

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

GISLAINE LETICIA CARVALHO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CORRELAÇÕES PARA A
FREQUÊNCIA DO ESCOAMENTO INTERMITENTE
GÁS-LÍQUIDO EM TUBULAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2017**

GISLAINE LETICIA CARVALHO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CORRELAÇÕES PARA A
FREQUÊNCIA DO ESCOAMENTO INTERMITENTE
GÁS-LÍQUIDO EM TUBULAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE COMPARATIVA DE CORRELAÇÕES PARA A FREQUÊNCIA DO ESCOAMENTO INTERMITENTE GÁS-LÍQUIDO EM TUBULAÇÕES

por

GISLAINE LETICIA CARVALHO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 1 de dezembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
Orientador

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
Membro Titular

Prof. Me. Gilberto Zammar
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram durante o período da minha graduação, em especial a minha família por sempre acreditar em mim e ao meu orientador, Prof. Luiz Eduardo, pela sua paciência e o tempo dedicado a mim durante a realização deste trabalho.

RESUMO

CARVALHO, Gislaine Leticia. **Análise Comparativa de Correlações para a Frequência do escoamento Intermitente Gás-Líquido em Tubulações**. 2017. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Escoamentos bifásicos gás-líquido são encontrados em diversos processos industriais e na natureza, que por sua vez podem ser classificados em três padrões principais: disperso, separado e intermitente. O escoamento intermitente é caracterizado como uma combinação de uma região de escoamento separado, bolha alongada de gás em paralelo com um filme de líquido, e uma região de escoamento disperso, pistão de líquido aerado, constituindo assim uma célula unitária, que escoam ao longo da tubulação com uma determinada frequência. Esta frequência é considerada uma característica fundamental deste tipo de escoamento. Sendo assim, no presente trabalho é proposta a realização de um estudo referente aos modelos (correlações) disponíveis na literatura para estimativa da frequência do escoamento intermitente. As correlações de frequência analisadas neste estudo são calculadas e comparadas contra dados experimentais também disponíveis na literatura, para tubulações horizontais, inclinadas e verticais, com o objetivo de verificar dentre elas quais são mais precisas, bem como as suas limitações para cada aplicação. Os resultados obtidos nesta análise demonstraram que apesar de algumas correlações de frequência apresentar resultados satisfatórios, ainda não é possível aplicá-las de forma abrangente, levando em consideração as diferentes configurações experimentais que possam ocorrer, como por exemplo, variações de diâmetro e inclinações de tubulações, bem como propriedades de fluidos.

Palavras-chave: Escoamento bifásico. Modelagem. Golfadas. Frequência. Correlações.

ABSTRACT

CARVALHO, Gislaine Leticia. **Comparative Analysis of Frequency Correlations for the Intermittent Gas-Liquid Flow in Pipes**. 2017. 57 p. Final Coursework (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Gas-liquid two-phase flows are found in several industrial processes and in nature, which in turn can be classified into three main patterns: dispersed, separated and intermittent. Intermittent flow is characterized as a combination of a separate flow region, elongate gas bubble in parallel with a liquid film, and a dispersed flow region, an aerated liquid piston, thereby constituting a unitary cell, which flows along the liquid flow path with a certain frequency. This frequency is considered a fundamental characteristic of this flow type. Thus, in the present work, it is proposed to carry out a study concerning the models (correlations) available in the literature to estimate the intermittent flow frequency. The frequency correlations analyzed in this study are calculated and compared against experimental data also available in the literature for horizontal, inclined and vertical pipes, in order to verify which are more accurate, as well as their limitations for each application. The results obtained in this analysis showed that although some frequency correlations have satisfactory results, it is not yet possible to apply them comprehensively, taking into account the different experimental configurations that may occur, such as variations in pipe diameters and inclinations as well as fluid properties.

Keywords: Two-phase flow. Modelling. Slug. Frequency. Correlations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema da extração, transporte e estocagem do petróleo	12
Figura 2 – Padrões de escoamento gás-líquido em tubulações horizontais: a) disperso; b) separado/disperso; c) e d) intermitente; e) e f) separado	13
Figura 3 – Padrões de escoamento gás-líquido em tubulações verticais: a) disperso; b) e c) intermitente; d) separado; f) separado/disperso	14
Figura 4 – Representação esquemática da célula unitária no escoamento intermitente e suas variáveis	29
Gráfico 1 – Tendências e comportamentos das correlações de frequência para inclinação de 0°	32
Gráfico 2 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-agua num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 0°	39
Gráfico 3 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-agua num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 15°	40
Gráfico 4 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-agua num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 30°	41
Gráfico 5 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-agua num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 45°	42
Gráfico 6 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-agua num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 60°	43
Gráfico 7 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-agua num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 75°	44
Gráfico 8 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-agua num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 90°	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações a respeito dos modelos de frequência analisados neste trabalho	30
Tabela 2 – Definições das correlações para a estimativa da frequência	31
Tabela 3 – Intervalos das variáveis determinadas experimentalmente por Bueno (2010)	37
Tabela 4 – Valores em módulo dos desvios relativos das correlações de frequência analisadas para cada inclinação	46
Tabela 5 – Valores de RMS dos desvios relativos das correlações de frequência analisadas para cada inclinação	46

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

SIGLAS

ECT	Tomografia de Capacitância Elétrica, do inglês <i>Electrical Capacitance Tomography</i>
PDF	Função de Densidade de Probabilidade, do inglês <i>Probability Density Function</i>
PSD	Densidade Espectral de Potência, do inglês <i>Power Spectral Density</i>
RMS	Raiz do Valor Quadrático Médio, do inglês <i>Root Mean Square</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

A	área	[m ²]
D	diâmetro	[m]
f	frequência	[Hz]
Fr	número de Froude	
g	aceleração gravitacional	[m/s ²]
H	espessura	[m]
J	velocidade superficial	[m/s]
L	comprimento	[m]
N	número de pontos experimentais	
N_ν	número adimensional de viscosidade inversa	
P	pressão	[mbar]
Q	vazão volumétrica	[m ³]
Re	número de Reynolds	
S	perímetro	[m]
\bar{S}	fator de deslizamento	
St	número de Strouhal	
T	temperatura	[°C]
U	velocidade absoluta	[m/s]
We	número de Weber	

LETRAS GREGAS

β	fator de intermitência	
ϵ_R	valor médio do módulo do desvio relativo	
λ	fração homogênea da fase	
μ	viscosidade dinâmica	[N·s/m ²]
ν	viscosidade cinemática	[m ² /s]
Φ	função adimensional do número de Reynolds	
ϕ	fração da fase (<i>in situ</i>)	
Π_μ	razão de viscosidades dinâmicas	
Π_ρ	razão de massas específicas	
Ψ	função adimensional da fração homogênea	
ρ	massa específica	[kg/m ³]
σ	tensão superficial gás-líquido	[N/m]
τ	tensão de cisalhamento	[N/m ²]
Θ	função adimensional da inclinação e do número de Froude	
θ	ângulo de inclinação	[°]

SUBSCRITOS

atm	atmosférica
B	bolhas dispersas
C	gás na bolha alongada

<i>F</i>	filme de líquido
<i>G</i>	gás
<i>h</i>	horizontal
<i>I</i>	interfacial
<i>i</i>	posição axial
<i>k</i>	fase
<i>L</i>	líquido
<i>min</i>	mínimo
<i>S</i>	pistão de líquido
<i>T</i>	bolha alongada
<i>v</i>	vertical
<i>W</i>	parede

