quad (2.9)$$

As variáveis com barra são tomadas na pressão e temperatura média. Se a distancia calculada não for próxima do valor escolhido, um novo valor é assumido e o procedimento repetido até os dois valores estarem próximos.

O segundo caso é aplicado a escoamento isotérmico com um ângulo de inclinação constante. O procedimento apresentado aqui é de aplicação relativamente simples e por se tratar de escoamento isotérmico não envolve processo iterativo. As equações foram desenvolvidas para todas as variáveis, de tal forma que não se fizesse necessário referenciá-las por meio de gráficos e tornando viável a programação para computador. A equação para cálculo do gradiente de pressão é dada abaixo, onde o sinal negativo significa que o gradiente de pressão está diminuindo ao longo do seu escoamento

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{\rho_s g + f_{bf} \frac{\rho_n V_m^2}{2d}}{\left(1 - \frac{\rho_s V_m V_{sg}}{p_i} \right)} \quad (2.10)$$

sendo $\rho_s = \rho_L H_L + \rho_G (1 - H_L)$, H_L o *holdup* do líquido e f_{bf} o fator de atrito bifásico definido no Apêndice A, e p_i é a pressão de entrada.

2.2 Risers em Movimento

Um duto ascendente do fundo do mar até a superfície, parte de uma estrutura offshore de produção petrolífera em águas profundas, submete-se a ação dinâmica de natureza aleatória devido ao movimento da plataforma, movimento das ondas e à corrente marítima. Este tipo de duto, denominado *riser*, pode ser visto na Figura 2.11. Um *riser* é uma tubulação geralmente esbelta, em configuração de catenária, se for de produção em semi-submersível ou FPSO, ou na vertical, se o *riser* for de perfuração. Na superfície do mar o *riser* de produção é conectado ao sistema flutuante (plataformas ou navios), e no fundo é conectado à cabeça do poço por uma linha no leito submarino. Sua função é transportar a produção de óleo misturado a água, gás e sedimentos desde o poço até a plataforma de produção. Os *risers* usados na produção podem ser rígidos ou flexíveis.

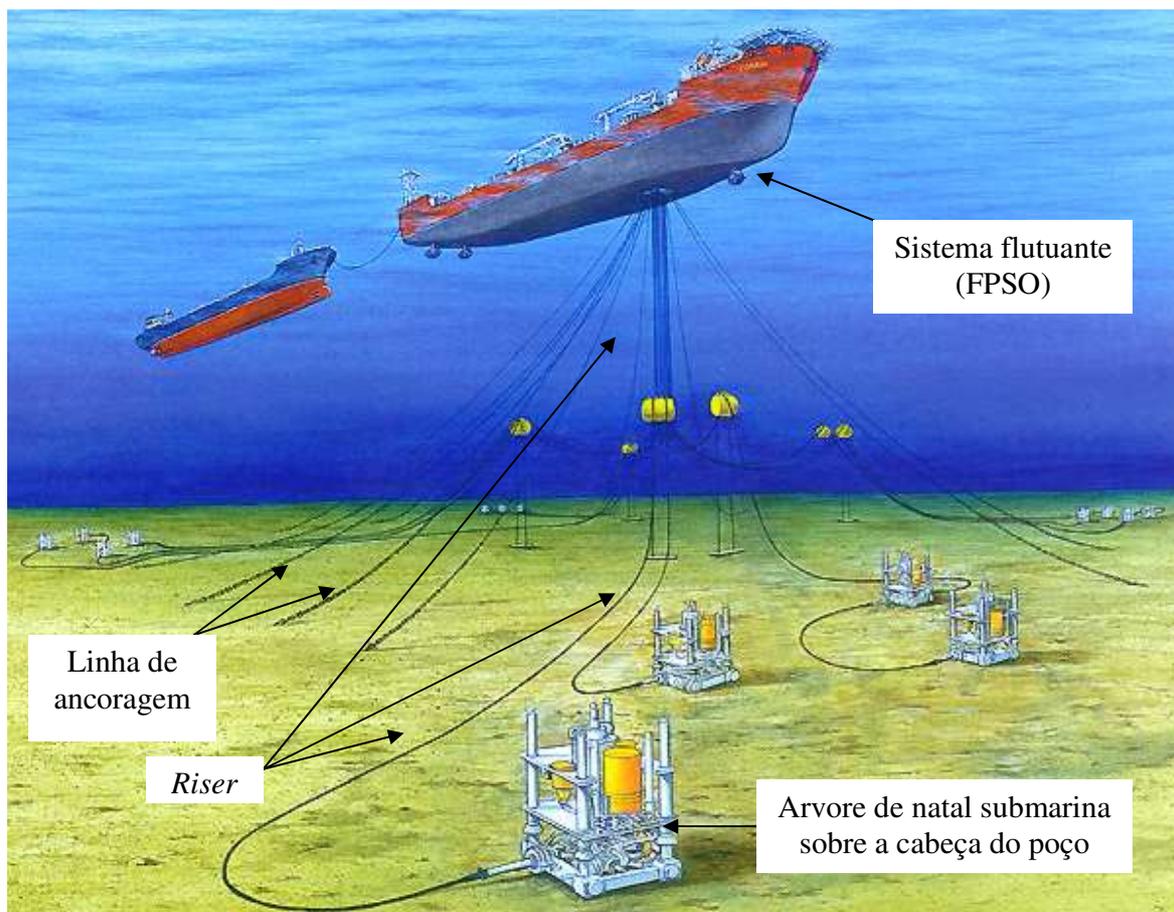


Figura 2.11: Esquema de funcionamento do *riser*
(Adaptado de www.offshore-technology.com)

Riser Flexível

Os *risers* flexíveis são mangotes especiais (Figura 2.12) empregados em atividades de produção em plataformas do tipo flutuantes. São compostos por camadas superpostas (Figura 2.13) e sua principal característica é a baixa rigidez à flexão que permite ajustar-se com os movimentos da plataforma. O *riser* flexível opera de forma similar à catenária, encontrando-se diâmetros internos que variam de 102 mm (4 in) a 305 mm (12 in), .

A configuração básica e descrição das camadas que constituem um *riser* flexível, ilustrado na figura 2.13, são, segundo Souza, 1999 (apud Rodrigues, 2004):

- Carcaça de aço intertravada: é a camada mais interna *riser*, de aço inoxidável, constituída de fitas intertravadas, por onde escoam o fluido de produção (óleo, gás e água). Esta camada não resiste aos esforços de tração nem possui estanqueidade, porém, devido à sua forma, possui alta flexibilidade. Sua geometria permite grande resistência à pressão interna, mas em contrapartida, baixa rigidez axial. Sua função é evitar o colapso da estrutura devido a ação da pressão externa e fornecer resistência a abrasão.
- Camada plástica interna (bainha termoplástica): é uma camada de nylon extrudada sobre a carcaça de aço intertravada, também conhecida como barreira de pressão, com finalidade de oferecer vedação resistindo à abrasão, corrosão e ataque químico dos fluidos produzidos.
- Armadura de reforço a pressão: é uma camada opcional de reforço à pressão, formada por um ou dois arames espiralados. Tem como função oferecer resistência aos esforços radiais provenientes dos carregamentos de pressão interna e externa e as cargas mecânicas radiais.
- Armadura de tração: são duas camadas de tendões de aço dispostos em forma helicoidal com sentido de enrolamento invertido conferindo rigidez à torção. Estas camadas também resistem às cargas axiais e à pressão interna para o tubo de produção.

- Camada plástica externa: é uma camada externa de polietileno ou nylon de alta densidade extrudada sobre as armaduras de tração, mantendo-as na posição correta e protegendo-as contra abrasão, corrosão e outros danos.

Dependendo do fabricante e da solicitação a que as linhas estarão submetidas, outros tipos de camadas podem ser utilizados de forma a atender a condição de trabalho. São elas:

- Camadas plásticas intermediárias com função de evitar o contato, e por consequência o desgaste, entre as camadas de armaduras de aço.
- Camadas de arames espiralados para reforço de pressão.
- Camada de isolamento térmico.
- Camada intertravada externa para reforço à abrasão.
- Fibras de tecido e/ou adesivo para manuseio durante a fabricação.

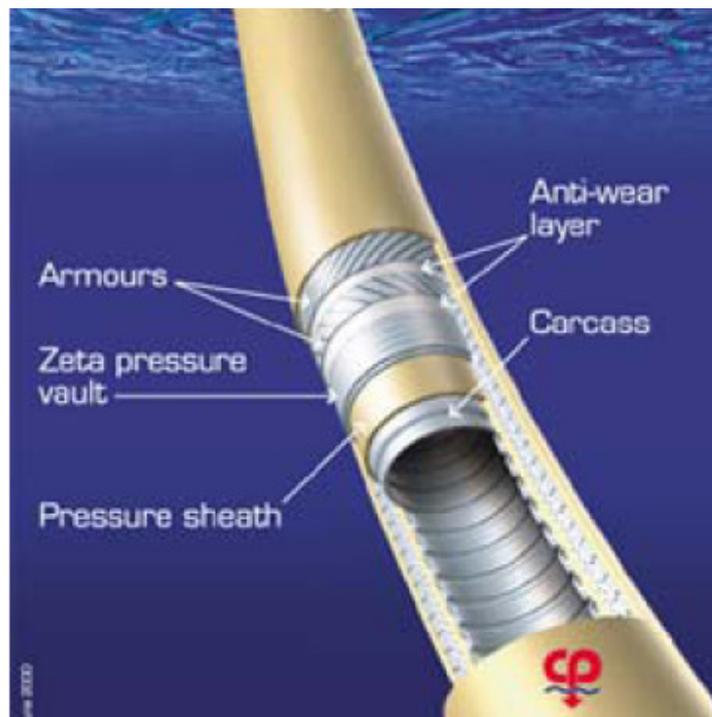


Figura 2.12: *Riser* flexível
(Fonte: Franco, 2004)

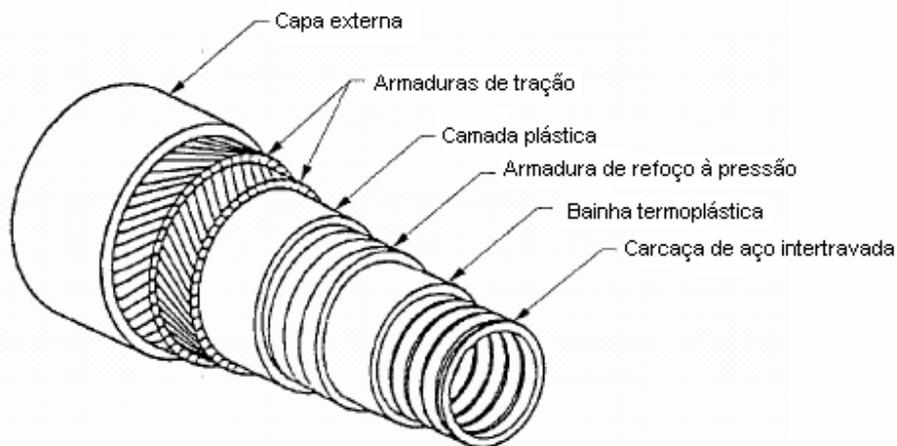


Figura 2.13: Camadas de *riser* flexível
(Fonte: Rodrigues, 2004)

Riser Rígido

Os *risers* rígidos são constituídos por uma série de tubos de aço, de aproximadamente 12 metros de comprimento, conectados (Figura 2.14). Os *risers* rígidos podem ser usados na perfuração e na produção, mas devem ser empregados dentro de certos limites operacionais, pois os mesmos não devem sofrer grandes deslocamentos e devem estar sempre tracionados. Os *risers* rígidos de produção têm diâmetro externo da ordem de 102 mm a 250 mm (4 in a 10 in), dependendo da vazão de produção, e são muito utilizados em plataformas de produção do tipo TLP (*tension leg platform* – plataforma com tendões tracionados) e Spar (semelhante à TLP, porém com mono-flutuador), e eventualmente, em outros tipos de estruturas que não ofereçam risco de grandes deslocamentos. Para os *risers* de perfuração, a Petrobrás conta com *risers* de diâmetros de externos de 457 mm a 533 mm (18 in a 21 in) aproximadamente.

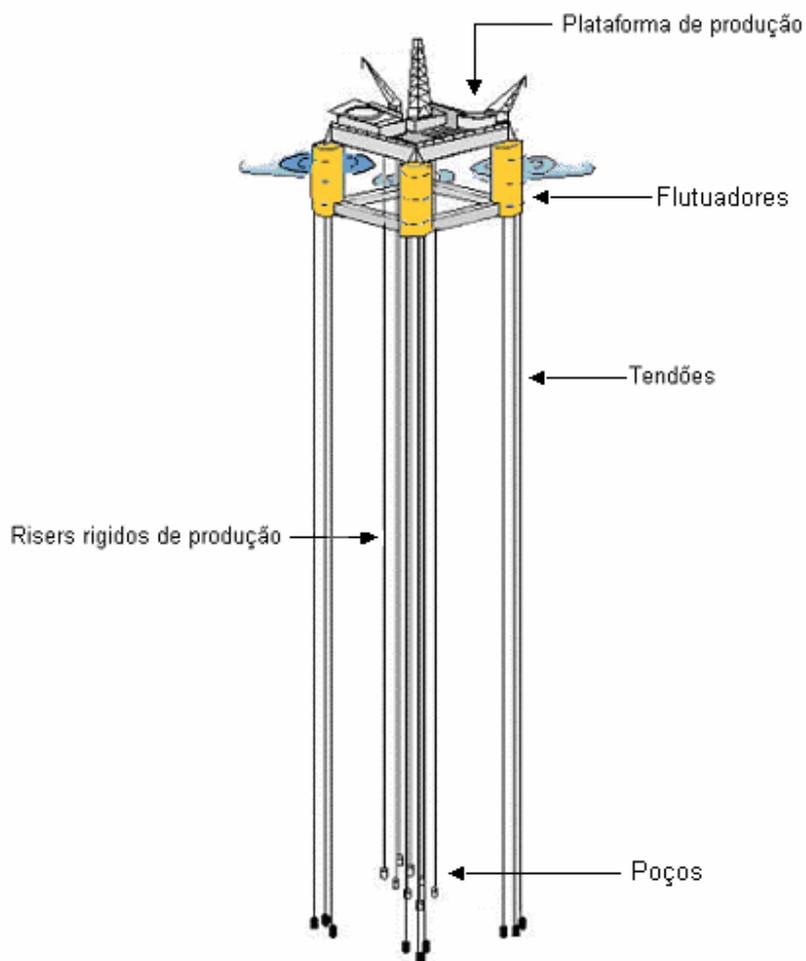


Figura 2.14: Configuração do *riser* rígido de produção
(Adaptado de www.offshore-technology)

A vida útil do *riser* está ligada aos seguintes fatores: movimento da plataforma, das ondas e da correnteza, propriedades mecânicas do *riser*, pressão hidrostática do fluido interno e externo e a vibração induzida por vórtices. Os *risers* são projetados para suportar grandes trações, mas o efeito combinado dos fatores acima é o principal responsável pela diminuição da vida útil do *riser* devido à fadiga. Maiores detalhes sobre a mecânica de *risers* podem ser encontrados na bibliografia, como por exemplo, em Chakrabart (1987).

Capítulo 3

Aparato Experimental

Com o intuito de estabelecer os padrões de fluxo no escoamento vertical ascendente bifásico de água e ar em dutos em movimento transversal visando sua aplicação ao fluxo em *risers* de produção de petróleo, foi construído um aparato experimental, instalado no laboratório de estudos de fluxo multifásico do Departamento de Engenharia de Petróleo, da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.

O aparato consta de:

- 1) Tanque de água.
- 2) Tanque pulmão para estocagem de ar comprimido.
- 3) Sistema de instrumentação.
- 4) Sistema de injeção de fluidos.
- 5) Tubulação de condução de escoamento.
- 6) Mecanismo de oscilação.

3.1 Circuito de Fluxo

Na Figura 3.1, encontra-se, em forma esquemática, o aparato experimental. A água armazenada no tanque de água e o ar estocado no tanque pulmão são conduzidos até o misturador por linhas de PVC de 25,4 mm (1 in nominal) para a água, e de aço galvanizado de 12,7 mm (0,5 in. nominal) para o ar. Uma bomba centrífuga é usada para promover o fluxo de água, e o ar é comprimido através de compressores. As vazões de água e ar são medidas com o uso de rotômetros instalados antes da chegada ao misturador.