SUMÁRIO

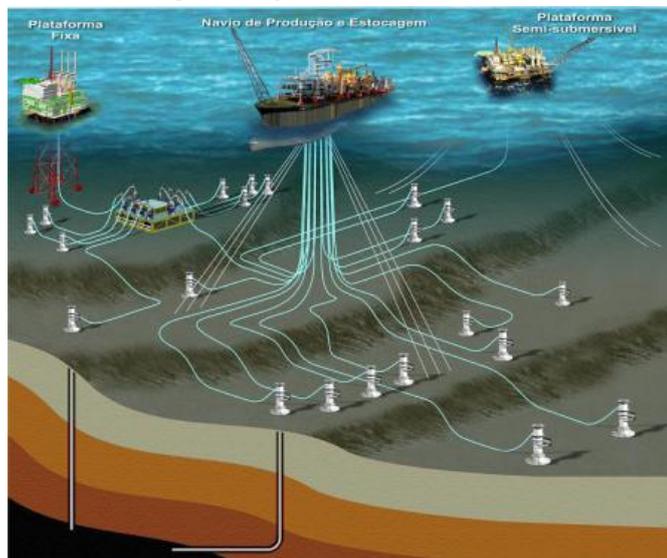
1	INTRODUÇÃO	12
1.1	MOTIVAÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	ESCOAMENTO INTERMITENTE	16
2.2	FREQUÊNCIA DA CÉLULA UNITÁRIA	18
3	METODOLOGIA	28
3.1	ESCOAMENTO INTERMITENTE E SUAS VARIÁVEIS	28
3.2	CORRELAÇÕES PARA ESTIMATIVA DA FREQUÊNCIA	30
3.2.1	Parâmetros Envolvidos nas Correlações de Frequência	33
3.3	MÉTODO DE ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES DE FREQUÊNCIA	36
3.4	DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	ANÁLISE A PARTIR DOS GRÁFICOS	38
4.2	ANÁLISE DOS VALORES DE DESVIOS RELATIVOS E RMS	43
5	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

O escoamento multifásico é aquele caracterizado pela presença de duas ou mais fases ou componentes imiscíveis, podendo se apresentar nas seguintes combinações: gás-sólido, gás-líquido, líquido-sólido, líquido-líquido, líquido-líquido-gás, entre outros (VICENCIO, 2013). A ocorrência deste tipo de escoamento encontra-se tanto em fenômenos naturais quanto em diversas atividades industriais: em fenômenos meteorológicos (erosão do solo e transporte pelo vento), em sistemas biológicos (transporte de sangue no sistema cardiovascular), além de diversas aplicações industriais como em geradores de vapor, evaporadores, unidades de extração e destilação, tubulações para transporte de misturas, entre outros (ISHII; HIBIKI, 2011).

O escoamento bifásico de gás e líquido, apesar da sua relativa simplicidade, apresenta uma análise complexa em virtude dos fenômenos físicos envolvidos (LIMA, 2011), como por exemplo, na área de produção de petróleo, onde são utilizados diversos modelos para estudo. Durante a extração, a mistura de fluidos (gás e óleo) que sai do reservatório é transportada através de tubulações até a unidade estacionária de produção, onde estas fases são separadas e processadas. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática da produção de petróleo, onde o escoamento é transportado do reservatório até o navio de produção e estocagem.

Figura 1 – Esquema da extração, transporte e estocagem do petróleo

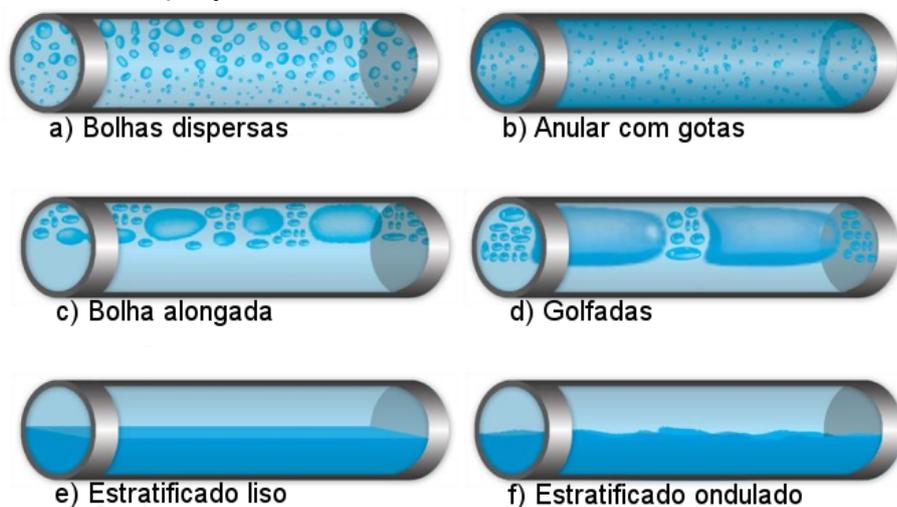


Fonte: Diário do Pré-Sal (2017)

Com as modernas técnicas de perfuração de petróleo que surgiram ao longo dos anos, os dutos que transportam o escoamento podem seguir diferentes orientações: horizontal, inclinado e vertical. Além disto, no escoamento gás-líquido em tubulações, a forma como se apresenta a distribuição espacial das fases é denominada de padrões de escoamento, que segundo Rodrigues (2009), dependem de vários fatores como as vazões das fases, as características geométricas das tubulações e as propriedades dos fluidos. A classificação é frequentemente feita em três padrões principais: disperso, separado e intermitente. Por sua vez, estes padrões principais podem ser subclassificados de acordo com as peculiaridades dos arranjos formados.

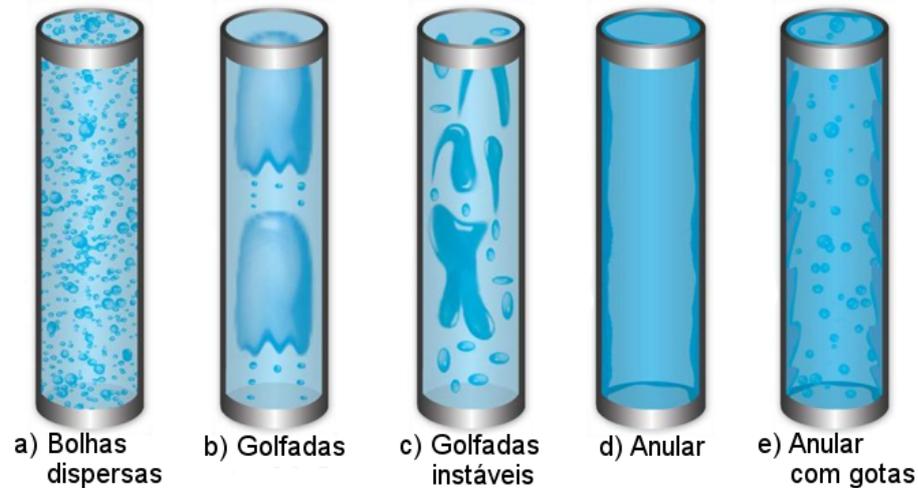
No escoamento disperso partículas discretas, gotas ou bolhas encontram-se imersas em um volume contínuo de outra fase, podendo ser subclassificado em bolhas uniformes, bolhas distorcidas, capa esférica e gotas. O escoamento separado ocorre quando as fases com correntes contínuas de diferentes fluidos são separadas por uma interface bem definida. Este escoamento pode ser subclassificado em estratificado liso, estratificado ondulado, semianular e anular. O escoamento intermitente é caracterizado pela intermitência de uma fase dispersa seguida de uma fase separada que se repete ao longo do escoamento com certa frequência, que por sua vez subdivide-se em golfadas e golfadas instáveis. Nas Figuras 2 e 3 são apresentadas ilustrações dos padrões de escoamento gás-líquido em tubulações horizontais e verticais, respectivamente.

Figura 2 – Padrões de escoamento gás-líquido em tubulações horizontais: a) disperso; b) separado/disperso; c) e d) intermitente; e) e f) separado



Fonte: Adaptado de Bratland (2010)

Figura 3 – Padrões de escoamento gás-líquido em tubulações verticais: a) disperso; b) e c) intermitente; d) separado; f) separado/disperso



Fonte: Adaptado de Bratland (2010)

1.1 MOTIVAÇÃO

O escoamento gás-líquido ocorre em vários tipos de aplicações industriais, como por exemplo nas indústrias química, petrolífera e nuclear, em plantas de energia geotérmica, entre outras (SHOHAM, 2006). No caso da indústria petrolífera, o estudo deste tipo de escoamento tornou-se cada vez mais importante em razão das longas distâncias que as misturas de gás e óleo devem percorrer, sendo que muitas vezes na ocorrência do padrão intermitente.

Devido à intermitência do escoamento em golfadas, ocorrem variações nas frações das fases e na pressão da mistura que devem ser previstas na planta de processamento, bem como em seus critérios de dimensionamento, pois em determinado momento tem-se a chegada de apenas líquido, na forma de um pistão de líquido aerado, e em outro momento a chegada de grande quantidade de gás, na forma de uma bolha alongada de gás.

A frequência de alternância das regiões formadas pelo pistão e pela bolha alongada em uma seção específica da linha de produção pode gerar vibrações, que se não monitorada corretamente, pode ocasionar riscos de ressonância, além de comprometer a segurança das instalações. Por esta razão, é de grande importância a modelagem do escoamento em golfadas e o entendimento dos fenômenos que ocorrem para prever anomalias e evitar danos ou perdas de produção (RODRIGUES, 2009).

Outro aspecto importante relacionado à frequência do escoamento intermitente é a sua influência no comprimento da célula unitária (conjunto formado pelo pistão de líquido aerado e pela bolha alongada de gás), que por sua vez influencia as magnitudes das contribuições do atrito e gravitacional no gradiente de pressão da mistura, que deve ser previsto para o projeto, o dimensionamento e a operação dos equipamentos de produção.

Em muitos casos, a frequência do escoamento intermitente pode ser medida experimentalmente, desde que seja utilizada instrumentação apropriada. Porém, para a realização de previsões do escoamento utilizando simuladores, que são frequentemente baseados em modelos na maioria das vezes mecanicistas, como por exemplo, o modelo de célula unitária de Taitel e Barnea (1990), torna-se necessário a aplicação de submodelos ou correlações que forneçam uma estimativa razoável da frequência do escoamento intermitente. O problema é que muitas destas correlações, para estimativa da frequência do escoamento intermitente, disponíveis na literatura possuem limitações impostas pelas condições empíricas nas quais foram desenvolvidas. Portanto, é de grande importância a realização de estudos para a verificação das limitações e precisão destas correlações, para que se possa ter uma maior confiabilidade na aplicação destas correlações, bem como investigar correlações que possam ser utilizadas para uma maior variedade de aplicações.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa de correlações disponíveis na literatura para a estimativa da frequência do escoamento intermitente, com a finalidade de identificar entre estas quais são mais precisas, bem como suas limitações de aplicação. Os objetivos específicos são:

- Fazer um levantamento a respeito da faixa de validade e limitações de cada uma das correlações analisadas.
- Comparar cada uma das correlações analisadas contra dados experimentais disponíveis na literatura.
- Identificar quais correlações são mais precisas, bem como as que podem ser utilizadas para uma maior variedade de aplicações.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura apresentada no presente capítulo está dividida em duas partes: a primeira apresenta alguns trabalhos relacionados com a modelagem do escoamento intermitente e sua dependência com diversos parâmetros, dentre eles, a frequência; a segunda apresenta alguns trabalhos relacionados à proposição de correlações para estimativa da frequência do escoamento intermitente.

2.1 ESCOAMENTO INTERMITENTE

Em virtude da ocorrência do escoamento intermitente em diversas aplicações industriais, tem se tornado cada vez mais necessário compreender os mecanismos e os parâmetros relacionados a este padrão de escoamento bifásico. Existem vários modelos na literatura para prever o comportamento do escoamento intermitente, que vão desde modelos simplificados, em regime permanente, até modelos complexos, em regime transiente.

Os primeiros modelos para previsão do escoamento intermitente foram desenvolvidos por Griffith e Wallis (1961) e Nicklin (1962), que perceberam a importância do movimento da bolha alongada. Esses modelos semimecanicistas foram desenvolvidos com base em observações físicas, bem como a partir de experimentos realizados, e mostraram que ao se reduzir a intermitência para periodicidade, a estrutura é simplificada para uma célula, que consiste em uma bolha alongada (em forma de cápsula cilíndrica) e uma região de fluxo homogêneo de líquido aerado. Para essa estrutura, Wallis (1969) atribuiu o conceito de célula unitária, definida como uma sucessão de pistões de líquido aerados seguido por bolhas alongadas de gás. Este conceito simplifica os cálculos de tal forma que os parâmetros físicos que governam o escoamento são determinados para uma única célula e, devido à hipótese de periodicidade, podem ser repetidos para outras células escoando.

Utilizando o conceito de célula unitária, Dukler e Hubbard (1975) propuseram um modelo para prever o comportamento do escoamento gás-líquido no padrão intermitente em tubulações horizontais ou levemente inclinadas. Este modelo permite calcular a queda de pressão na célula unitária, a velocidade do líquido no pistão, a

velocidade do filme de líquido, a velocidade do nariz da bolha alongada, os comprimentos do pistão e da bolha, bem como a fração de líquido na região do filme. Os resultados obtidos por eles apresentaram uma satisfatória concordância entre modelo e dados experimentais, porém, o modelo não é completo e, portanto, necessita de estimativas de frequência e de fração de líquido como dados de entrada.

Posteriormente, Fernandes, Semiat e Dukler (1983), utilizando a mesma linha adotada por Dukler e Hubbard (1975), desenvolveram um modelo para escoamentos na vertical tendo como dados de entrada o diâmetro da tubulação, as propriedades dos fluidos (massa específica, viscosidade dinâmica e tensão superficial), além das vazões de gás e de líquido.

Vários outros autores propuseram modelos mecanicistas, em regime permanente, para prever o escoamento intermitente utilizando o conceito de célula unitária, como os modelos de Kokal e Stanislav (1989), de Taitel e Barnea (1990), de Andreussi, Bendiksen e Nydal (1993), de Cook e Behnia (1997) e de Netto, Fabre e Peresson (1999). Dentre estes modelos, o mais completo é o proposto por Taitel e Barnea (1990), que considera todos os termos do balanço de forças e é aplicável em escoamentos horizontais, inclinados e verticais. Porém, mesmo este modelo sendo o mais completo, necessita de equações de fechamento para solução.