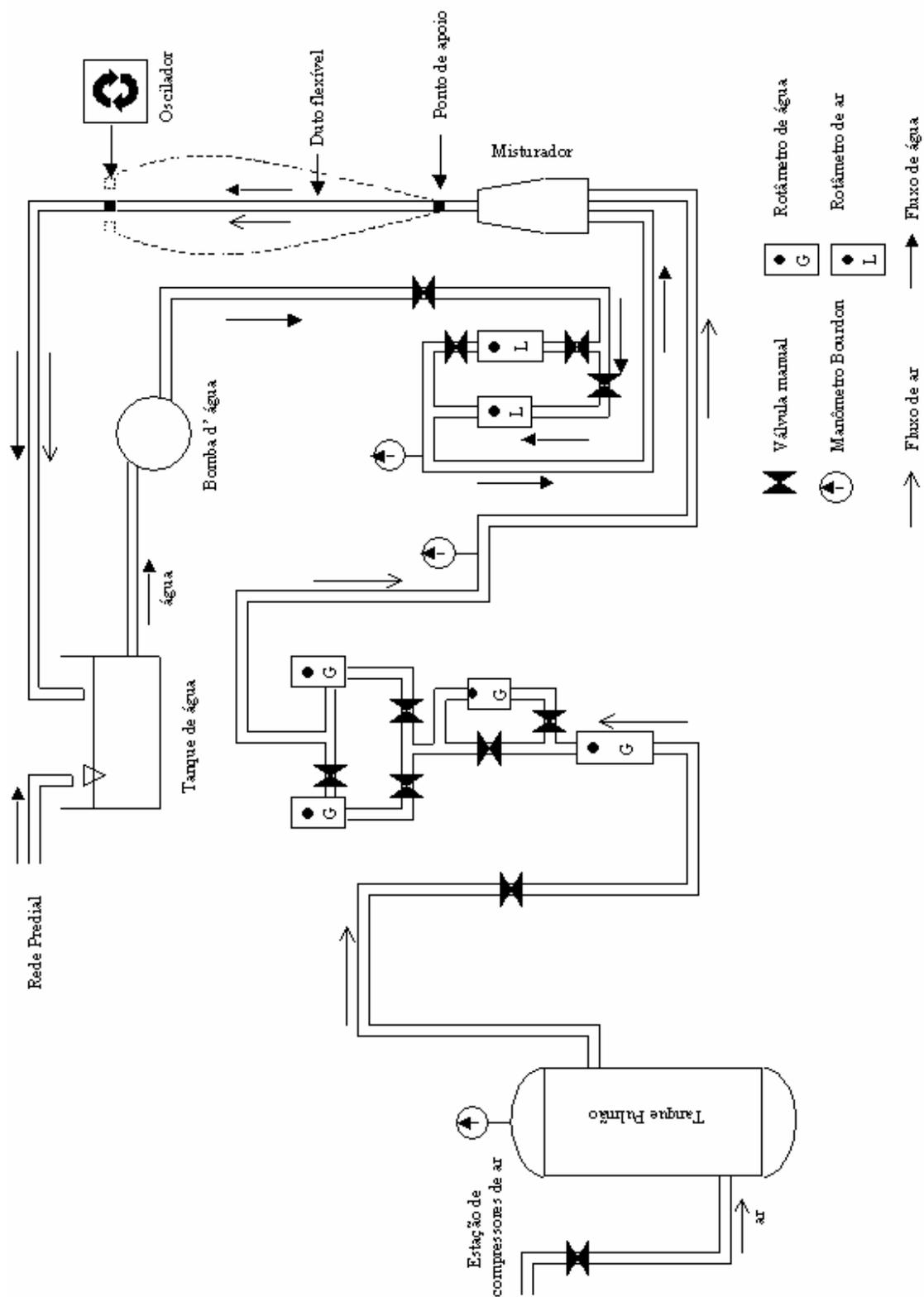


Figura 3.1: Esquema do aparato experimental

O misturador promove a junção dos fluxos de água e ar, por intermédio de três bocais para água na base do misturador, e um espigão perfurado e instalado no centro do misturador para o ar. O escoamento bifásico é conduzido por meio de uma mangueira de plástico transparente de 25,4 mm (1 in) de diâmetro interno, em um trecho vertical de 8,0 m, através da qual pode-se visualizar os padrões de fluxo. No final do escoamento, a água é captada no tanque de estocagem, de onde novamente volta a ser bombeada formando um circuito fechado, enquanto o ar é liberado para a atmosfera.

3.2 Movimentação de Fluidos

O sistema de estocagem de água é um tanque de fibra de 500 L (Figura 3.2), com uma bóia interna para controle de nível, possuindo saída na parte inferior e retorno pela parte superior.

Para o sistema de estocagem de ar, foi utilizado um tanque pulmão (Figura 3.3) em aço com pressão máxima de trabalho admissível de 950 kPa, dotado de sistema de segurança com alívio de pressão e capacidade de estocagem de 175 L de ar. A entrada de ar sendo pela parte inferior e a saída pela parte superior.



Figura 3.2: Tanque de água.



Figura 3.3: Tanque pulmão.

Sistema de Bombeamento e Compressão dos Fluidos

O sistema de bombeamento (Figura 3.4) consiste de uma bomba centrífuga com motor de 1,5 cv de potência, 3450 RPM e 60 Hz, que recebe a água do tanque de água e bombeia para o misturador por meio da tubulação de PVC.

O sistema de compressão possui um compressor de 15 cv de potência, volume interno de 365 L, pressão máxima de trabalho de 1,3 MPa, com capacidade de comprimir 1700 L/min de ar. O mesmo, conforme pode ser visto na Figura 3.5, comprime o ar para o tanque pulmão, de onde é conduzido para o misturador por meio da linha de aço.



Figura 3.4: Bomba centrífuga usada no bombeamento da fase líquida.



Figura 3.5: Compressor usado na compressão da fase gasosa.

3.3 Sistema de Instrumentação

As variáveis medidas neste estudo foram: a vazão de água, a vazão de ar, a pressão de entrada da água e a queda de pressão ao longo do escoamento na mangueira de plástico.

Para medição da vazão de água, utilizaram-se dois rotâmetros cujas faixas de operação são de 0 a 400 L/h, com desvio padrão de $\pm 2\%$ do fundo de escala, que corresponde a 8 L/h, e de 0 a 4000 L/h, com desvio padrão de $\pm 2\%$ do fundo de escala, que corresponde a 80 L/h.

Para medição da vazão de ar foram utilizados três rotâmetros cujas faixas de operação eram de 0 a 50 L/h, com desvio padrão de $\pm 2\%$ do fundo de escala, que corresponde a 1 L/h, 0 a 4000 L/h, com desvio padrão de $\pm 2\%$ do fundo de escala, que corresponde a 80 L/h, e 0 a 40.000 L/h com desvio padrão de $\pm 2\%$ do fundo de escala que corresponde a 800 L/h.

Para medição da pressão de entrada de água foi usado um manômetro Bourdon com uma faixa de operação de 0 a 60 psi (0 a 414 kPa) com desvio padrão de 0,5 psi (3,45 kPa) .

Para medição da perda de carga na linha de fluxo, de acordo com o esquema mostrado na Figura 3.6, foi usado um transdutor diferencial Validyne com diafragma nº 42, com uma faixa de operação de 0 a 20 psi (138 kPa) e desvio padrão de $\pm 0,25\%$. Isso permite cobrir toda a faixa de pressão associada às vazões esperadas nos testes.

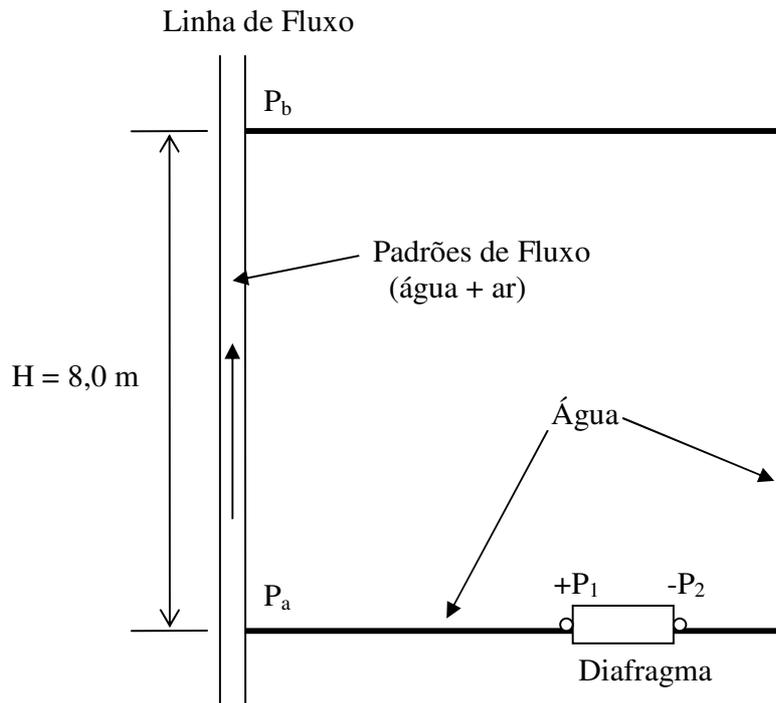


Figura 3.6: Esquema da Medição do Diferencial de Pressão.

Da análise do esquema acima temos que:

$$P_1 = P_a \quad (3.1)$$

$$P_2 = P_b + \rho_{\text{água}} gH \quad (3.2)$$

Fazendo $P_1 - P_2$ temos que a leitura no transdutor é dada por,

$$P_1 - P_2 = P_a - P_b - \rho_{\text{água}} gH \quad (3.3)$$

Logo, a diferença de pressão na linha é obtida da leitura no transdutor por:

$$P_a - P_b = P_1 - P_2 + \rho_{\text{água}} gH \quad (3.4)$$

Devido à natureza flutuante da queda de pressão no escoamento bifásico, a saída do transdutor Validyne foi conectada a um osciloscópio para fornecer o valor médio da leitura do transdutor. Dessa forma, o valor de $P_2 - P_1$ é lido diretamente na forma de voltagem, e os valores de densidade usados na equação acima foram obtidos mediante as condições de pressão e temperatura nas quais os testes foram realizados.

3.4 Riser Bifásico Oscilante

Para se obter o escoamento bifásico, foi instalado um misturador para injetar as duas fases e gerar os diferentes padrões de fluxo (bolhas, golfadas, agitante e anular).

Este dispositivo, conforme a Figura 3.7 consta de um tubo transparente de acrílico onde, no centro da parte inferior existe um espigão perfurado, por onde ocorre a passagem de ar. Na base inferior do misturador são posicionados três bocais injetores em “V” por onde flui a água para o seu interior, onde então acontece a mistura entre as fases líquida e gasosa. Na parte superior há uma conexão com a mangueira transparente para visualização do fluxo conforme o padrão de escoamento obtido.

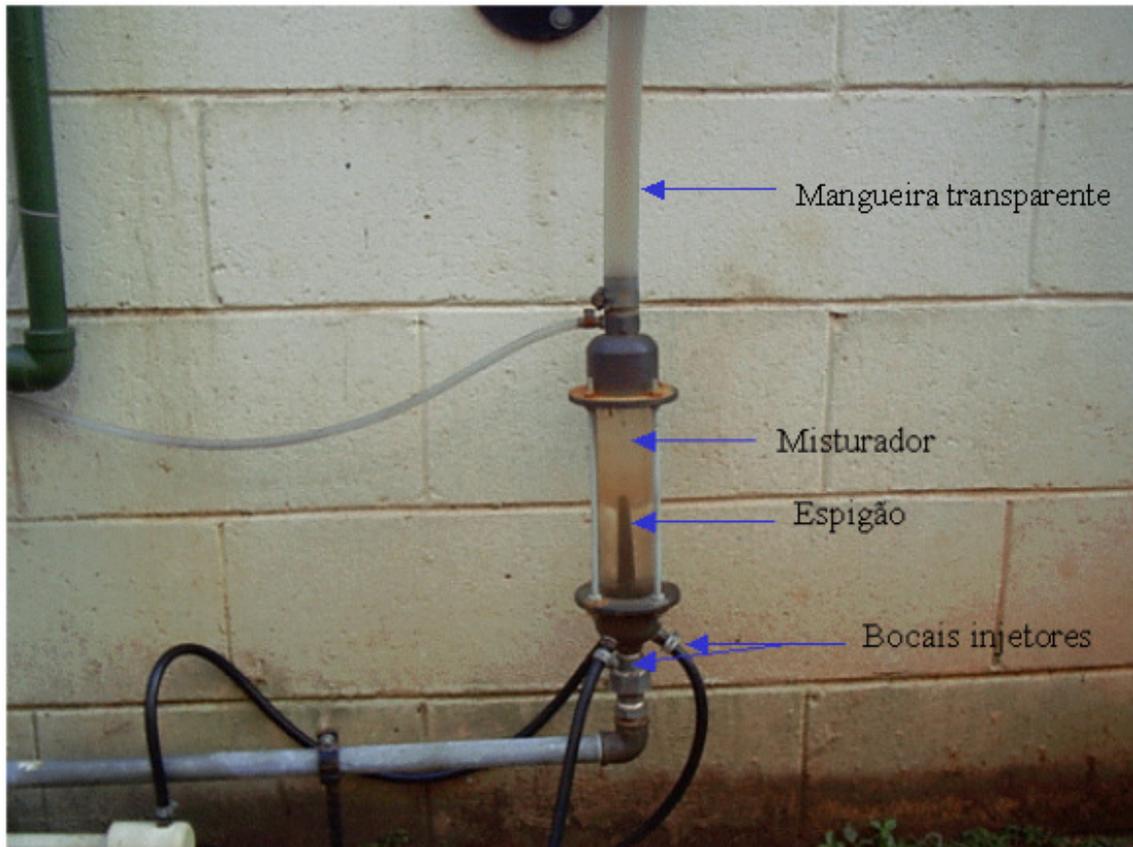


Figura 3.7: Misturador de fases.

Sistema de Condução do escoamento

A linha de condução do escoamento é uma mangueira de plástico transparente de 25,4mm de diâmetro interno (1,25 in nominal) e 8,0 m de comprimento. Nas duas extremidades, inferior e superior da mangueira, existe um sistema de apoio, engastado, de forma a se obter a simulação do movimento do *riser*. Deve-se atentar para o fato que se o sistema for rotulado ou engastado isso irá alterar a resposta do *riser*.

A opção por uma mangueira lisa, flexível e transparente procurou atender os seguintes critérios, respectivamente: evitar o efeito de rugosidade sobre a queda de pressão, obter uma sinuosidade apreciável na trajetória do fluxo, permitir a visualização dos padrões bifásicos.

Sistema de Oscilação

O movimento do *riser* é dado pelo movimento da plataforma devido às ondas e às correntes marítimas. No caso em estudo, esse movimento foi simulado com a construção de um sistema de oscilação, conforme pode ser visto nas Figuras 3.8 e 3.9 conhecido como braço escocês, acionado por um motor elétrico modelo B 90-L4 de 1 CV, 1720 RPM e frequência de 60Hz.

O movimento de rotação fornecido pelo motor é controlado com o uso de um inversor de frequência (Figura 3.10), modelo CFW-08, com potência de 0,25 a 10 CV. Esse inversor varia a rotação do motor de 0 a 1720 RPM podendo cobrir diferentes rotações dentro desta faixa.

O movimento de rotação do motor é transmitido diretamente para um redutor, tipo MR5, com potencia de 1,35 CV, 1720 RPM e capacidade de redução de 39:1. O movimento do redutor é transmitido através da polia do redutor para a polia do oscilador fazendo girar a mesa do oscilador (prato giratório). A mesa do oscilador possui um pino posicionado fora de centro da mesa, possibilitando assim que o movimento de rotação da mesma seja convertido em movimento linear alternado do braço mecânico, graças a existência de uma guia transversal na extremidade, por onde se desloca o pino.

Este mecanismo de articulação, conhecido por braço escocês, segue a seguinte equação:

$$x(t) = r * \cos(2\pi f * t)$$

Portanto, a amplitude $2r$ é determinada pelo posicionamento radial do pino, e a frequência, f , é relacionada à velocidade de rotação n (RPM) por $f = n/60$. O movimento imposto à seção de teste teve amplitude de 0,5 m ($r = 0,25$ m) e a frequência variou de 0 Hz a 1,5 Hz.