Com a evolução tecnológica e aprimoramento dos computadores, novos modelos para o cálculo dos parâmetros do escoamento intermitente, em regime transitente, puderam ser desenvolvidos através de simulações da evolução do escoamento, como os modelos de dois fluidos, de deslizamento (ou de mistura) e de seguimento de pistões. O modelo de dois fluidos foi inicialmente desenvolvido por Ishii (1975) e trata as fases do fluido como se escoassem individualmente na tubulação. Além disto, o escoamento pode ser considerado unidimensional e as equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia são aplicadas tanto para a fase gasosa quanto para a fase líquida. O modelo de mistura surgiu como alternativa ao modelo de dois fluidos, considerando as duas fases como uma mistura, levando em consideração a velocidade relativa entre o gás e o líquido. Dentre os trabalhos desenvolvidos sobre este modelo pode-se citar os estudos realizados por Henau e Raithby (1995) e Issa e Kempf (2003), cujos modelos propostos foram desenvolvidos especificamente para escoamentos de golfadas (intermitente). No modelo de seguimento de pistões, células unitárias são rastreadas ao longo da tubulação, ou seja, cada pistão e

bolha do escoamento são considerados como objetos distintos e as equações de conservação (massa, quantidade de movimento e energia) são aplicadas em volumes de controle que compreendem cada estrutura do escoamento. Barnea e Taitel (1993) e Zheng, Brill e Taitel (1994) foram os primeiros a utilizar esse modelo. Posteriormente, Taitel e Barnea (1998), Al-Safran, Taitel e Brill (2004) e Rosa et al. (2015), entre outros autores desenvolveram outros modelos de segmento de pistões para determinar os parâmetros no escoamento intermitente.

Apesar de existirem vários trabalhos na literatura para prever o escoamento intermitente, nenhum modelo leva em consideração todos os fenômenos envolvidos no escoamento. Os modelos em regime permanente apresentam grandes simplificações, como por exemplo, a consideração de que o escoamento é periódico, que torna a análise simples, porém, os resultados apresentam-se como valores médios razoáveis das propriedades. Nos modelos em regime transiente, mesmo considerando a intermitência e conhecendo a evolução das células ao longo do escoamento, a resolução necessita de equações de fechamento para o cálculo de alguns parâmetros, que são obtidos experimentalmente. A frequência da célula unitária é, portanto, considerada uma das principais variáveis utilizadas para o fechamento do sistema de equações e, desta forma, torna-se necessário seu estudo para prever, da forma mais assertiva possível, o seu comportamento.

2.2 FREQUÊNCIA DA CÉLULA UNITÁRIA

Várias correlações tem sido desenvolvidas para prever a frequência em escoamentos intermitentes, variando desde simples correlações, tal como as de Gregory e Scott (1969) e de Heywood e Richardson (1979), até correlações com maior grau de complexidade, levando em conta comprimento da tubulação e variáveis mecanicistas tais como as correlações de Hill, Wood et al. (1990) e de Hill, Wood et al. (1994).

Gregory e Scott (1969) foram os primeiros a desenvolver uma correlação para a frequência do escoamento intermitente. Utilizando um tubo de 19 mm de diâmetro interno e dióxido de carbono e água como fluidos, os autores conduziram um experimento no qual puderam obter dados de frequência medidos utilizando duas técnicas, uma através de observações visuais, onde foi contado o número células unitárias passando em um ponto específico na seção de teste em um período de tempo medido

usando um cronômetro, e a outra através da contagem do número de pulsos de pressão das células unitárias registrados pelo sistema de medição de pressão em um determinado período de tempo. Ambos os métodos de medição foram considerados satisfatórios. Os autores mostraram que há dependência direta da frequência com relação à velocidade superficial do líquido e dependência indireta da frequência em relação ao diâmetro do tubo. A equação proposta para determinar a frequência em escoamentos na horizontal pode apresentar resultados satisfatórios para escoamentos que apresentem características semelhantes às aquelas utilizadas para desenvolvê-la.

A correlação proposta por Gregory e Scott (1969) foi posteriormente reescrita por Greskovich e Shrier (1972) em termos da fração volumétrica de líquido e do número de Froude, de modo a se obter resultados mais precisos para outras faixas de dados experimentais na horizontal. Para uma mistura ar-água, o experimento foi realizado em tubulações com diâmetros de 38,1 mm e 152,4 mm, para verificar o efeito do diâmetro. Outro experimento foi realizado com o tubo de 38,1 mm, utilizando uma mistura nitrogênio-querosene, para verificar o efeito das propriedades dos fluidos no ajuste da correlação. Os resultados obtidos indicaram uma pequena influência tanto em relação ao diâmetro quanto em relação às propriedades dos fluidos. Os autores afirmam que a correlação de Gregory e Scott (1969) não é indicada para previsão da frequência em tubulações com grandes diâmetros.

Taitel e Dukler (1977) propuseram um modelo analítico para a previsão da frequência em tubos horizontais e quase horizontais. O modelo é baseado no mecanismo de formação da célula unitária, que é um fenômeno que ocorre na região de entrada e o processo é formado a partir de ondas instáveis geradas no filme de líquido estratificado, segundo as observações dos autores. À medida que escoar no tubo, este filme estratificado desacelera e seu nível cresce de forma gradativa até atingir um nível de equilíbrio, que por sua vez apresenta uma superfície instável, onde pequenas ondas geradas crescem até bloquear a passagem de gás. Em seguida, o gás acelera o líquido à sua frente e então uma célula unitária é formada, fazendo com que logo após sua formação, o nível de líquido caia para um nível mais baixo do que o nível de equilíbrio. Para os autores, a frequência é o inverso do tempo necessário para que o filme atinja novamente o nível de equilíbrio logo após a formação da célula unitária. Para determinar esse tempo, foram aplicadas as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, obtendo-se um sistema de duas equações

diferenciais parciais em função da espessura e da velocidade do filme de líquido. Os autores apresentaram soluções numéricas na forma adimensional para que o resultado pudesse ser comparado com os dados experimentais disponíveis. A comparação realizada apresentou resultados aceitáveis, dentro da faixa de incerteza dos dados apresentados por outros autores.

Seguindo o mesmo procedimento de Gregory e Scott (1969), Heywood e Richardson (1979) correlacionaram a frequência média com o número Froude, o diâmetro e a fração volumétrica de líquido para um experimento realizado em uma tubulação horizontal de 42 mm de diâmetro e uma mistura de ar e água. Através do método de absorção de raios gama, foi realizada uma varredura em uma seção transversal do tubo, na qual foi possível obter a Função de Densidade de Probabilidade, do inglês *Probability Density Function* (PDF), e a Densidade Espectral de Potência, do inglês *Power Spectral Density* (PSD), da fração de líquido para determinar valores médios de espessura de filme de líquido, de fração de líquido no pistão, bem como da frequência e do comprimento médio da célula. A frequência média foi estimada como sendo o valor da frequência máxima obtida da PSD. Os autores propuseram duas correlações, uma para um conjunto de 68 pontos experimentais e outra para outro conjunto de 46 pontos experimentais. Sendo mais frequentemente utilizada, a correlação para o conjunto com maior número de pontos experimentais.

Tronconi (1990) desenvolveu um modelo a partir da análise teórica do processo de formação da célula unitária, onde relaciona a frequência com as propriedades do escoamento na região de entrada. O autor considera que a frequência é inversamente proporcional ao período das ondas instáveis que geram as células unitárias e apresentou um modelo para cálculo de frequência que correlaciona as massas específicas do gás e do líquido, a velocidade do gás e a espessura de equilíbrio do gás. Os valores obtidos para a frequência, através do cálculo utilizando a correlação proposta, apresentaram uma satisfatória concordância quando comparados com os dados experimentais de outros autores.

Hill, Wood et al. (1990) desenvolveram uma correlação mecanicista para prever a frequência no escoamento intermitente. Segundo os autores, modelos mecanicistas apresentam resultados mais satisfatórios, visto que as características do escoamento como comprimento do pistão de líquido, fração de líquido e frequência não podem ser previstas de forma adequada utilizando as correlações empíricas anterior-

mente desenvolvidas. Para uma mistura ar-água numa tubulação de 50 mm diâmetro, um grande banco de dados das características do escoamento intermitente, em plataformas de teste de baixa pressão, foi utilizado como dados de entrada para desenvolver um método que, a partir de observações da plataforma de testes, correlaciona a frequência do escoamento com a fração de líquido no filme estratificado na região de formação das células e com a velocidade de deslizamento do gás. Posteriormente, Hill, Wood et al. (1994) fizeram ajustes na correlação usando uma maior quantidade de dados, incluindo dados em tubulações de 152,4 mm de diâmetro. Nesse novo modelo, foi incluído o efeito do tempo de reconstrução da espessura do líquido antes da formação da célula, produzindo uma correlação com dupla exponencial, mais precisa para os dados de campo e de teste.

Nydal (1991 apud HERNANDEZ-PEREZ; ABDULKADIR; AZZOPARDI, 2010) realizou uma análise experimental utilizando uma mistura ar-água como fluido de teste em tubos com diâmetros na faixa de 31 mm a 90 mm. A partir desta análise, o autor propôs uma correlação baseada na taxa de fluxo de líquido, argumentando que a frequência do escoamento intermitente depende fortemente da velocidade superficial do líquido e tem pouca dependência com a velocidade superficial do gás.

Jepson e Taylor (1993) mostraram que o diâmetro de uma tubulação tem grande influência nas características do escoamento, como na frequência, no comprimento, na velocidade e no gradiente de pressão. Segundo o autor, a maioria dos estudos já existentes são para tubulações de diâmetros menores, portanto, seu experimento foi realizado utilizando uma tubulação de 300 mm de diâmetro para uma mistura ar-água e os resultados obtidos foram comparados com dados já existentes para tubos de 25,4 mm e 51,2 mm. Foi observado que a frequência diminui à medida que a velocidade superficial do líquido diminui e que ocorre um aumento do diâmetro do tubo, para um determinado valor de velocidade superficial do gás.

Manolis, Mendes-Tatsis e Hewitt (1995) adquiriram dados experimentais para frequência, em alta pressão, num tubo horizontal e utilizando uma mistura ar-água. A frequência foi estimada através da contagem do número de células unitárias passando em um ponto fixo durante um certo período de tempo. Gokcal et al. (2009) afirma que o resultado deste experimento mostra que não há efeito significativo da pressão na frequência do escoamento e, quando os dados experimentais são comparados com a correlação de Gregory e Scott (1969), o resultado apresenta pouca concordância,

exceto para valores mais baixos de frequência. Apesar disto, a correlação proposta, desenvolvida modificando a correlação de Gregory e Scott (1969), mostrou melhor previsão quando comparada com dados experimentais para alta pressão.

A correlação Shell (ZABARAS et al., 1999; AL-SAFRAN, 2009) foi obtida a partir de um ajuste de curva para os dados experimentais de Heywood e Richardson (1979), utilizando cinco parâmetros adimensionais. Embora a correlação Shell não tenha dependência funcional com o ângulo de inclinação, ela mostrou uma boa concordância com dados de tubos inclinados adquiridos pela companhia "Shell" em um sistema de escoamento de ar-água num tubo de 101,6 mm de diâmetro.

Zabaras et al. (1999) modificaram a correlação proposta por Gregory e Scott (1969) para incluir o efeito da inclinação do tubo. Em comparação com correlações já existentes, esta foi a que apresentou os menores valores de desvio padrão e de desvio relativo médio, para o conjunto de dados experimentais utilizados pelos autores, considerando diâmetros de tubo variando de 25,4 mm a 203,2 mm e inclinações de 0° a 11° em relação à horizontal. 399 pontos foram coletados no total, sendo 205 coletados em laboratório, num circuito de escoamento inclinado utilizando uma mistura ar-água como fluido de teste em tubos de 25,4 mm e 101,6 mm, e 194 pontos de dados coletados da literatura publicada para diversas misturas de fluidos, como ar-querosene, ar-óleo, nitrogênio-diesel, ar-água e freon-água, em tubos de diâmetros variando de 50,8 mm a 203,2 mm. Os resultados obtidos mostraram que a maioria dos métodos existentes para previsão de frequência não apresentam resultados satisfatórios, tanto para tubos na horizontal quanto para tubos inclinados. A correlação proposta no estudo apresentou em torno de 0% de desvio sistemático médio e 60% de desvio relativo médio, que de acordo com os autores, significa uma melhora significativa na precisão para previsão de frequência no escoamento intermitente em relação aos outros métodos anteriormente desenvolvidos.

Sakaguchi et al. (2001) desenvolveram um modelo utilizando funções de regressão para o cálculo da frequência. O experimento foi realizado para escoamentos na vertical utilizando ar e algumas soluções a base de água em tubos de 8 mm a 50,8 mm, levando em consideração a influência do diâmetro da tubulação, das vazões das fases e das propriedades dos fluidos (RODRIGUES et al., 2007).

Buscando desenvolver uma correlação, Fossa, Guglielmini e Marchitto (2003) utilizaram uma mistura de ar e água como fluidos em uma seção de teste horizontal

de 12 m de comprimento, na qual medições de pressão e fração de gás podem ser obtidas. Os tubos utilizados no experimento possuíam 40 mm e 60 mm de diâmetro interno e os dados coletados a partir destes apresentam um resultado satisfatório contra dados da literatura de vários autores. Os autores sugeriram um novo método através de um algoritmo que consiste na análise estatística dos valores médios de fração de gás, na seção transversal, obtidos através de sondas de impedância do tipo anel para obtenção de informações das principais características no escoamento, como a frequência da célula unitária. O método pôde ser validado através da comparação entre os parâmetros calculados, através dos dados coletados para a fração de gás, e os dados medidos, através de imagens digitalizadas e procedimentos de correlação cruzada, apresentando um desvio máximo relativo de cerca de 15%.

Shea et al. (2004 apud AL-SAFRAN, 2009) desenvolveram uma correlação que foi obtida a partir de um ajuste de curva para dados de campo que depende fortemente da distância axial do misturador até a posição de medição. O estudo realizado pelos autores aponta uma satisfatória concordância entre dados medidos em laboratório e dados obtidos de campo.

Wang, Guo e Zhang (2007) realizaram um experimento em uma seção de teste horizontal de 133 m de comprimento, numa tubulação de 50 mm de diâmetro interno e utilizando uma mistura ar-água. A frequência da célula unitária, assim como outros parâmetros hidrodinâmicos, foi determinada ao longo do circuito de teste, para uma faixa variada de taxas de fluxo na entrada, utilizando dois pares de sondas de condutividade localizadas longe da entrada da tubulação. Através do experimento, eles perceberam que a frequência média aumenta à medida que a velocidade superficial do líquido aumenta, porém, não depende muito da velocidade superficial do gás. As correlações propostas por Wang, Guo e Zhang (2007) e Fossa, Guglielmini e Marchitto (2003) foram escritas na forma adimensional utilizando o número de Strouhal e, apesar de ambas terem sido desenvolvidas com base em experimentos utilizando seções de teste com comprimentos bem distintos, ambas apresentaram resultados satisfatórios.