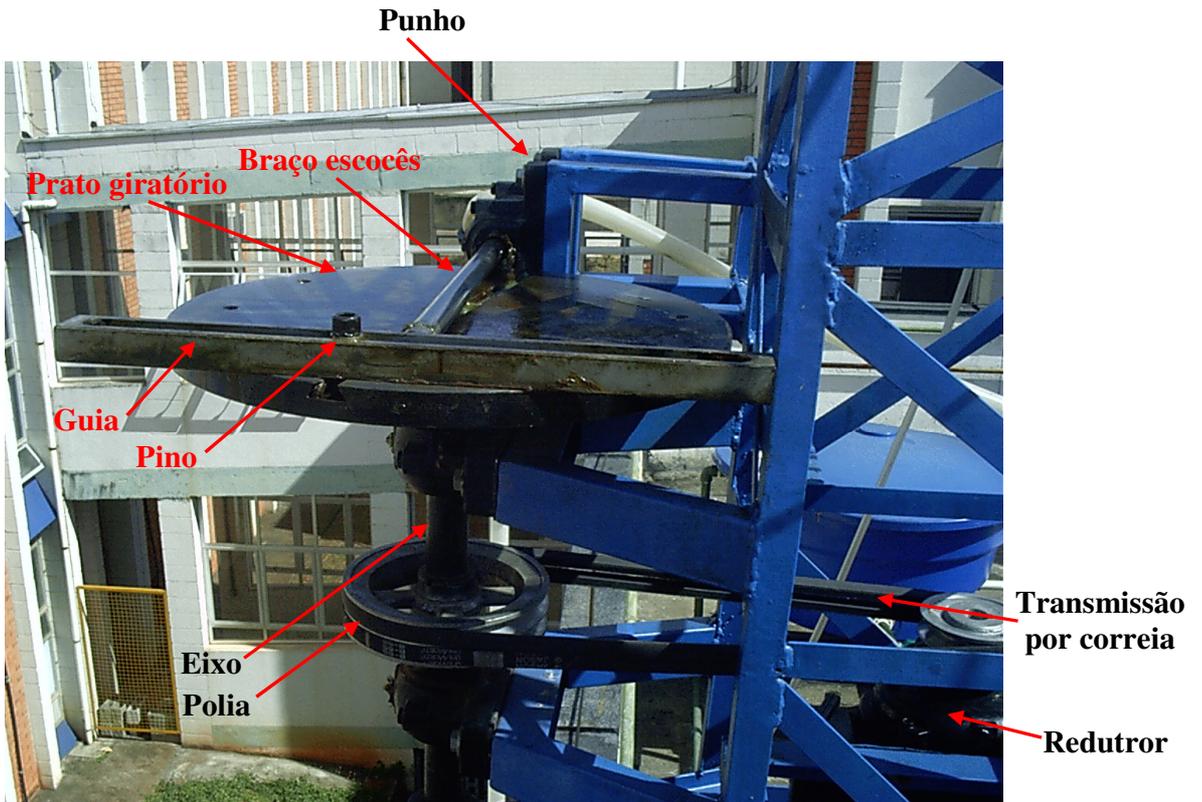


Figura 3.8: Oscilador mecânico.

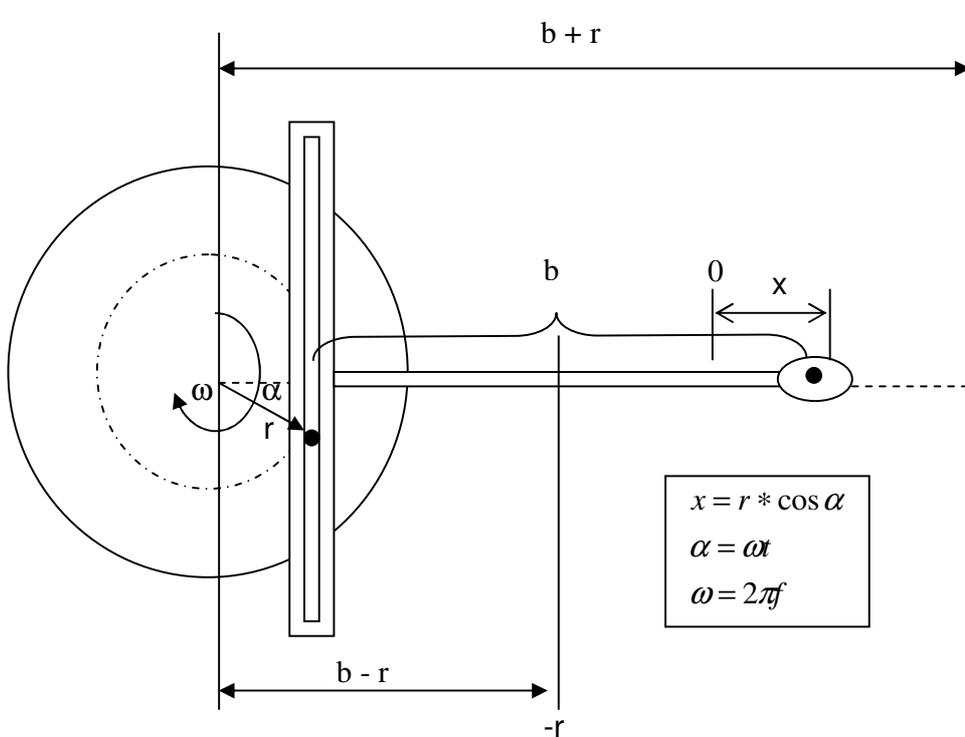


Figura 3.9: Esquema de mecanismo de braço escocês.



Figura 3.10: Inversor de frequência.

3.5 Procedimento Experimental

Caracterização dos fluidos

A fases usadas neste estudo foram água, no lugar do óleo, e ar, no lugar do gás, por motivos econômicos, de segurança e facilidade de manuseio.

Sendo os padrões de fluxo também influenciados pelas propriedades dos fluidos, como densidade da água e do ar, viscosidade da água e tensão superficial da água, é necessária a medição das condições de pressão e temperatura no momento do teste para definição destas propriedades.

A adição de um corante de alimento na fase líquida facilitou a distinção entre as fases envolvidas no escoamento possibilitando uma melhor identificação dos padrões de escoamento.

Calibração de Instrumentos

O transdutor Validyne foi calibrado pelo processo de equilíbrio estático. O procedimento foi simples, no qual variou-se o valor medido em incrementos crescentes e decrescentes, cobrindo a faixa de interesse da grandeza em ambos sentidos, onde no nosso caso foi 0 a 138 kPa. O valor medido foi repetido duas vezes.

A fonte de pressão usada na calibração foi o nitrogênio, e o valor verdadeiro foi lido no manômetro Heise do laboratório, com escala de 0 a 6900 kPa e precisão de 6,9 kPa.

A curva de calibração foi gerada de forma que a pressão indicada e a pressão verdadeira foram estabelecidas dentro de um sistema de montagem em série entre o instrumento a ser calibrado e o calibrador.

Operação do Aparato

A operação do aparato era realizada da seguinte maneira:

1. Funcionamento da bomba d'água para bombeamento da água do tanque para o sistema de injeção e em seguida para o duto vertical.
2. Interrupção do bombeamento de água para medir a diferença de pressão, com o uso do medidor Validyne entre os pontos de entrada e saída no duto. A leitura no caso estático deve ser nula, em concordância com a Equação 3.3 e a figura 3.6.
3. Reinício do fluxo de baixa vazão de líquido.
4. Colocação da fase gasosa em fluxo, inicialmente, em baixa vazão, com aumento sucessivo até sua vazão máxima.
5. Registrar os valores da diferença de pressão para cada vazão da fase gasosa associada à fase líquida.
6. Aumentar a vazão da fase líquida e repetir os itens 4 e 5.

Capítulo 4

Resultados

Apresentaremos aqui os diferentes padrões de escoamento identificados (bolhas, golfadas, agitante e anular) nas diferentes faixas de operação disponíveis no aparato experimental, tanto para a condição estática como para a condição dinâmica da linha de fluxo bem como a comparação entre os dois para avaliar se existe efeito da oscilação no desenvolvimento do padrão de fluxo.

Apresentaremos também os gradientes de pressão e as perdas de carga referentes aos padrões de escoamento obtidos por medição e calculados, segundo modelo Beggs e Brill, com base nas condições de fluxo (vazões dos fluidos, geometria da linha e condições de pressão e temperatura) para a condição estática e para a condição dinâmica da linha e a comparação entre os dois casos para avaliar o efeito da oscilação na perda de carga.

Por fim, apresentaremos o efeito da perda de carga associado a frequência de oscilação para sabermos qual é o perfil da perda de carga com a frequência de oscilação no duto de escoamento.

As dimensões usadas no experimento foram 8,0 m para o comprimento e 25,4 mm (1 in) para o diâmetro interno do duto. Em um aparato com escala real 1/100, estas dimensões seriam de um *riser* de 800,0 m de comprimento e 2540 mm (100 in) de diâmetro. Como podemos ver esta dimensão para o diâmetro do duto seria desproporcional e irreal considerando que em protótipo as dimensões seriam 800,0 m para o comprimento e 152,4 mm (6 in) para o diâmetro do duto. Para atender a escala, o diâmetro do duto deveria ser 1,524 mm. Esta dimensão, por sua vez, não seria conveniente para efeito de trabalho dada sua pequena magnitude. Sendo assim, nosso trabalho pode corresponder a um duto de 48,0 m de comprimento e 152,4 mm (6 in) de diâmetro que em escala 1/6 representa 8,0 m para o comprimento e 25,4 mm (1 in) para o diâmetro do duto. Para um protótipo de 410 mm (16 in) de diâmetro, o comprimento seria de 128,0 m, em escala 1/16.

A questão para o comprimento de protótipo não é muito crítica para a representação do padrão de escoamento, e o gradiente de pressão expressa a queda de pressão por unidade de comprimento, que é uma grandeza local, função das condições numa seção e não do comprimento total.

Desde que se tenha uma razão suficiente alta entre o comprimento L e o diâmetro D , no nosso caso $L/D = 315$, o experimento deve representar satisfatoriamente o fenômeno no trecho de duto correspondente.

4.1 Sistema Estacionário

Com base nas condições de operação do aparato experimental, cuja linha de fluxo mede 8,0 m de comprimento e 25,4 mm de diâmetro interno, foram cobertas as seguintes faixas de operação, para o sistema em condição estática (0 Hz):

Vazão de água: 0 L/h a 800 L/h.

Vazão de gás: 0 L/h a 36.000 L/h

As vazões descritas acima permitem obter todos os padrões de escoamento em estudo. É válido lembrar que a identificação de cada um dos padrões de fluxo consistiu apenas em análise visual do observador de acordo com as vazões de líquido e gás imprimidas no sistema.

A linha de fluxo, após o injetor, tem um comprimento equivalente a aproximadamente 315 diâmetros, o que deve diminuir o impacto dos efeitos de entrada.

4.1.1 Padrões de Fluxo

Identificando o padrão de escoamento para cada combinação de vazão aplicada aos fluidos usados foi possível construir o mapa de fluxo. A Figura 4.1 mostra a comparação do mapa de padrões de fluxo de Taitel e Dukler (1980), em termos das velocidades superficiais da água e

do gás V_{SL} e V_{SG} , com suas coordenadas em escala logarítmica. A comparação com o modelo de Govier e Aziz (1972) é mostrada na Figura 4.2.

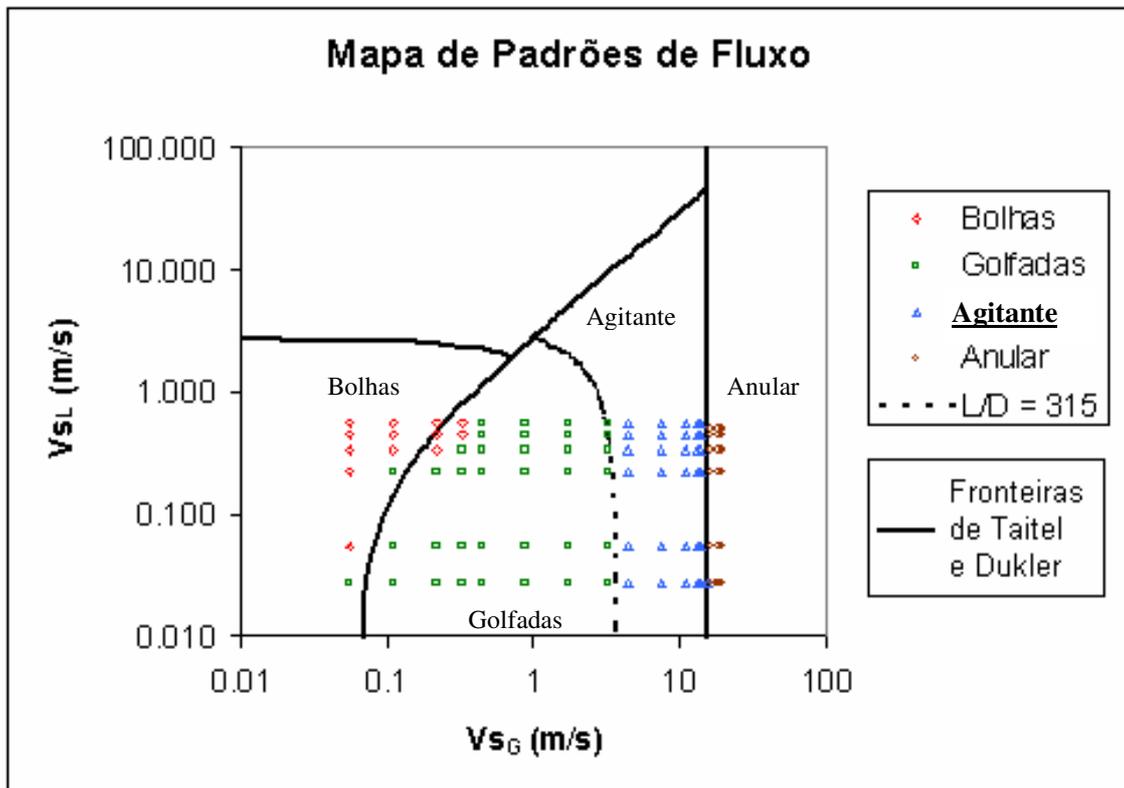


Figura 4.1: Mapa de padrões de fluxo ar – água para um tubo vertical estático de 8,0 de comprimento e 0,0254 m de diâmetro à 25 °C e 0,937 atm.

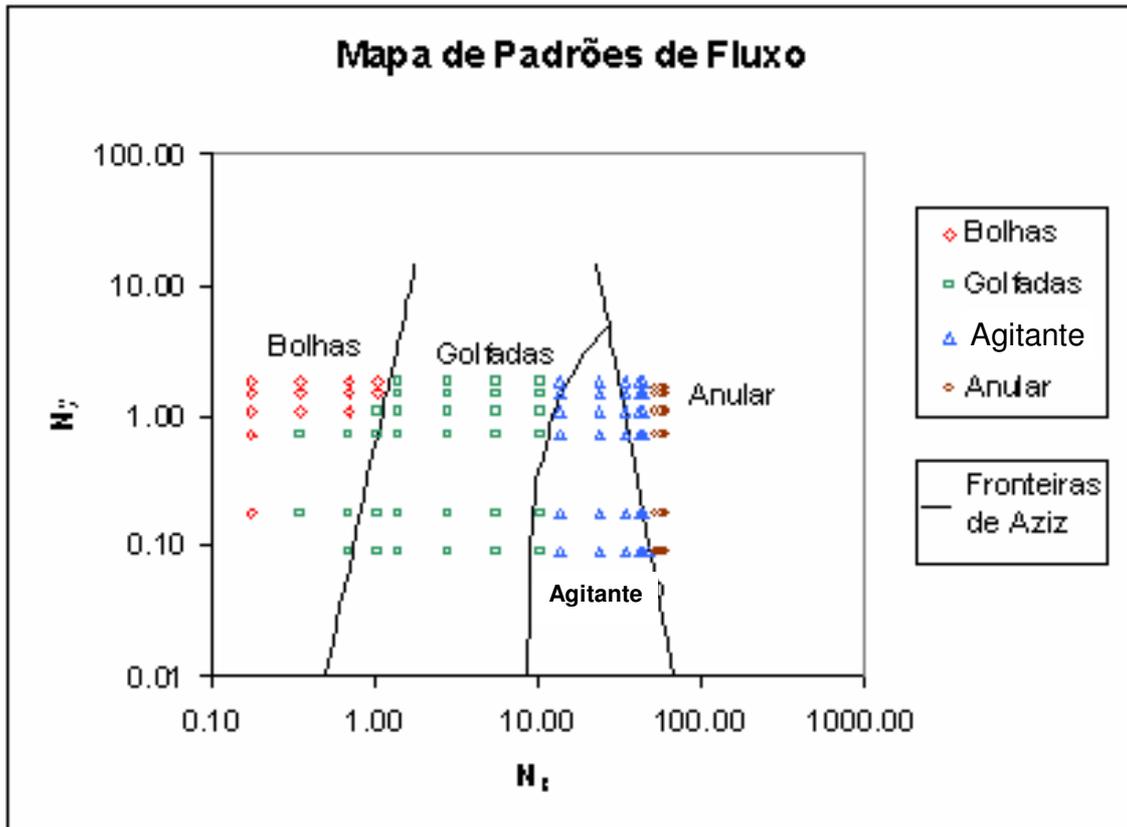


Figura 4.2: Mapa de padrões de fluxo empregando coordenadas sugeridas por Aziz.