Al-Safran (2009) analisou o mecanismo de formação das golfadas na região de entrada do tubo e o efeito do comprimento do tubo, sendo considerados como dois parâmetros governantes da frequência no escoamento em golfadas. Nesse experimento, foi utilizada uma mistura ar-óleo em uma instalação de teste de 420 m de comprimento e uma tubulação de 50,8 mm de diâmetro interno, dividida em três seções

de testes para medir as características do escoamento. As medições foram obtidas a partir de sensores de capacitância. Os resultados obtidos demonstram a importância dos parâmetros governantes analisados no desenvolvimento de um modelo para previsão da frequência. Em relação a dependência da frequência com o mecanismo de formação das golfadas, foi sugerido que a velocidade de deslizamento desempenha um papel importante no processo de formação da célula unitária e, portanto, na frequência ao longo da tubulação. O estudo apontou também que a frequência é aproximadamente constante ao longo da tubulação, com exceção em alguns sub-regimes, como em alta taxa de fluxo de líquido e baixa taxa de fluxo de gás ou baixa taxa de fluxo de líquido e alta taxa de fluxo de gás. O autor desenvolveu uma correlação linear em função de parâmetros geométricos, operacionais e mecanicistas, baseadas em uma revisão da literatura e nos dados desse experimento. As três variáveis independentes consideradas são: diâmetro da tubulação, velocidade do líquido e razão entre a velocidade relativa e a velocidade superficial da mistura. Um estudo para validação da correlação proposta contra dados de Roumazeilles et al. (1996), mostrou um desvio médio de 35% e um desvio padrão de 68%. O modelo ainda foi ajustado utilizando o intervalo de confiança estatística dos coeficientes, que melhorou os resultados de validação para 19% de desvio médio e 62% de desvio padrão.

Gokcal et al. (2009) desenvolveram um estudo em tubos horizontais para mostrar o efeito da viscosidade do líquido na frequência do escoamento intermitente. No experimento, uma mistura de ar e óleo mineral foi utilizada como fluido de teste, em diferentes temperaturas. A seção de teste possuía 18,9 m de comprimento total, sendo uma seção de 9,15 m com um tubo de acrílico transparente, que permite a observação visual do comportamento do escoamento, e outra seção de 9,75 m de tubo de aço, para trabalhar com pressões na entrada de até 100 psig, sendo ambos os tubos com 50,8 mm de diâmetro interno. Como a viscosidade do líquido depende fortemente da temperatura, um sistema de aquecimento e um sistema de resfriamento foram utilizados para garantir o controle preciso de temperatura, sendo ajustada no tanque de óleo para o valor desejado antes de cada teste. A frequência foi calculada através da contagem do número de células unitárias passando em sensores e dividindo-as pelo período de tempo de execução do teste. Quatro sensores a laser e dois sensores de capacitância foram usados na seção de teste em acrílico. Os valores obtidos em ambos os dispositivos foram comparados para garantir qualidade nos

resultados do experimento, que por sinal indicaram uma boa concordância nas medições dos sensores de capacitância e a laser, além da confirmação dos resultados através de observações visuais. Os resultados também mostraram que a frequência aumenta com o aumento da viscosidade do líquido, desta forma, concluiu-se que a frequência apresenta uma dependência com a viscosidade do líquido e, desse modo, foi correlacionada utilizando o número adimensional de viscosidade inversa.

Hernandez-Perez, Abdulkadir e Azzopardi (2010) propuseram uma correlação baseada em dados experimentais para escoamentos inclinados. No experimento conduzido, foi utilizado uma mistura ar-água escoando em um equipamento de teste inclinável de 6 m de comprimento e tubulações de 38 mm e 67 mm de diâmetro interno. Os dados foram coletados através de sensores de capacitância. Para determinar a frequência das estruturas periódicas foi aplicado uma metodologia baseada na PSD. A correlação proposta foi sugerida através da combinação linear das frequências na horizontal e na vertical, ponderada por relações trigonométricas. A frequência para escoamentos na vertical foi obtida a partir de uma modificação dos coeficientes na correlação proposta por Gregory e Scott (1969) e a frequência para escoamentos na horizontal foi adotada com sendo a correlação original proposta por Gregory e Scott (1969), de acordo com a sugestão dos autores. Os dados experimentais e a nova correlação proposta apresentam uma boa concordância quando comparadas entre si. O experimento mostrou que ao aumentar o diâmetro do tubo, a frequência atinge seu valor máximo em um ângulo de maior inclinação, no caso do tubo de 38 mm a frequência tem seu valor máximo em 60° e para o tubo de 67 mm no ângulo de 90° . Além disso, o estudo aponta também que a frequência depende da fração de líquido ao invés da velocidade superficial do líquido.

Schulkes et al. (2011) utilizaram dados publicados na literatura e uma série de conjuntos de dados internos da empresa "Statoil", ambos para as mais variadas condições experimentais, com o objetivo de propor uma correlação unificada que abrangesse todos os dados disponíveis. Um conjunto de 1200 pontos de dados para diversos fluidos foi utilizado para diâmetros variando de 19 mm a 100 mm, viscosidade variando de 1 cP a 589 cP, pressão variando de 1 bar a 50 bar e inclinações variando de 1° a 80° . Na metodologia adotada e com base na intuição física, foi definido que a frequência é função de oito parâmetros, dentre eles, a velocidade superficial do líquido, a velocidade superficial do gás, a aceleração da gravidade, o diâmetro do

tubo, a viscosidade do líquido, a massa específica do líquido, a massa específica do gás e o ângulo de inclinação. A viscosidade do gás não está inserida na lista de parâmetros, pois se apresenta aproximadamente constante para diferentes gases e em diferentes condições de pressão. Estes oito parâmetros apresentam as três dimensões primárias: massa, comprimento e tempo. Com base nas pesquisas e observações experimentais de outros autores como Greskovich e Shrier (1972), Heywood e Richardson (1979), Manolis, Mendes-Tassis e Hewitt (1995) e Gokcal et al. (2009), bem como em suas próprias observações, Schulkes et al. (2011) definiram cinco parâmetros adimensionais para correlacionar a frequência: a fração de líquido na entrada, o ângulo de inclinação do tubo, a razão de massas específicas, o número de Froude e o número de Reynolds. Após avaliar a influência dos efeitos físicos na frequência, a pressão (analisada através da razão de massas específicas) foi o único que apresentou pouca influência, sendo desconsiderado na forma final da equação sugerida, que por sua vez apresenta bons resultados tanto para escoamentos na horizontal, com fluidos de baixa e alta viscosidade, quanto para escoamentos inclinados ascendentes, com fluidos de baixa viscosidade. Para o caso de escoamentos inclinados com alta viscosidade, a correlação foi dada como incerta pelos autores.