Na Figura 4.2, as adimensionais N_y e N_x são definidas por:

$$N_y = V_{SL} * (\rho_L \sigma_{wA} / \rho_w \sigma)^{1/4} \quad (4.1)$$

$$N_x = V_{SG} * (\rho_G / \rho_A)^{1/3} * (\rho_L \sigma_{wA} / \rho_w \sigma)^{1/4} \quad (4.2)$$

onde:

ρ_L = densidade do líquido sob condições de escoamento

ρ_G = densidade do gás sob condições de escoamento

σ = tensão interfacial do sistema gás-líquido sob condições de escoamento

σ_{wA} = tensão interfacial da água sob condições atmosféricas padrão

ρ_A = densidade do ar sob condições atmosféricas padrão

Os dois mapas possuem algumas discrepâncias em virtude da localização das fronteiras onde ocorrem as mudanças de padrão de escoamento, conforme visto na Figura 2.4, porém mostram concordância razoável. Os padrões observados no aparato podem ser bem representados pelo mapa de Taitel e Dukler.

4.1.2 Gradiente de Pressão

Os valores medidos da queda de pressão são apresentados em função da velocidade superficial do gás V_{SG} e do líquido V_{SL} , para consistência com o mapa de Taittel e Dukler. Na Figura 4.3 apresenta-se os resultados em função de V_{SG} , mantendo-se V_{SL} fixa, e na Figura 4.4 apresenta-se os resultados em função de V_{SL} , mantendo-se V_{SG} fixa. Os resultados foram obtidos para condições de pressão de 94 kPa e temperatura de 25 °C e se encontram tabelados no anexo I.

No sistema monofásico, a elevação necessita de energia para vencer a hidrostática do fluido. No caso em questão (bifásico) pode-se observar claramente nos gráficos das Figuras 4.3a e 4.3b (este gráfico repete a Figura 4.3a na faixa que vai de 0 a 5 m/s para a velocidade superficial do gás) que a presença do gás, à baixa vazão, reduz o diferencial de pressão em virtude da diminuição do peso da coluna de fluido, mas para alta vazão de gás, o diferencial de pressão tende a aumentar devido o aumento da velocidade da mistura, o qual aumenta a perda de carga por atrito viscoso. O aumento da vazão de líquido sempre provoca um aumento na queda de pressão.

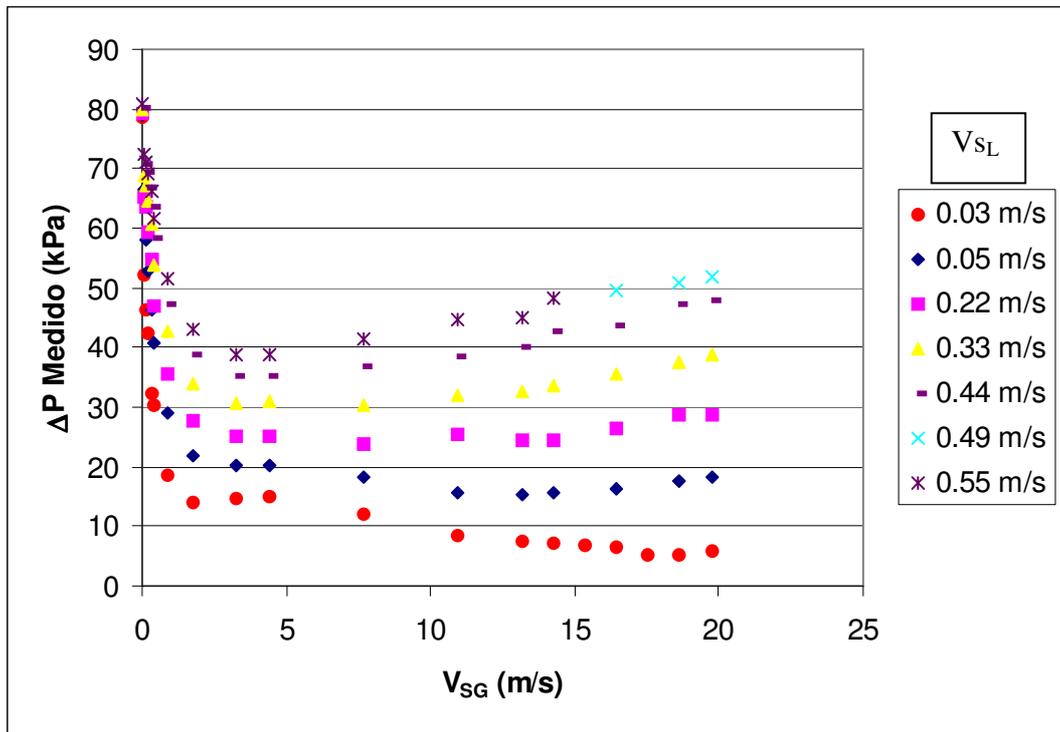


Figura 4.3a: Queda de pressão medida em função da velocidade superficial do gás.

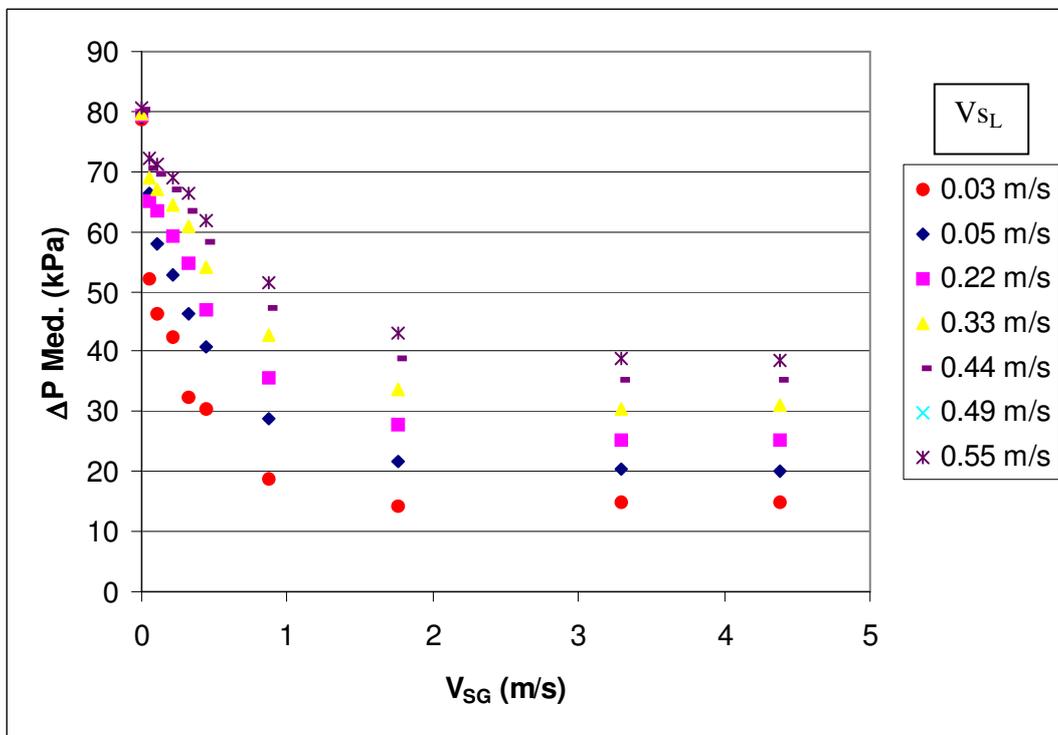


Figura 4.3b: Faixa de 0 a 5 m/s da Figura 4.3a.

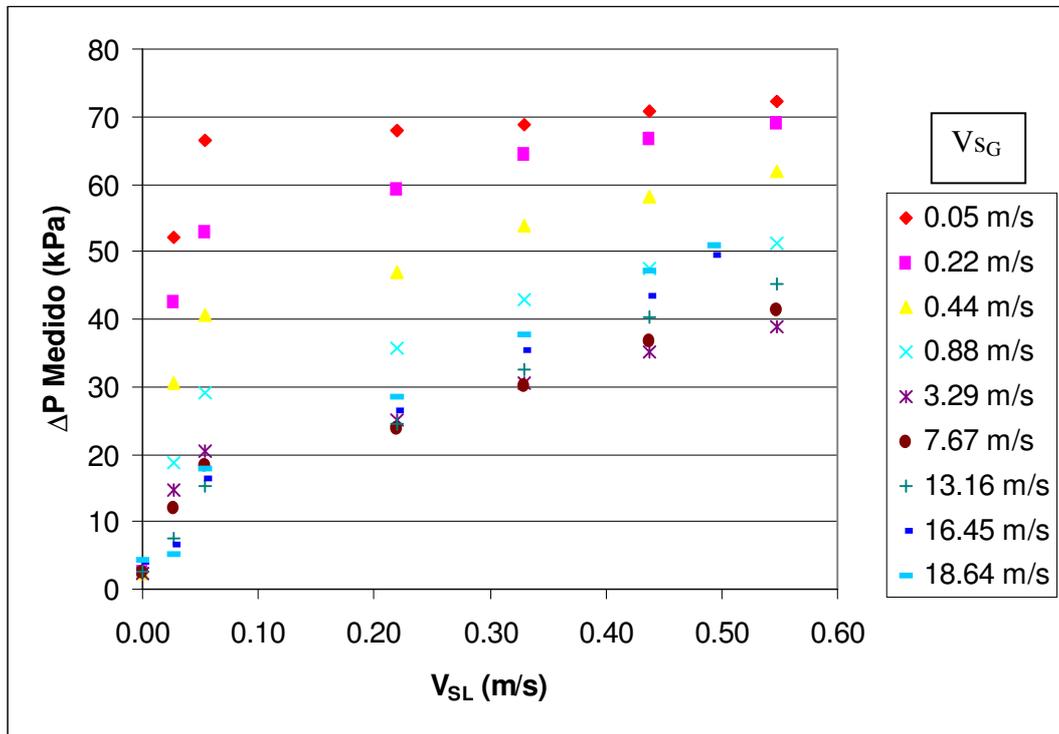


Figura 4.4: Queda de pressão medida em função da velocidade superficial do líquido.

O cálculo para a obtenção da perda de carga foi efetuado pelo método de Beggs e Brill (Apêndice A). Os cálculos foram realizados por um programa de computador escrito em linguagem Fortran. Os dados de entrada foram:

- Velocidade superficial de água, (m/s)
- Velocidade superficial de gás, (m/s)
- Densidade da água, (kg/m^3)
- Densidade do gás, (kg/m^3)
- Viscosidade da água, (mPa.s)
- Viscosidade do gás, (mPa.s)
- Diâmetro interno do duto de escoamento, (m)
- Ângulo do escoamento em relação a horizontal (grau)
- Pressão de entrada da fase líquida (kPa)

Os valores de velocidade da água e do gás, diâmetro interno do duto, ângulo de escoamento e pressão de entrada da fase líquida foram obtidos por medição, e os valores de densidade e viscosidade foram obtidos de tabelas em função das condições de pressão e temperatura medidas. De posse desses valores o programa foi usado gerar os resultados mostrados nas Figuras 4.5 e 4.6, cujos valores estão disponíveis no anexo I.

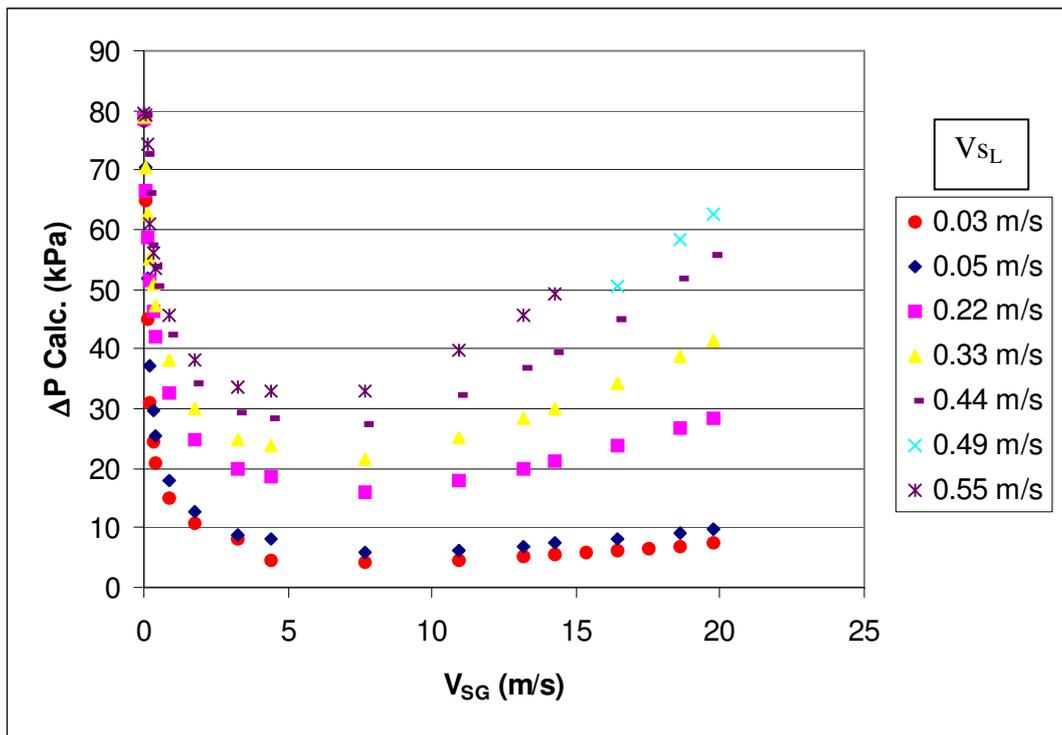


Figura 4.5: Queda de pressão calculada em função da velocidade superficial do gás.

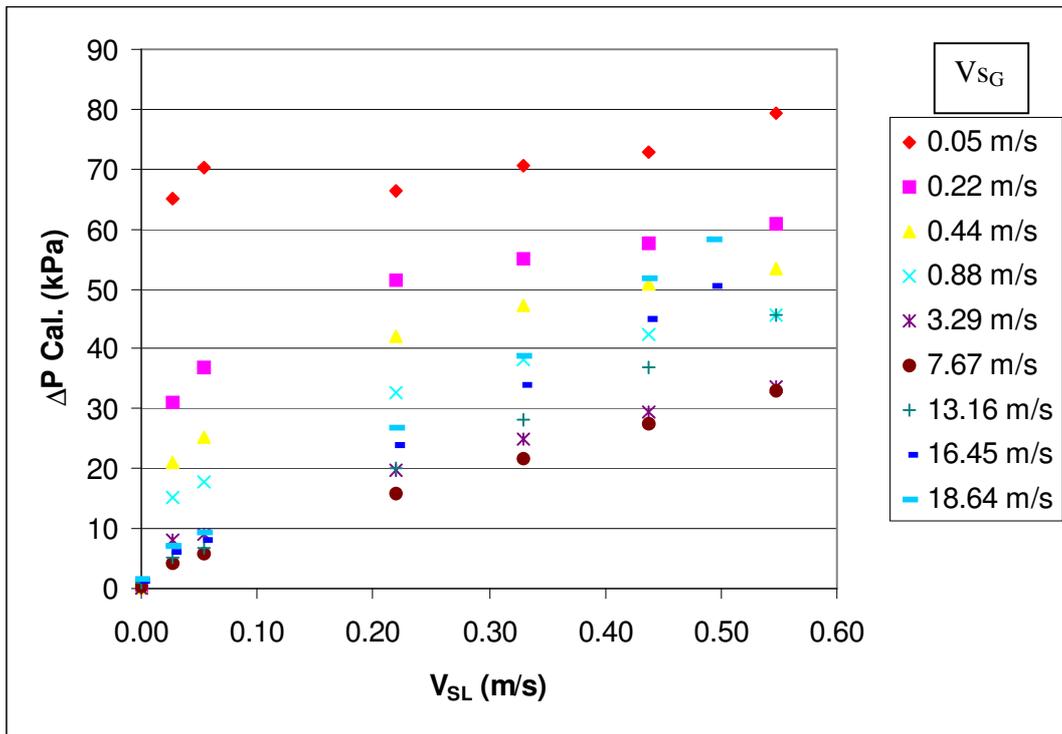


Figura 4.6: Queda de pressão calculada em função da velocidade superficial do líquido.

Quantitativamente, o modelo de Beggs e Brill oferece uma representação razoável e realista do comportamento da mistura bifásica em função da proporção de vazões de gás e líquido. A Figura 4.7 apresenta uma comparação quantitativa entre diferencial de pressão calculado pela correlação Beggs e Brill e o diferencial de pressão medido.

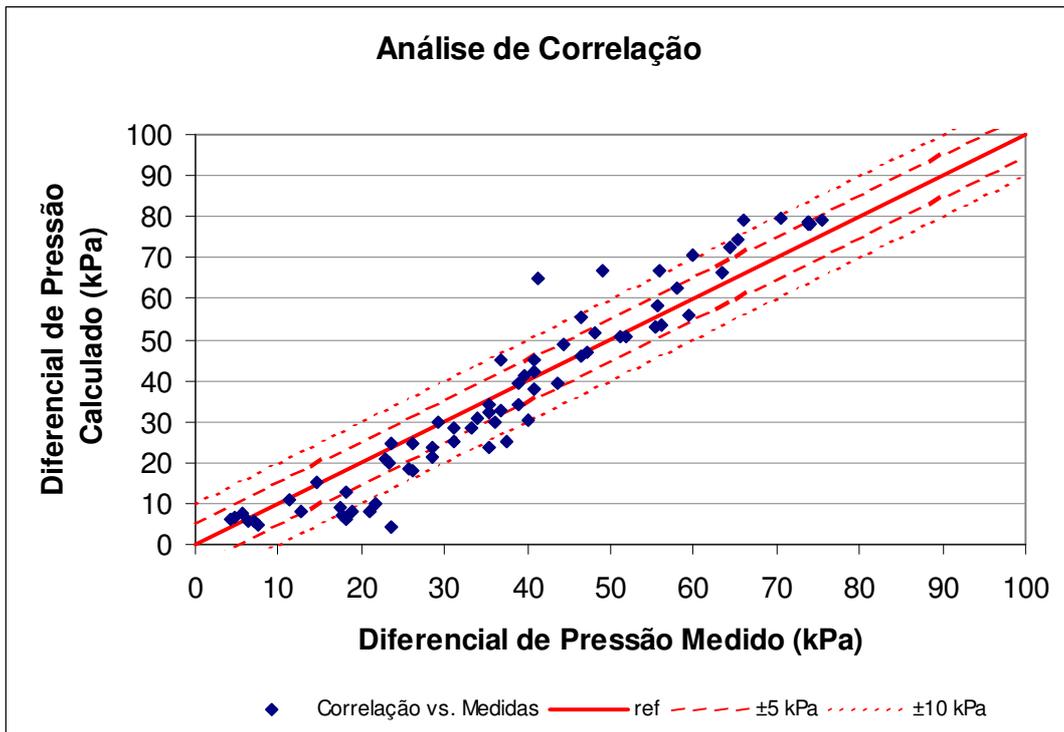


Figura 4.7: Gráfico da análise de correlação.

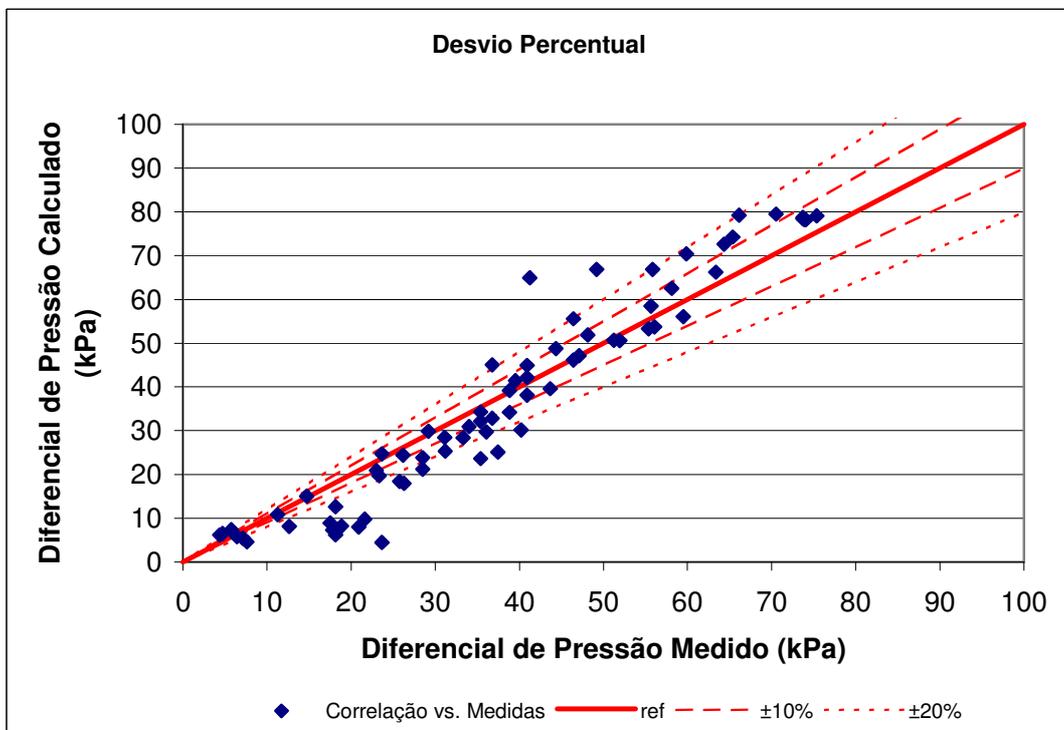


Figura 4.8: Gráfico do desvio percentual.

No gráfico da análise de correlação (Figura 4.7) podemos observar que a maioria dos pontos está inserido na região onde o desvio do valor medido em relação ao valor calculado é de ± 10 kPa. Numa escala de 0 a 100 kPa esse valor corresponde a 10% do fundo de escala.

No desvio percentual (Figura 4.8), observamos que a maioria dos pontos estão inseridos na região onde o desvio é de 20% entre o valor medido e o valor calculado. O cálculo do gradiente de pressão pelo método Beggs e Brill apresenta uma considerável discrepância em comparação ao valor medido para baixas vazões de líquido quando o mesmo cai no padrão agitante.

Os valores medidos apresentaram erro sistemático e sua eliminação foi possível da seguinte maneira:

sendo a equação da reta dada por

$$y = ax + b \quad (4.3)$$

o somatório de todos os pontos é dado por

$$\sum y = a \sum x + nb \quad (4.4)$$

dividindo as parcelas da equação acima por n , que representa o número de pontos, temos

$$\bar{y} = a\bar{x} + b \quad (4.5)$$

para que a reta que passa pelo centro do eixo de coordenadas xy tenha inclinação de 45 graus, o valor de a , que representa a tangente deste ângulo deve ser 1. Então temos

$$\bar{y} = \bar{x} + b \quad (4.6)$$

Com a equação acima obtemos o valor de b , que representa o valor do erro sistemático que no nosso caso foi de 4,9 kPa para um total de 86 medidas.

4.2 Sistema Oscilante

Para realizarmos o estudo da perda de carga no duto em movimento, o duto foi colocado em condição dinâmica no primeiro e no segundo modo de oscilação, que corresponde respectivamente às frequências de oscilação de 0,5 e 1,0 Hz, aproximadamente, para se avaliar o efeito da perda de carga em frequências diferentes. As vazões da fase líquida e da fase gás foram as mesmas usadas para o duto estático para que pudéssemos obter um comparativo do padrão de fluxo e da perda de carga entre os dois casos. A geometria do duto permaneceu inalterada quanto ao seu comprimento e diâmetro.

4.2.1 Padrões de Fluxo

O mapa de padrão de fluxo para o caso dinâmico, no segundo modo de oscilação, construído com base no modelo de Taitel e Dukler em termos das velocidades superficiais da água e do ar (V_{SL} e V_{SG} , respectivamente), com suas coordenadas em escala logarítmica apresentou o seguinte comportamento (conforme pode ser visto na Figura 4.9).

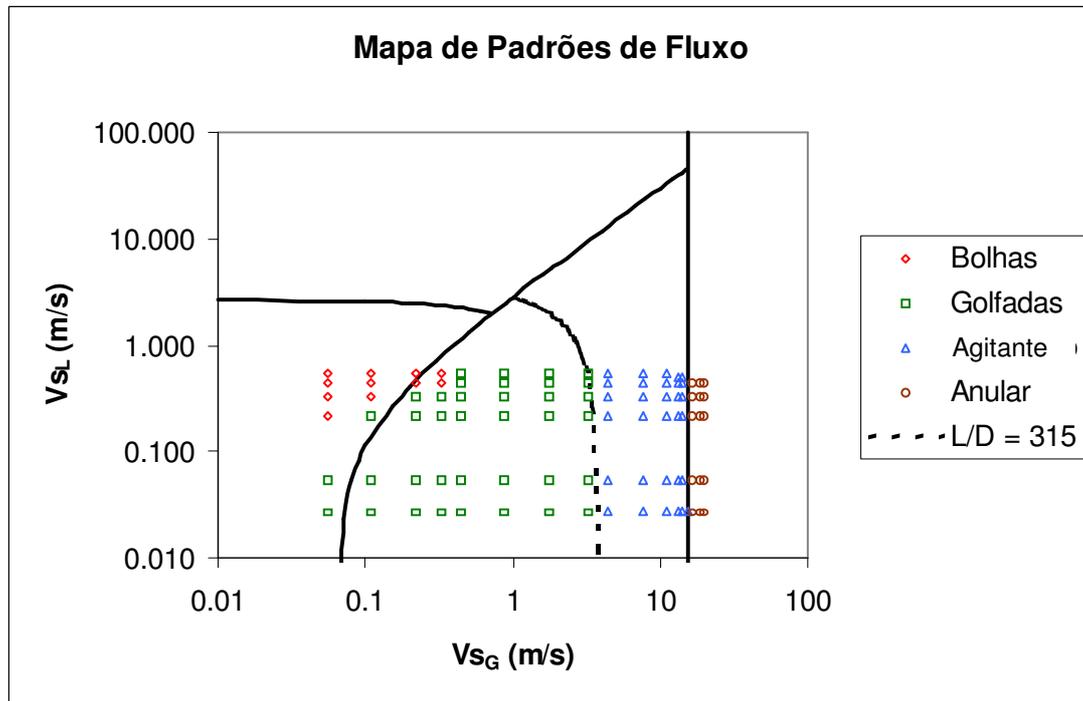


Figura 4.9: Mapa de padrões de fluxo ar – água para um duto vertical em movimento, no segundo modo de oscilação, de 8,0 m de comprimento e 25,4 mm de diâmetro à 30 °C e 0,938 atm.

A figura acima não apresenta mudanças significativas quanto às fronteiras de transição, quando comparado com a Figura 4.1, para os casos em estudo (estático e dinâmico), o que leva a crer que mesmo a oscilação mais intensa usada neste estudo, que no caso corresponde ao segundo modo de oscilação (1 Hz), não foi capaz de gerar grandes mudanças nas fronteiras de transição.

4.2.2 Gradiente de pressão

Com o objetivo de ver a influência do movimento da linha de fluxo sobre o gradiente de pressão, foi traçado o gráfico para a perda de carga em função da velocidade do gás (Figura 4.10 e Figura 4.10b, sendo este gráfico uma escala menor que a Figura 4.10a na faixa que vai de 0 a 5 m/s para a velocidade superficial do gás) no qual se verificou o escoamento para o duto em movimento com frequência no segundo modo de oscilação. Este gráfico é comparado com o caso estático para avaliar o efeito do movimento da linha de fluxo na perda de carga.

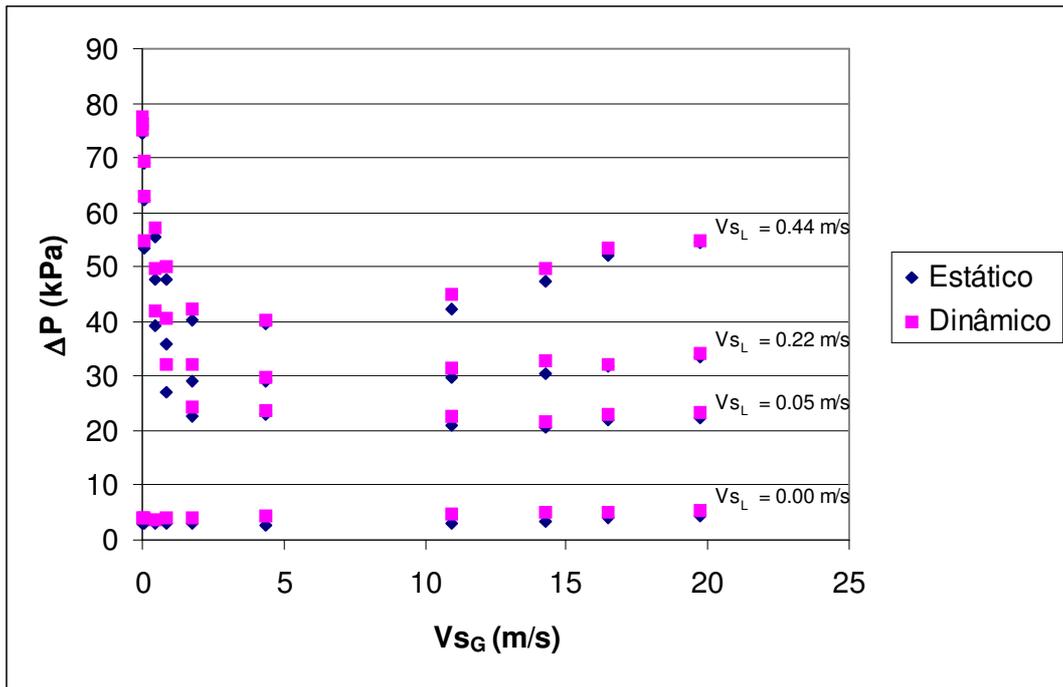


Figura 4.10a: Queda de pressão medida em função da velocidade superficial do gás para duto no segundo modo de oscilação.

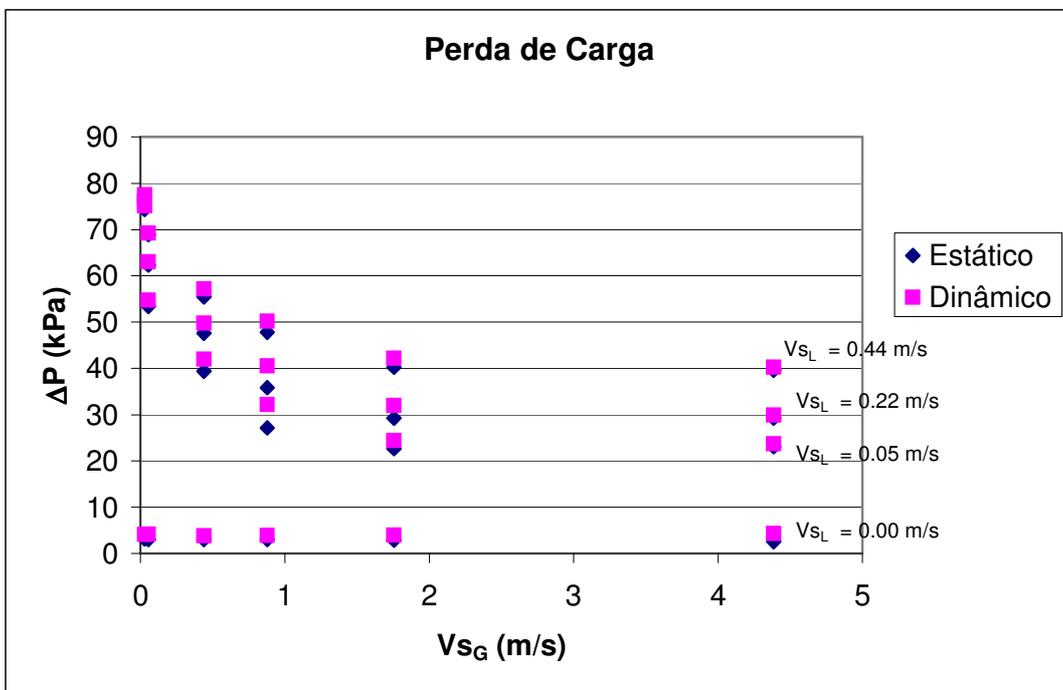


Figura 4.10b: Faixa de 0 a 5 m/s da Figura 4.10a..