Utilizando uma mistura de ar e óleo, Zhao, Yeung e Lao (2013) realizaram um estudo para verificar o efeito da viscosidade na frequência do escoamento intermitente. O experimento foi conduzido em duas seções de testes horizontais, uma com 5,5 m de comprimento e tubulação de 26 mm de diâmetro interno, para viscosidades de 3,5 Pa.s e 7,5 Pa.s, e outra seção de 17 m de comprimento e tubulação de 74 mm de diâmetro, para viscosidades 1,0 Pa.s, 3,5 Pa.s e 6,0 Pa.s. Os dados de frequência foram obtidos por meio de processamento de dados da fração de líquido em sensores de Tomografia de Capacitância Elétrica, do inglês *Electrical Capacitance Tomography* (ECT). Os resultados mostraram que à medida que a viscosidade aumenta, a frequência também aumenta e que esta depende da viscosidade do líquido, da taxa do fluxo de líquido e do diâmetro do tubo. Maiores valores de frequência são obtidos quando se tem maiores valores de viscosidade e de velocidade superficial do líquido e menores valores de diâmetro de tubo. A correlação proposta foi obtida a partir de uma modificação na correlação de Schulkes et al. (2011) e fornece bons resultados para fluxo de gás turbulento em um fluxo de líquido laminar. Por outro lado, a correlação de Schulkes et al. (2011) diverge para casos de fluxo de gás turbulento.

Al-Safran (2016) propôs uma correlação utilizando o modelo probabilístico de Poisson para o cálculo da frequência. O modelo necessita do valor da frequência média como dado de entrada, dessa forma, uma função de regressão linear múltipla foi desenvolvida com base em 473 pontos de dados coletados da literatura para diversas condições geométricas, operacionais e de propriedades físicas dos fluidos. Esta frequência média foi correlacionada com o diâmetro, a velocidade superficial do líquido e o fator de deslizamento, sendo esse último a razão entre a velocidade do gás e a velocidade do líquido. Segundo o autor, qualquer outra correlação já desenvolvida poderia ser utilizada pra calcular a frequência média. A partir de um banco de dados adquiridos em um experimento por Woods, Fan e Hanratty (2006), Al-Safran (2016) validou seu modelo e ajustou a correlação utilizando intervalos de confiança de 95%, cujo desvio foi reduzido de uma faixa 40% a 50% para 15%, para as velocidades superficiais do líquido de 1,2 m/s e 0,4 m/s, respectivamente. O autor constatou que a frequência diminui à medida que a velocidade superficial do gás aumenta e a correlação apresenta maior precisão em previsões de frequências quando se têm altas ou baixas velocidades superficiais do gás, ao invés de velocidades intermediárias.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia para realização do trabalho proposto. Inicialmente, apresenta-se uma breve descrição do escoamento intermitente e suas variáveis, em seguida, as definições das correlações para o cálculo da frequência do escoamento intermitente, bem como do método de análise destas correlações, e por fim, uma descrição dos dados experimentais utilizados neste trabalho.

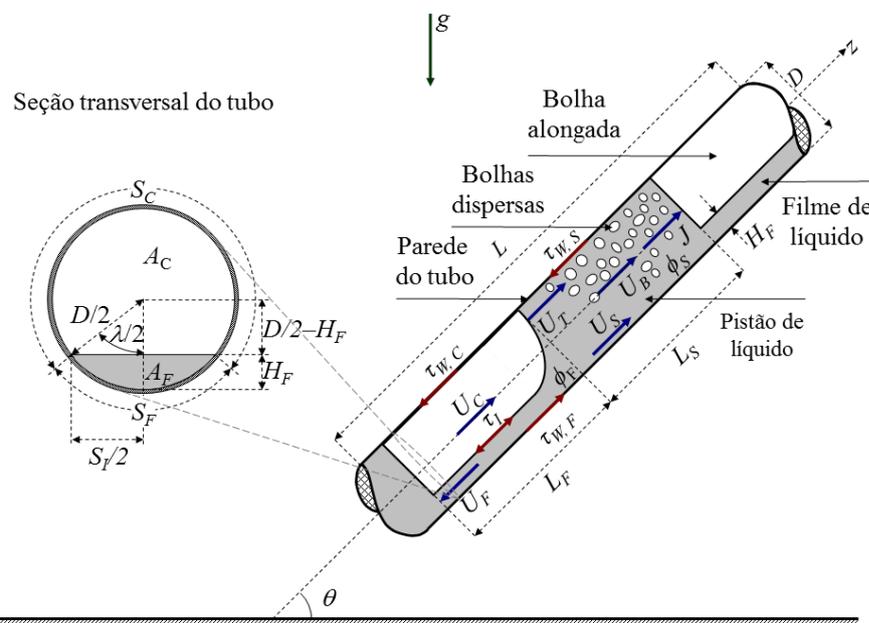
3.1 ESCOAMENTO INTERMITENTE E SUAS VARIÁVEIS

O escoamento intermitente é caracterizado pela alternância de uma região de escoamento disperso (pistão de líquido aerado) seguida por uma região de escoamento separado (bolha alongada de gás e filme de líquido), sendo este conjunto denominado de célula unitária (WALLIS, 1969), que interagem cinematicamente e dinamicamente ao longo do escoamento na tubulação. A região de pistão de líquido apresenta grande quantidade de líquido com pequenas bolhas de gás dispersas e representa uma barreira entre duas bolhas alongadas de gás adjacentes (RODRIGUES, 2009). O escoamento intermitente pode ser classificado em dois subpadrões: golfadas e golfadas instáveis. O subpadrão denominado golfadas instáveis é idêntico ao golfadas quando se tem um aumento da vazão de gás, causando instabilidades na forma da bolha alongada e uma redução do comprimento da região constituída pelo pistão de líquido. Em escoamentos horizontais e inclinados, o gás contido na bolha alongada escoar junto à parede superior do tubo ocupando a maior parte da seção transversal, enquanto que, para escoamentos verticais, a bolha alongada de gás fica concêntrica ao tubo e isolada da parede pelo filme de líquido.

A análise do escoamento é geralmente feita utilizando-se o conceito de célula unitária definido por Wallis (1969). A Figura 4 apresenta uma representação esquemática do escoamento em golfadas em uma tubulação de comprimento L , diâmetro D e inclinação θ . A região de pistão de líquido, com velocidade J e comprimento L_S , exerce uma tensão de cisalhamento na parede $\tau_{W,S}$ e as bolhas de gás dispersas neste pistão apresentam velocidade U_B . A fração de líquido no pistão é representada por ϕ_S e a velocidade do líquido no pistão corresponde a U_S . Na região da bolha alongada, o

filme de líquido de fração ϕ_F possui um comprimento L_F , uma espessura H_F e uma velocidade U_F . O gás contido na bolha alongada, de velocidade U_T , apresenta velocidade U_C , exercendo uma tensão de cisalhamento $\tau_{W,C}$ na parede do tubo, de forma semelhante, o filme de líquido exerce uma tensão de cisalhamento $\tau_{W,F}$. A tensão de cisalhamento interfacial é representada por τ_I . No detalhe da seção transversal do tubo, têm-se os perímetros molhados pelo gás na bolha alongada S_C e pelo filme de líquido S_F , bem como o perímetro interfacial S_I . As áreas ocupadas pelo gás e pelo líquido estão representadas por A_C e A_F , respectivamente.