Na figura 4.10, para a queda de pressão medida em função da velocidade superficial do gás, pode ser visto um aumento na perda de carga para o caso do duto em movimento em relação ao duto estático. Isto sugere que o movimento do duto tem efeito na perda de carga em dutos verticais ascendentes de maneira a desfavorecer o escoamento. A queda de pressão por elevação não deve oferecer contribuição para a diferença observada, pois as vazões de entrada da fase líquida e da fase gás não sofrem variação, permanecendo inalterada a densidade da mistura. Portanto, dissipação de energia devido a viscosidade pode ser o efeito dominante responsável pelo comportamento do duto oscilante.

Para o caso de escoamento em dutos no primeiro modo de oscilação, conforme pode ser visto na figura 4.11, a queda de pressão medida em função da velocidade superficial do gás apresentou um aumento menor, indica que a queda de pressão é uma função direta da frequência de oscilação do duto.

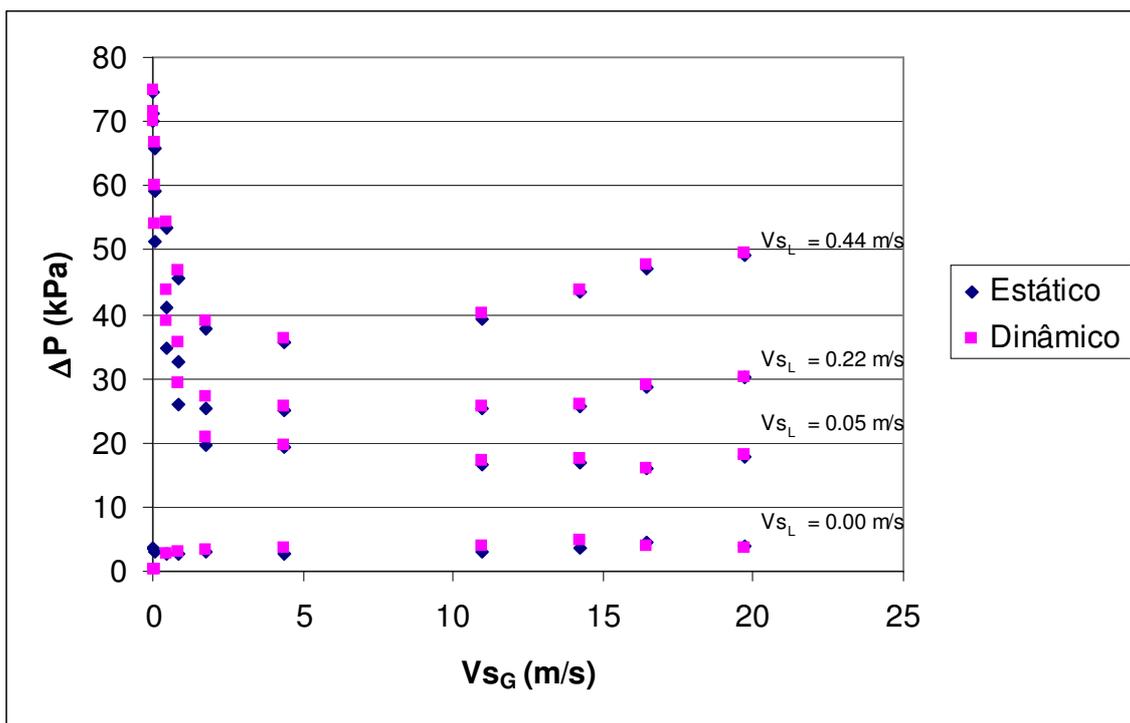


Figura 4.11: Queda de pressão medida em função da velocidade superficial do gás para duto no primeiro modo de oscilação.

Com base neste critério, analisaremos agora como se comporta a queda de pressão em função da frequência de oscilação do duto. As análises foram divididas em grupos de acordo com seguintes padrões de fluxo: bolhas, golfadas, agitante e anular.

Para cada padrão, a vazão de líquido foi de 0.22 m/s variando-se apenas a vazão de gás para se obter os respectivos padrões observados. Estas vazões, por sua vez, se mantiveram fixas para o padrão analisado para que fosse observada apenas a variação de pressão com a frequência de oscilação. As vazões para a fase gasosa, de acordo com o respectivo padrão de escoamento, estão listadas a seguir (podendo ser identificadas nas figuras 4.10a e 4.10b):

Bolhas: $V_{s_G} = 0.05$ m/s

Golfadas: $V_{s_G} = 0.44$ m/s

Agitante: $V_{s_G} = 10.96$ m/s

Anular: $V_{s_G} = 19.74$ m/s

As frequências de oscilação do duto foram de 0 Hz, 0,5 Hz, 1,0 Hz e 1,5 Hz. As medições foram realizadas três vezes para cada padrão de escoamento e seu resultado encontra-se na Figura 4.12.

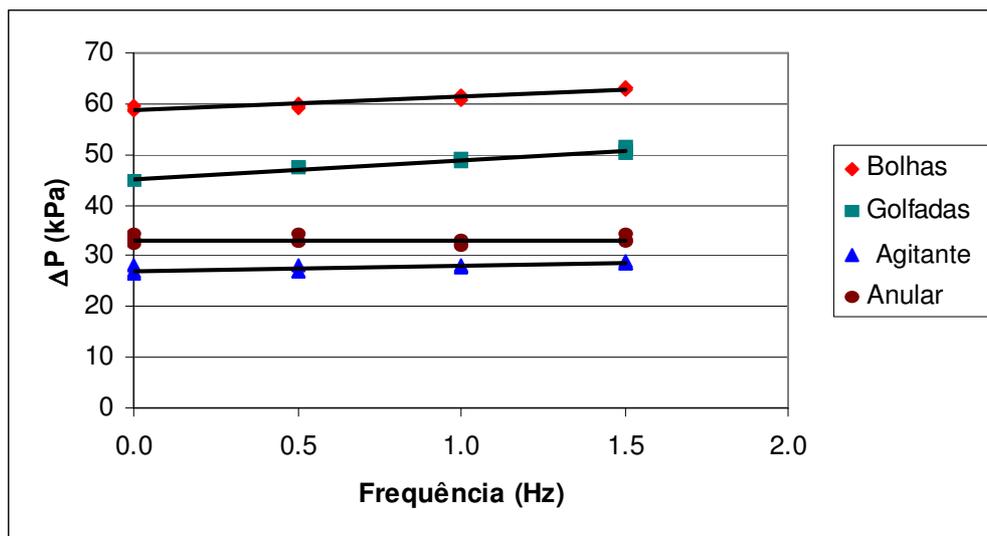


Figura 4.12: Diferença de pressão medida em função da frequência de oscilação do duto.

Para o escoamento em bolhas, observamos que a inclinação da curva da diferença de pressão tende a ser ascendente uma vez que a diferença de pressão tende a aumentar com a frequência de oscilação. Este padrão de escoamento apresenta a maior queda de pressão, devido a predominância da fase líquida que tem grande influência na queda de pressão por elevação.

No escoamento golfadas, o aumento da diferença de pressão com a frequência de oscilação tem mais ou menos a mesma tendência que o escoamento bolhas. Há de se destacar que embora a diferença de pressão ainda seja, em sua maior parte, devida predominância da fase líquida, a maior concentração da fase gasosa, em relação ao padrão bolhas, tende a diminuir a densidade da mistura contribuindo, então, com a diminuição da perda de carga por elevação.

No escoamento agitante, o aumento na diferença de pressão com a frequência de oscilação foi menor que o escoamento em golfadas e em bolhas e maior que o anular. O padrão agitante apresentou a mais baixa diferença de pressão devido a alta concentração da fase gasosa, que neste caso passa a ser predominante sobre a fase líquida, diminuindo ainda mais a densidade da mistura e a queda de pressão por elevação. Por outro lado, a velocidade da fase gasosa ainda não é tão grande para que possa gerar uma considerável perda de carga por atrito viscoso, como no caso anular.

No escoamento anular, o aumento na diferença de pressão não foi observado com a frequência de oscilação do duto, embora a diferença de pressão tenha sido maior que para o caso do escoamento agitante devido a elevada velocidade da fase gasosa contribuindo com a perda de carga por atrito viscoso. A estabilidade do padrão anular com o duto em movimento foi um pouco surpreendente, pois havia uma expectativa de que o filme de líquido poderia não se sustentar durante o deslocamento transversal alternado da tubulação.

Aparentemente, a dissipação viscosa da fase líquida é mais afetada pela oscilação do que a fase gasosa, visto que os padrões que sofreram maior influência da frequência foram aqueles com maior fração de líquido (bolhas e golfadas), enquanto que o padrão com maior fração de gás (anular) praticamente não foi alterado.

Para fazermos uma avaliação da diferença de pressão com relação ao atrito viscoso podemos subtrair a queda de pressão devido a ação da gravidade da diferença de pressão total conforme mostrado abaixo.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{gravitacional} + \Delta P_{viscoso} \quad (4.7)$$

Assim, temos que

$$\Delta P_{viscoso} = \Delta P_{total} - \Delta P_{gravitacional} \quad (4.8)$$

A Figura 4.13 mostra a diferença de pressão no duto oscilante em função do atrito viscoso.

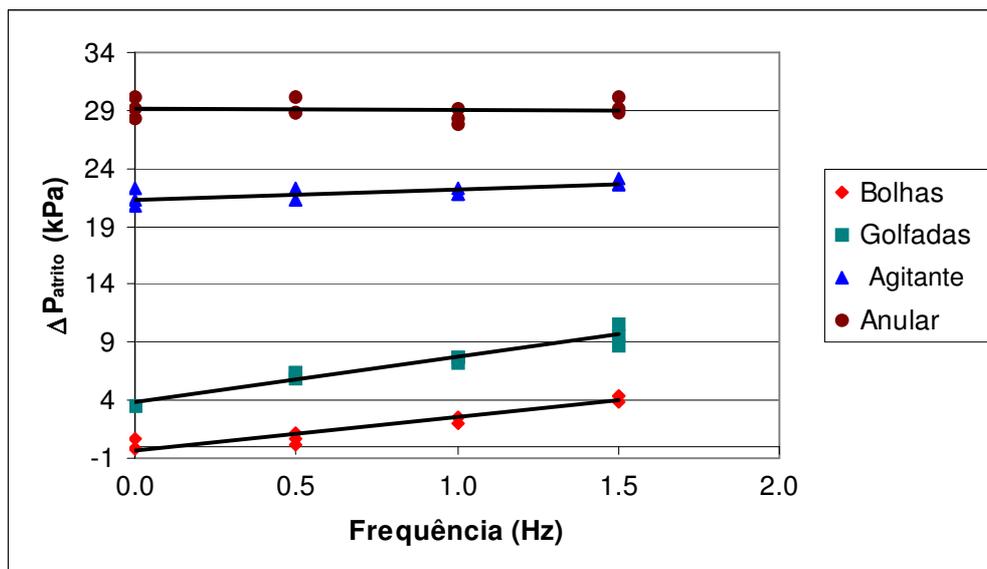


Figura 4.13: Diferença de pressão medida devido ao atrito viscoso em função da frequência de oscilação do duto.

Primeiramente, deve-se ressaltar que, no caso de duto estático (0 Hz), o escoamento anular e agitante correspondem a altas velocidades de fase gasosa, enquanto que os escoamento

de bolhas e de golfadas são de baixa velocidade; portanto, os primeiros apresentam maior dissipação viscosa, conforme observado no gráfico da Figura 4.13.

Em segundo lugar, é interessante atentar para o fato de que o termo gravitacional é maior nos casos de bolhas e de golfadas comparado aos casos agitante e anular, devido ao maior conteúdo de líquido dos primeiros.

Para os casos de bolhas e de golfadas podemos observar que a diferença de pressão devido ao atrito viscoso é pequena mas, sofre um considerável aumento a medida que se aumenta a frequência de oscilação no duto. Nos casos agitante e anular observamos que a diferença de pressão devido ao atrito viscoso é maior, porém sua variação é pequena quando comparada com os casos de bolhas e de golfadas. No escoamento anular, a variação da diferença de pressão devido ao atrito viscoso é imperceptível. Este resultado parece indicar que a dissipação viscosa na fase líquida é predominantemente afetada pela oscilação.

Capítulo 5

Conclusões

Utilizando um aparato experimental, estudamos o comportamento dos padrões de escoamento e a perda de carga de uma mistura bifásica, água-ar, em um duto vertical ascendente, de 8,0 m de comprimento e 25,4 mm de diâmetro interno, executando o experimento com duto em condições estática e dinâmica, oscilando em dois modos sob diversas combinações de vazão de líquido e gás para obtenção dos diversos padrões de fluxo: bolhas, golfadas, agitante e anular.

5.1 Mapas de Padrão de Fluxo

De acordo com os testes realizados no aparato experimental, concluímos que, comparando o caso estático com o caso dinâmico, os padrões de escoamento permaneceram praticamente inalterados, mesmo para o caso de maior frequência de oscilação realizado neste estudo que foi de 1 Hz. Dentro dessa avaliação, não será proposto um novo mapa de padrão de fluxo para escoamento bifásico em duto vertical ascendente em movimento para a frequência de oscilação de 1,0 Hz.

5.2 Gradiente de Pressão

Quanto à comparação da perda de carga no duto em condição estática com o duto em condição dinâmica, para os padrões de escoamento estudados (bolhas, golfadas, agitante e anular), observamos os seguintes efeitos da oscilação:

- Escoamento bolhas e golfadas: a perda de carga aumenta com a frequência de oscilação do duto do escoamento de forma linear, na faixa observada.
- Escoamento agitante: a perda de carga aumenta, linearmente, com a frequência de oscilação do duto de escoamento, mas tem influência menos intensa que para os casos bolhas e golfadas.

- **Escoamento Anular:** a perda de carga não mostrou nenhuma alteração com a frequência de oscilação do duto, permanecendo estável.

Assim, concluímos que a oscilação produz efeito no gradiente de pressão aumentando a perda de carga. Porém, essa perda de carga terá sua maior ou menor intensidade a depender do padrão de escoamento que estiver ocorrendo no interior do duto. Os padrões de bolhas e de golfadas sofrerão maior perda de carga associada à frequência de oscilação. O padrão agitante sofrerá menor perda de carga e o padrão anular será indiferente ao efeito da oscilação.

A utilização da correlação de Beggs e Brill foi satisfatória no que pode ser observado no erro medido que foi de 20% em relação a correlação, nos piores casos.

5.3 Comentários e Sugestões

Os resultados obtidos neste trabalho sugerem que sejam feitos novos testes com um sistema que permita uma maior frequência de oscilação para avaliar qual será o comportamento dos padrões de fluxo e da perda de carga em condições mais severas.

Outros testes também podem ser feitos com outros tipos de líquidos e que sejam mais viscosos, como óleo, para simular fluidos de reservatórios petrolíferos.

A realização de testes com outros diâmetros de duto também seria importante porque o diâmetro é um fator que influencia a obtenção dos padrões de escoamento.

Testes com ângulos de inclinação diferentes podem ser realizados (90° em relação à horizontal) ou mesmo com o duto em forma de catenária para simular as condições do sistema de linhas submarinas.

Estudar como a quantidade de movimento influencia no movimento do duto.

Estudar o efeito da vibração provocada pela intermitência dos escoamentos na fadiga do duto e a conseqüente influência na vida útil do equipamento.

A utilização prática deste estudo seria o projeto das instalações e operações offshore, uma vez que as variações no padrão e na perda de carga impõem cuidados e impactos nas operações, e nos equipamentos de coleta e processamento. O impacto em termos econômicos, ambiental, tecnológico e científico pode ser melhor abordado abaixo:

Impacto econômico: redução de incertezas na realização de projetos de instalação de produção offshore de alto custo, reduzindo assim o risco nas operações que se traduzem em perdas monetárias.

Impacto ambiental: reduzir riscos na geração de problemas que poderiam causar exposição do meio ambiente ao contato com o óleo.

Impacto tecnológico: adequação dos equipamentos de produção offshore.

Impacto científico: estabelecer a identificação fenomenológica, caracterizar a dinâmica de fluidos e prover dados para modelagem físico-numérica.

Referências Bibliográficas

Baxendell, P. B. and Tomas, R.: "The Calculation of Pressure Gradients in High-Rate Flowing Wells," J. Pet. Tech. (Oct., 1961) 1023-1028.

Beggs, H.D., Brill, J.P.: "Study of Two-phase Flow in Inclined Pipes", Journal Petroleum Tech., May 1973, pp. 607-617.

Chakrabarti, S. K, Hydrodynamics of Offshore Structures, Computacional Mechanics Publications Southampton Boston, 1987.

Chierici, G. L., Ciucci, G. M. and Sclocchi, G.: "Two-Phase Flow in Oil Wells, Prediction of Pressure Drop" Annual European Meeting, April 2-3, 1973.

Chu, Y. C Studies of Convective Heat Transfer Coefficient Enhancement in Two Phase, Non Boiling Flow, Phd thesis, University of Illions, 1980.

Duns, H., Jr. And. Ros, N. C. J.: "Vertical Flow of Gas and Liquid Mixtures in Wells," Proc., 6th World Pet. Congress (9163), 451.

Fancher, G. H., Jr. and Brown, K. E.: "Prediction of Pressure Gradients for Multiphase Flow in Tubing," Soc. Pet. Eng. J. (March, 1963) 59-69.

Franco, Luciano Donizetti. "Implementação Computacional em Ambiente Paralelo de Memória Distribuida para Analise Acoplada de Sistemas Offshore". Rio de Janeiro, RJ, 2004. 133p.

Disertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

Govier, G. W. and Aziz, K.: The Flow of Complex Mixtures in Pipes, Van Nostrand Reinhold Co., New York (1972). 792-p.

Griffith, P., Wallis, G.B.: “Two-phase Slug Flow”, Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, Aug. 1961, pp. 307-320.

Hagerdorn, A.R., Brown, K.E.: “Experimental Study of Pressure Gradient Occurring in Two-phase Flow in Small Diameter Vertical Conduits”, Journal of Petroleum Tech., April 1965, pp. 475-484.

Offshore Technology. The website for the offshore oil and gas industry. Disponível em <http://www.offshore-technology.com/projects/brutus/brutus4.html>. Acesso em 16 Dez.2005.

Offshore Technology. The website for the offshore oil and gas industry. Disponível em <http://www.offshore-technology.com/projects/balder/balder2.html>. Acesso em 16 Dez.2005.

Orkiszewski, J.: “Predicting Two-phase Pressure Drop in Vertical Pipes”, Journal of Petroleum Tech., June 1967, pp. 829-838.

Oshinowo, T and Charles, M.E.: “Vertical Two-Phase Flow Part I. Flow Pattern Correlations”. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 52, n. 1, pt.1, p. 25-35 February, 1974.

Poettman, F. H. and Carpenter, P. G.: “The Multiphase Flow of gas, Oil and Water Through Vertical Flow Strings with Application to the Design of Gas-Lift Installations,” Drill. And Prod. Prac., API (1952) 257-317.

Rodrigues, Glauco José de Oliveira. “Ferramentas Computacionais para Otimização e Síntese de Sistemas Híbridos de Risers Baseados no Conceito de Bóia de Superfície”. Rio de Janeiro, RJ,

2004.138p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

Ros, N. C. J.: “Simultaneous Flow of Gas and Liquid as Encountered in Well Tubing”, Jour. Petrol. Technol. (Oct., 1961) 1037.

Taitel, Y., Barnea, D. and Dukler, A. E.: “Modeling Flow Pattern Transitions from Steady Upward Gas-liquid Flow in Vertical Tubes”, AIChE Journal, 1980, vol. 26, pp. 345-354.

Wallis, G.B.: One Dimensional Two-Phase Flow, McGraw Hill, 1969.

Anexo I

Tabela An.I.1 –Tabela dos dados medidos referente à Figura 4.1

Nº	Bolhas		Golfadas		Transição		Anular	
	V _{SL} (m/s)	V _{SG} (m/s)						
1	0.55	0.05	0.05	0.22	0.55	4.39	0.05	16.45
2	0.44	0.05	0.22	0.22	0.44	4.39	0.22	16.45
3	0.33	0.05	0.33	0.33	0.33	4.39	0.33	16.45
4	0.22	0.05	0.22	0.33	0.22	4.39	0.44	16.45
5	0.05	0.05	0.05	0.33	0.05	4.39	0.49	16.45
6	0.33	0.22	0.05	0.44	0.05	7.67	0.49	18.64
7	0.44	0.22	0.22	0.44	0.22	7.67	0.44	18.64
8	0.55	0.22	0.33	0.44	0.33	7.67	0.33	18.64
9	0.55	0.33	0.44	0.44	0.44	7.67	0.22	18.64
10	0.44	0.33	0.55	0.44	0.55	7.67	0.05	18.64
11	0.55	0.11	0.22	0.11	0.55	10.96	0.05	19.74
12	0.44	0.11	0.05	0.11	0.44	10.96	0.22	19.74
13	0.33	0.11	0.05	0.88	0.33	10.96	0.33	19.74
14			0.22	0.88	0.22	10.96	0.44	19.74
15			0.33	0.88	0.05	10.96	0.49	19.74
16			0.44	0.88	0.05	13.16	0.03	19.74
17			0.55	0.88	0.22	13.16	0.03	18.64
18			0.55	1.75	0.33	13.16	0.03	17.54
19			0.44	1.75	0.44	13.16	0.03	16.45
20			0.33	1.75	0.55	13.16		
21			0.22	1.75	0.55	14.25		
22			0.05	1.75	0.44	14.25		
23			0.05	3.29	0.33	14.25		
24			0.22	3.29	0.22	14.25		
25			0.33	3.29	0.05	14.25		
26			0.44	3.29	0.03	15.35		
27			0.55	3.29	0.03	14.25		
28			0.03	3.29	0.03	13.16		
29			0.03	1.75	0.03	10.96		
30			0.03	0.88	0.03	7.67		
31			0.03	0.44	0.03	4.39		
32			0.03	0.33				
33			0.03	0.22				
34			0.03	0.11				
35			0.03	0.05				

Tabela An.I.2 - Tabela dos dados medidos referente à Figura 4.2

Nº	Bolhas		Golfadas		Transição		Anular	
	Ny	Nx	Ny	Nx	Ny	Nx	Ny	Nx
1	1.80	0.17	0.18	0.69	1.80	13.90	0.18	52.12
2	1.44	0.17	0.72	0.69	1.44	13.90	0.72	52.12
3	1.08	0.17	1.08	1.04	1.08	13.90	1.08	52.12
4	0.72	0.17	0.72	1.04	0.72	13.90	1.44	52.12
5	0.18	0.17	0.18	1.04	0.18	13.90	1.62	52.12
6	1.08	0.69	0.18	1.39	0.18	24.32	1.62	59.07
7	1.44	0.69	0.72	1.39	0.72	24.32	1.44	59.07
8	1.80	0.69	1.08	1.39	1.08	24.32	1.08	59.07
9	1.80	1.04	1.44	1.39	1.44	24.32	0.72	59.07
10	1.44	1.04	1.80	1.39	1.80	24.32	0.18	59.07
11	1.80	0.35	0.72	0.35	1.80	34.75	0.18	62.55
12	1.44	0.35	0.18	0.35	1.44	34.75	0.72	62.55
13	1.08	0.35	0.18	2.78	1.08	34.75	1.08	62.55
14			0.72	2.78	0.72	34.75	1.44	62.55
15			1.08	2.78	0.18	34.75	1.62	62.55
16			1.44	2.78	0.18	41.70	0.09	62.55
17			1.80	2.78	0.72	41.70	0.09	59.07
18			1.80	5.56	1.08	41.70	0.09	55.60
19			1.44	5.56	1.44	41.70	0.09	52.12
20			1.08	5.56	1.80	41.70		
21			0.72	5.56	1.80	45.17		
22			0.18	5.56	1.44	45.17		
23			0.18	10.42	1.08	45.17		
24			0.72	10.42	0.72	45.17		
25			1.08	10.42	0.18	45.17		
26			1.44	10.42	0.09	48.65		
27			1.80	10.42	0.09	45.17		
28			0.09	10.42	0.09	41.70		
29			0.09	5.56	0.09	34.75		
30			0.09	2.78	0.09	24.32		
31			0.09	1.39	0.09	13.90		
32			0.09	1.04				
33			0.09	0.69				
34								

Tabela An.I.3 - Tabela dos dados medidos referente à Figura 4.3

0.03 m/s		0.05 m/s		0.22 m/s		0.33 m/s	
VsG (m/s)	ΔP Med						
0.00	78.66	0.05	66.46	0.05	65.08	0.05	68.87
3.29	14.82	0.00	79.01	0.00	79.35	0.22	64.46
1.75	14.13	0.22	52.88	0.22	59.36	0.11	67.08
0.88	18.68	0.33	46.19	0.33	54.74	0.00	79.77
0.44	30.40	0.44	40.67	0.44	47.02	0.33	60.74
0.33	32.40	0.11	57.91	0.11	63.50	0.44	53.91
0.22	42.54	0.88	28.95	0.88	35.64	0.88	42.74
0.11	46.33	1.75	21.85	1.75	27.78	1.75	33.78
0.05	52.12	3.29	20.33	3.29	25.16	3.29	30.54
15.35	6.89	4.39	20.06	4.39	25.16	4.39	31.09
14.25	7.23	7.67	18.40	7.67	23.78	7.67	30.26
13.16	7.58	10.96	15.78	10.96	25.30	10.96	32.06
10.96	8.61	13.16	15.23	13.16	24.47	13.16	32.61
7.67	12.06	14.25	15.51	14.25	24.47	14.25	33.57
4.39	14.96	16.45	16.27	16.45	26.40	16.45	35.43
19.74	5.86	18.64	17.71	18.64	28.61	18.64	37.57
18.64	5.17	19.74	18.27	19.74	28.81	19.74	38.81
17.54	5.17						
16.45	6.54						

0.44 m/s		0.49 m/s		0.55 m/s	
VsG (m/s)	ΔP Med	VsG (m/s)	ΔP Med	VsG (m/s)	ΔP Med
0.05	70.67	16.45	49.64	0.05	72.25
0.22	66.87	18.64	50.95	0.22	69.01
0.33	63.43	19.74	51.71	0.33	66.32
0.11	69.56			0.11	71.15
0.00	80.32			0.00	80.73
0.44	58.26			0.44	61.77
0.88	47.36			0.88	51.36
1.75	38.95			1.75	42.95
3.29	35.16			3.29	38.88
4.39	35.30			4.39	38.67
7.67	36.88			7.67	41.50
10.96	38.61			10.96	44.60
13.16	40.19			13.16	45.16
14.25	42.88			14.25	48.33
16.45	43.57				
18.64	47.22				
19.74	47.78				

Obs: ΔP em kPa

Tabela An.I.4 - Tabela dos dados medidos referente à Figura 4.4

0.05 m/s		0.11 m/s		0.22 m/s		0.33 m/s		0.44 m/s	
VsL (m/s)	ΔP Med								
0.55	72.25	0.55	71.15	0.33	64.46	0.55	66.32	0.00	2.41
0.44	70.67	0.44	69.56	0.44	66.87	0.44	63.43	0.05	40.67
0.33	68.87	0.33	67.08	0.55	69.01	0.00	2.41	0.22	47.02
0.22	67.84	0.00	2.55	0.00	2.55	0.33	60.74	0.33	53.91
0.05	66.46	0.22	63.50	0.05	52.88	0.22	54.74	0.44	58.26
0.00	2.55	0.05	57.91	0.22	59.36	0.05	46.19	0.55	61.77
0.03	52.12	0.03	46.33	0.03	42.54	0.03	32.40	0.03	30.40

0.88 m/s		1.75 m/s.		3.29 m/s		4.39 m/s		7.67 m/s	
VsL (m/s)	ΔP Med								
0.00	2.41	0.00	2.41	0.00	2.41	0.00	2.41	0.00	2.68
0.05	28.95	0.55	42.95	0.05	20.33	0.55	38.67	0.05	18.40
0.22	35.64	0.44	38.95	0.22	25.16	0.44	35.30	0.22	23.78
0.33	42.74	0.33	33.78	0.33	30.54	0.33	31.09	0.33	30.26
0.44	47.36	0.22	27.78	0.44	35.16	0.22	25.16	0.44	36.88
0.55	51.36	0.05	21.85	0.55	38.88	0.05	20.06	0.55	41.50
0.03	18.68	0.03	14.13	0.03	14.82	0.03	14.96	0.03	12.06

10.96 m/s		13.16 m/s		14.25 m/s		16.45 m/s		18.64 m/s	
VsL (m/s)	ΔP Med								
0.00	3.03	0.00	2.68	0.55	48.33	0.00	3.92	0.00	4.34
0.55	44.60	0.05	15.23	0.44	42.88	0.05	16.27	0.49	50.95
0.44	38.61	0.22	24.47	0.33	33.57	0.22	26.40	0.44	47.22
0.33	32.06	0.33	32.61	0.22	24.47	0.33	35.43	0.33	37.57
0.22	25.30	0.44	40.19	0.05	15.51	0.44	43.57	0.22	28.61
0.05	15.78	0.55	45.16	0.03	7.23	0.49	49.64	0.05	17.71
0.03	8.61	0.03	7.58	0.00	0.00	0.03	6.54	0.03	5.17

19.74 m/s	
VsL (m/s)	ΔP Med
0.00	4.55
0.05	18.27
0.22	28.81
0.33	38.81
0.44	47.78
0.49	51.71
0.03	5.86

Tabela An.I.5 - Tabela dos dados medidos referente à Figura 4.5

0.03 m/s			0.05 m/s			0.22 m/s			0.33 m/s		
VsG (m/s)	ΔP	Cal									
0.00	78.26		0.05	70.38		0.05	66.49		0.05	70.49	
3.29	8.13		0.00	78.27		0.00	78.52		0.22	55.14	
1.75	10.84		0.22	37.04		0.22	51.43		0.11	62.57	
0.88	15.06		0.33	29.77		0.33	46.19		0.00	78.79	
0.44	20.91		0.44	25.33		0.44	42.22		0.33	50.74	
0.33	24.44		0.11	51.89		0.11	58.56		0.44	47.20	
0.22	30.94		0.88	17.94		0.88	32.66		0.88	38.10	
0.11	45.11		1.75	12.65		1.75	24.72		1.75	29.98	
0.05	65.00		3.29	8.93		3.29	19.81		3.29	24.92	
15.35	5.82		4.39	8.02		4.39	18.51		4.39	23.72	
14.25	5.48		7.67	5.71		7.67	15.83		7.67	21.65	
13.16	5.17		10.96	6.29		10.96	17.99		10.96	25.13	
10.96	4.64		13.16	6.96		13.16	20.05		13.16	28.30	
7.67	4.18		14.25	7.34		14.25	21.21		14.25	30.09	
4.39	4.48		16.45	8.23		16.45	23.84		16.45	34.15	
19.74	7.45		18.64	9.24		18.64	26.83		18.64	38.79	
18.64	7.00		19.74	9.79		19.74	28.45		19.74	41.37	
17.54	6.58										
16.45	6.19										

0.44 m/s			0.49 m/s			0.55 m/s		
VsG (m/s)	ΔP	Cal	VsG (m/s)	ΔP	Cal	VsG (m/s)	ΔP	Cal
0.05	72.70		16.45	50.53		0.05	79.28	
0.22	57.54		18.64	58.29		0.22	60.92	
0.33	53.79		19.74	62.69		0.33	56.13	
0.11	66.29					0.11	74.32	
0.00	79.14					0.00	79.56	
0.44	50.67					0.44	53.38	
0.88	42.26					0.88	45.70	
1.75	34.35					1.75	38.21	
3.29	29.46					3.29	33.69	
4.39	28.50					4.39	33.03	
7.67	27.36					7.67	33.04	
10.96	32.34					10.96	39.74	
13.16	36.81					13.16	45.62	
14.25	39.39					14.25	49.10	
16.45	45.10							
18.64	51.89							
19.74	55.63							

Tabela An.I.6 - Tabela dos dados medidos referente à Figura 4.6

0.05 m/s		0.22 m/s		0.44 m/s		0.88 m/s		3.29 m/s	
VsL (m/s)	ΔP Cal								
0.55	79.28	0.33	55.14	0.00	0.09	0.00	0.09	0.00	0.16
0.44	72.70	0.44	57.54	0.05	25.33	0.05	17.94	0.05	8.93
0.33	70.49	0.55	60.92	0.22	42.22	0.22	32.66	0.22	19.81
0.22	66.49	0.00	0.09	0.33	47.20	0.33	38.10	0.33	24.92
0.05	70.38	0.05	37.04	0.44	50.67	0.44	42.26	0.44	29.46
0.00	0.09	0.22	51.43	0.55	53.38	0.55	45.70	0.55	33.69
0.03	65.00	0.03	30.94	0.03	20.91	0.03	15.06	0.03	8.13

7.67 m/s		13.16 m/s		16.45 m/s		18.64 m/s	
VsL (m/s)	ΔP Cal						
0.00	0.39	0.00	0.87	0.00	1.24	0.00	1.53
0.05	5.71	0.05	6.96	0.05	8.23	0.49	58.29
0.22	15.83	0.22	20.05	0.22	23.84	0.44	51.89
0.33	21.65	0.33	28.30	0.33	34.15	0.33	38.79
0.44	27.36	0.44	36.81	0.44	45.10	0.22	26.83
0.55	33.04	0.55	45.62	0.49	50.53	0.05	9.24
0.03	4.18	0.03	5.17	0.03	6.19	0.03	7.00

Tabela An.I.7 e An.I.8 - Tabela dos dados medidos referente às Figuras 4.7 e 4.8

Δp_{corr}	Δp_{calc}	Δp_{corr}	Δp_{calc}
-3.23	0.09	46.41	46.14
-3.23	0.09	40.90	42.17
-3.23	0.09	23.66	24.67
-3.16	0.09	23.32	19.76
-3.16	0.09	51.24	50.67
-3.16	0.09	47.10	47.14
-3.16	0.11	29.18	29.90
-3.16	0.15	51.93	50.59
-3.09	0.20	35.38	34.26
-2.88	0.39	55.38	53.29
-2.61	0.65	40.90	38.10
-2.40	0.86	23.66	4.47
-1.85	1.23	7.60	4.63
-1.50	1.51	7.11	5.46
-1.23	1.66	6.43	5.80
74.06	78.20	20.90	8.01
73.93	78.21	18.15	6.28
49.17	66.83	17.80	7.32
73.72	78.45	25.73	18.46
55.86	66.83	26.28	17.94
73.72	78.71	28.49	21.20
59.86	70.42	35.38	23.67
58.14	62.51	37.45	25.11
75.37	79.06	40.21	30.17
64.34	72.62	33.31	28.39
63.38	66.22	35.38	32.16
56.07	53.71	38.83	39.16
70.55	79.47	36.76	32.89
66.13	79.19	43.66	39.57
65.38	74.23	44.35	48.79
59.52	56.04	4.36	6.16
41.24	64.95	4.70	6.55
36.76	45.07	5.74	7.41
34.00	30.91	18.84	8.21
26.14	24.41	21.59	9.77
22.97	20.92	28.49	23.83
14.70	15.06	31.11	28.48
11.25	10.84	38.83	34.20
12.63	8.13	39.52	41.41
48.14	51.85	40.90	44.92
36.07	29.74	46.41	55.60
31.18	25.31		
18.15	12.64		
17.53	8.92		
55.65	58.51		

Tabela An.I.9 - Tabela dos dados medidos referente à Figura 4.9

Nº	Bolhas		Golfadas		Transição		Anular	
	V _{sL} (m/s)	V _{sG} (m/s)						
1	0.55	0.05	0.05	0.05	0.55	4.39	0.05	16.45
2	0.44	0.05	0.05	0.22	0.44	4.39	0.22	16.45
3	0.33	0.05	0.22	0.22	0.33	4.39	0.33	16.45
4	0.22	0.05	0.33	0.22	0.22	4.39	0.44	16.45
5	0.44	0.22	0.33	0.33	0.05	4.39	0.44	18.64
6	0.55	0.22	0.22	0.33	0.05	7.67	0.33	18.64
7	0.55	0.33	0.05	0.33	0.22	7.67	0.22	18.64
8	0.44	0.33	0.05	0.44	0.33	7.67	0.05	18.64
9	0.55	0.11	0.22	0.44	0.44	7.67	0.05	19.74
10	0.44	0.11	0.33	0.44	0.55	7.67	0.22	19.74
11	0.33	0.11	0.44	0.44	0.55	10.96	0.33	19.74
12			0.55	0.44	0.44	10.96	0.44	19.74
13			0.22	0.11	0.33	10.96	0.03	19.74
14			0.05	0.11	0.22	10.96	0.03	18.64
15			0.05	0.88	0.05	10.96	0.03	16.45
16			0.22	0.88	0.05	13.16		
17			0.33	0.88	0.22	13.16		
18			0.44	0.88	0.33	13.16		
19			0.55	0.88	0.44	13.16		
20			0.55	1.75	0.49	13.16		
21			0.44	1.75	0.49	14.25		
22			0.33	1.75	0.44	14.25		
23			0.22	1.75	0.33	14.25		
24			0.05	1.75	0.22	14.25		
25			0.05	3.29	0.05	14.25		
26			0.22	3.29	0.03	15.35		
27			0.33	3.29	0.03	14.25		
28			0.44	3.29	0.03	13.16		
29			0.55	3.29	0.03	10.96		
30			0.03	3.29	0.03	7.67		
31			0.03	1.75	0.03	4.39		
32			0.03	0.88				
33			0.03	0.44				
34			0.03	0.33				
35			0.03	0.22				
36			0.03	0.11				
37			0.03	0.05				

Tabela An.I.10 - Tabela dos dados medidos referente à Figura 4.10

ΔP_{Med}	ΔP_{Med}
3.17	4.07
3.03	4.14
74.33	75.08
53.37	54.74
75.77	76.12
62.33	63.02
77.15	77.50
68.88	69.22
3.03	3.86
3.03	3.93
2.90	4.00
39.37	41.99
27.16	32.20
22.68	24.41
47.57	49.78
35.85	40.54
29.23	31.99
55.43	57.16
47.78	50.19
40.27	42.20
2.55	4.27
3.03	4.76
3.45	5.03
23.03	23.72
20.96	22.68
20.61	21.65
29.23	29.92
29.92	31.30
30.61	32.68
39.58	40.27
42.33	45.09
47.50	49.57
4.00	5.24
4.48	5.45
21.99	23.03
22.34	23.37
31.65	31.99
33.51	34.06
51.99	53.37
54.40	54.74

Tabela An.I.11 - Tabela dos dados medidos referente à Figura 4.11

ΔP_{Med}	ΔP_{Med}
3.49	0.39
3.15	0.25
69.96	70.03
51.27	54.03
71.27	71.68
59.27	60.03
74.51	74.72
65.75	66.72
2.74	2.80
2.80	3.01
3.01	3.29
34.73	38.86
26.04	29.21
19.56	20.94
40.93	43.69
32.66	35.55
25.35	27.14
53.55	54.38
45.62	46.93
37.83	38.86
2.74	3.56
2.87	4.05
3.70	4.80
19.28	19.56
16.66	17.21
16.94	17.49
25.07	25.76
25.42	25.63
25.56	26.11
35.76	36.11
39.28	40.24
43.35	43.69
4.39	3.98
3.98	3.70
16.11	16.11
17.84	18.04
28.59	28.87
30.31	30.31
47.14	47.83
49.21	49.55

Tabela An.I.12 - Tabela dos dados medidos referente à Figura 4.12

Frequência	ΔP Med	Padrão
Hz	kPa	
0.0	59.55	kPa (Bolhas)
0.5	60.03	
1.0	61.41	
1.5	63.27	
0.0	58.65	
0.5	59.06	
1.0	61.41	
1.5	63.27	
0.0	58.65	
0.5	59.55	
1.0	60.92	
1.5	62.79	
0.0	44.72	kPa (Golfadas)
0.5	47.48	
1.0	48.93	
1.5	51.69	
0.0	44.72	
0.5	47.48	
1.0	48.44	
1.5	50.79	
0.0	44.72	
0.5	47.07	
1.0	48.93	
1.5	49.82	

0.0	28.04	kPa (Transição)
0.5	28.04	
1.0	27.62	
1.5	28.52	
0.0	27.14	
0.5	27.14	
1.0	28.04	
1.5	29.00	
0.0	26.66	
0.5	27.14	
1.0	27.62	
1.5	28.52	
0.0	32.24	kPa (Anular)
0.5	32.66	
1.0	31.76	
1.5	32.66	
0.0	33.14	
0.5	32.66	
1.0	32.24	
1.5	33.14	
0.0	34.10	
0.5	34.10	
1.0	33.14	
1.5	34.10	

Tabela An.I.13 - Tabela dos dados medidos referente à Figura 4.13

Frequência	ΔP Med	Padrão
Hz	kPa	
58.86	0.69	kPa (Bolhas)
58.86	1.17	
58.86	2.55	
58.86	4.41	
58.86	-0.21	
58.86	0.20	
58.86	2.55	
58.86	4.41	
58.86	-0.21	
58.86	0.69	
58.86	2.06	
58.86	3.93	
41.19	3.53	kPa (Golfadas)
41.19	6.29	
41.19	7.74	
41.19	10.50	
41.19	3.53	
41.19	6.29	
41.19	7.26	
41.19	9.60	
41.19	3.53	
41.19	5.88	
41.19	7.74	
41.19	8.64	

5.84	22.20	kPa (Transição)
5.84	22.20	
5.84	21.78	
5.84	22.68	
5.84	21.30	
5.84	21.30	
5.84	22.20	
5.84	23.16	
5.84	20.82	
5.84	21.30	
5.84	21.78	
5.84	22.68	
3.92	28.32	kPa (Anular)
3.92	28.73	
3.92	27.84	
3.92	28.73	
3.92	29.21	
3.92	28.73	
3.92	28.32	
3.92	29.21	
3.92	30.18	
3.92	30.18	
3.92	29.21	
3.92	30.18	

Apêndice A

Descrição do procedimento para Cálculo da Perda de Carga Pelo Método Beggs e Brill.

A descrição do procedimento passo a passo para o cálculo da perda de carga pelo método Beggs e Brill segue abaixo.

1. Determinar ρ_L , ρ_g , v_{SL} , v_{SG} , v_m , λ , F_r , Re_n , N_L à pressão e temperatura constante.

2. Calcular $\lambda = \frac{v_{SL}}{v_{SL} + v_{SG}}$

3. Calcular usando as seguintes equações:

$$L_1 = 316\lambda_L^{0,302}$$

$$L_2 = 0,0009252\lambda_L^{-2,4684}$$

$$L_3 = 0,10\lambda_L^{-1,4516}$$

$$L_4 = 0.5\lambda_L^{-6.738}$$

4. Determinar o padrão de escoamento usando o seguinte critério.

4.1 Segregado

Se $\lambda < 0,1$ e $F_r < L_1$

ou

$$\lambda_L \geq 0,1 \quad e \quad F_r < L_2$$

4.2 Transição

$$\text{Se } \lambda \geq 0,01 \quad e \quad L_2 \leq F_r \leq L_3$$

4.3 Intermitente

$$\text{Se } 0,01 \leq \lambda < 0,4 \quad e \quad L_3 < F_r \leq L_1$$

ou

$$\lambda_L \geq 0,4 \quad e \quad L_3 < F_r < L_4$$

4.4 Distribuído

$$\text{Se } \lambda < 0,4 \quad e \quad F_r \geq L_1$$

ou

$$\lambda_L \geq 0,4 \quad e \quad F_r > L_4$$

5. Calcular $H(0) = \frac{a\lambda_L^b}{F_r^c}$

6. Calcular $C = (1 - \lambda_L) \ln(d * \lambda_L^e * N_L^f * F_r^g)$

7. Calcular $\psi = 1 + C[\text{sen}(1,8\phi) - 0,333\text{sen}^3(1,8\phi)]$

8. Calcular $H(\phi) = H(0)\psi$

9. Calcular $\rho_s = \rho_L H(\phi) + \rho_G(1 - H(\phi))$

10. Calcular $\rho_n = \rho_L \lambda_L + \rho_G(1 - \lambda_L)$

11. Calcular $\mu_n = \mu_L \lambda_L + \mu_G(1 - \lambda_L)$

12. Calcular $Re\ n = \frac{\rho_n V_m d}{\mu_n}$

13. Calcular $f_n = 1/[2 \log (Re\ n/(4,5223 \log Re\ n - 3,8215))]^2$ ou usando o diagrama de Moody (Figura A.1)

14. Calcular $y = \frac{\lambda_L}{[H_L(\phi)]^2}$

15. Calcular $s = \ln y / [-0,0523 + 3,182 \ln y - 0,8725(\ln y)^2 + 0,01853(\ln y)^4]$

16. Calcular $\frac{f_{bf}}{f_n} = e^s$

17. Calcular $f_{bf} = e^s f_n$

18. Calcular $\frac{dp}{dz} = \frac{\rho_s g + \frac{f_{bf} \rho_n V_m^2}{2d}}{\left(1 - \frac{\rho_s V_m V_{SG}}{p_i}\right)}$

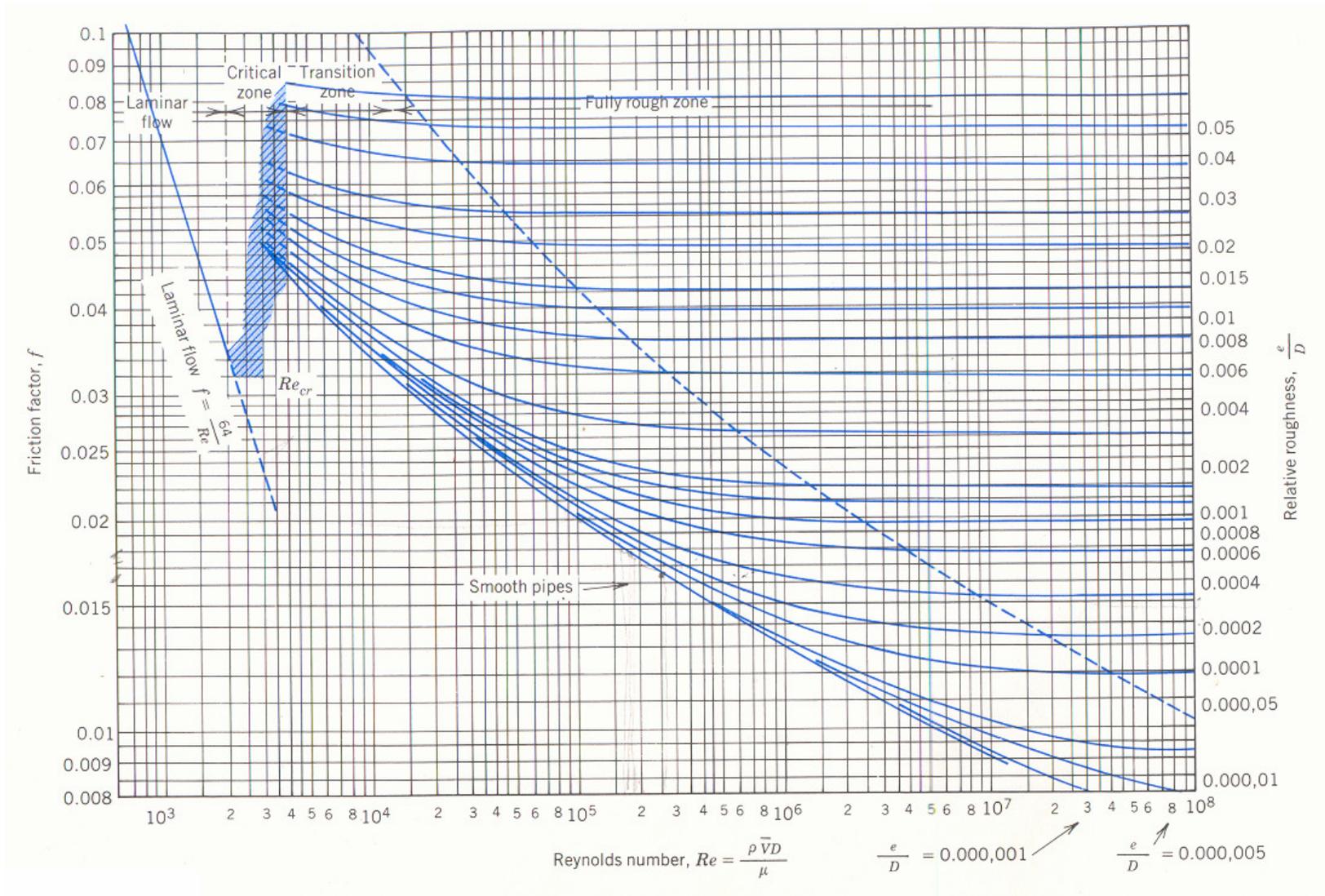


Figura A.1: Diagrama de Moody para cálculo da perda de carga.
(Original de Fox e McDonald, 1994)