Figura 4 – Representação esquemática da célula unitária no escoamento intermitente e suas variáveis



Fonte: Adaptado de Lima (2011)

A frequência f com que ocorre a célula unitária é definida como a razão entre a velocidade da bolha alongada U_T pelo comprimento da célula unitária $L_F + L_S$, de acordo com Equação (1):

$$f = \frac{U_T}{L_F + L_S} \quad (1)$$

O fator de intermitência β é definido como uma fração de tempos ou de comprimentos referentes às regiões que constituem a célula unitária. Segundo Bueno (2010), a intermitência não é periódica nem no tempo nem no espaço, dessa forma, o fator de intermitência mensura, em termos médios, a variação da ocorrência do pistão de líquido e da bolha alongada. O fator de intermitência β é expresso em termos dos

comprimentos da bolha alongada (ou de filme de líquido) L_F e do pistão de líquido L_S de acordo com a Equação (2):

$$\beta = \frac{L_F}{L_F + L_S} \quad (2)$$

A Equação (2) pode ser reescrita em termos da frequência da célula unitária f e da velocidade da bolha alongada U_T , combinando a Equação (1) com a Equação (2), de acordo com Equação (3):

$$\beta = \frac{L_F}{U_T/f} \quad (3)$$

3.2 CORRELAÇÕES PARA ESTIMATIVA DA FREQUÊNCIA

Existem vários modelos disponíveis na literatura para estimativa da frequência em função de parâmetros conhecidos. A maioria deles, além de serem desenvolvidos para escoamentos horizontais, são baseados em medições experimentais e apresentam resultados satisfatórios somente para condições semelhantes às utilizadas no experimento. As correlações podem ser simples, propostas em função das velocidades superficiais de gás e líquido, considerando as configurações geométricas e as propriedades dos fluidos, ou mais complexas, considerando o processo de formação de pistões a partir da transição do escoamento estratificado para escoamento em golfadas. A Tabela 1 apresenta as principais características e condições nas quais foram desenvolvidos os modelos de frequência analisados neste trabalho.

Tabela 1 – Informações a respeito dos modelos de frequência analisados neste trabalho

Correlação	Autor	D / [mm]	θ / [°]	Fluidos
C1	Gregory e Scott (1969)	19	0	CO ₂ -água
C2	Heywood e Richardson (1979)	42	0	ar-água
C3	Jepson e Taylor (1993)	300	0	ar-água
C4	Nydal (1991)	31–90	0	ar-água
C5	Manolis, Mendes-Tatsis e Hewitt (1995)	78	0	ar-água
C6	Zabaras et al. (1999)	25,4–203,2	0–11	diversos
C7	Correlação Shell (ZABARAS et al., 1999)	42	0	ar-água
C8	Sakaguchi et al. (2001)	8–50,8	90	diversos
C9	Fossa, Guglielmini e Marchitto (2003)	40 e 60	0	ar-água
C10	Shea et al. (2004)	-	-	-
C11	Wang, Guo e Zhang (2007)	50	0	ar-água
C12	Gokcal et al. (2009)	50,8	0	ar-óleo
C13	Hernandez-Perez, Abdulkadir e Azzopardi (2010)	38 e 67	0–90	ar-água
C14	Schulkes et al. (2011)	19–100	1–80	diversos
C15	Zhao, Yeung e Lao (2013)	26 e 74	0	ar-óleo
C16	Al-Safran (2016)	25–203	0	diversos

Fonte: A autoria própria

A Tabela 2 apresenta as definições das correlações para a estimativa da frequência, bem como as faixas de velocidades superficiais de gás e de líquido para algumas correlações. Os subíndices G e L são utilizados para representar as fases gasosa e líquida, respectivamente. A ausência de subíndice diz respeito a mistura.

Tabela 2 – Definições das correlações para a estimativa da frequência

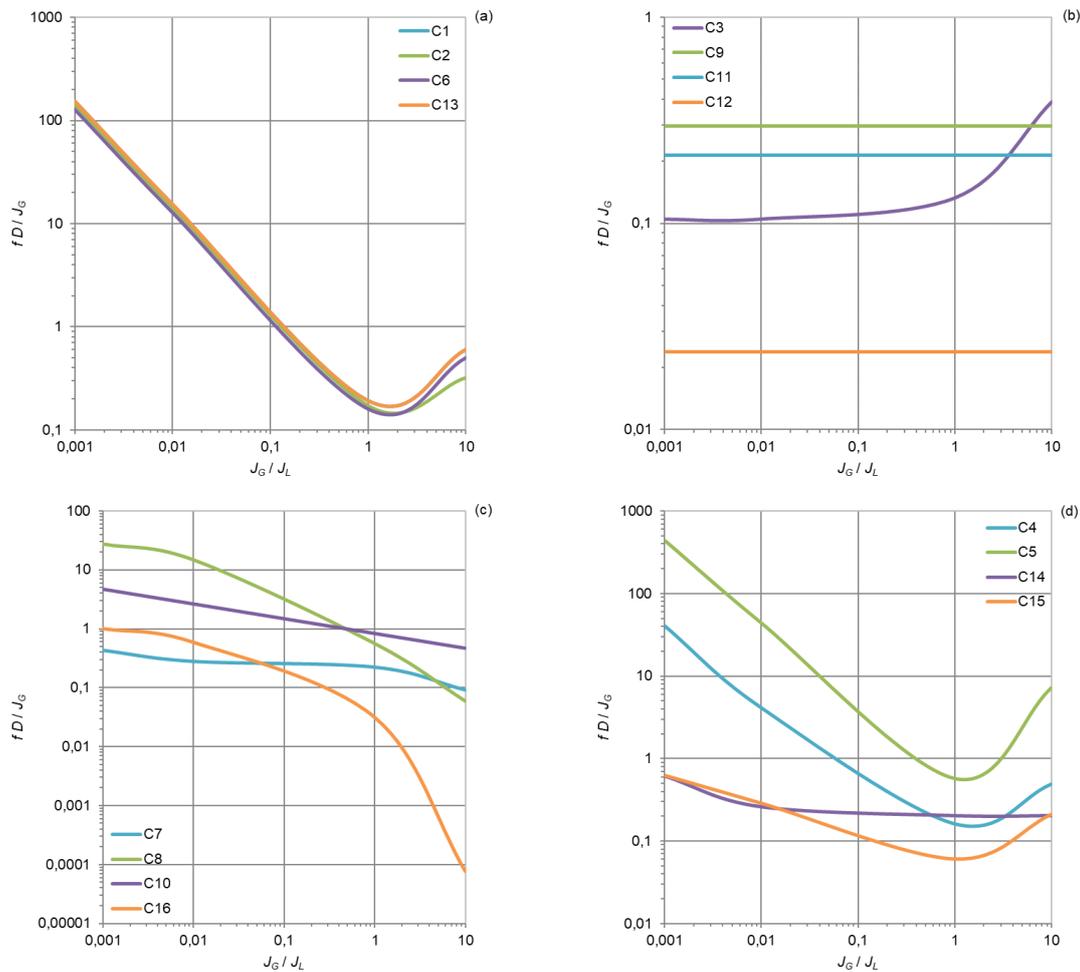
Correlação	f / [Hz]	J_G / [m/s]	J_L / [m/s]
C1	$0,0226 \left[\lambda_L \left(\frac{19,75}{gD} + Fr^2 \right) \right]^{6/5}$	-	-
C2	$0,0434 \left[\lambda_L \left(\frac{2,02}{D} + Fr^2 \right) \right]^{1,02}$	0,2–6,0	0,25–4,3
C3	$\lambda_L \left(\frac{4,76 \times 10^{-3} J^2 + 0,035 J}{D} \right)$	0,1–30,0	0,01–3,0
C4	$0,088 \left[Fr \left(\frac{1,5}{J} + \lambda_L \right) \right]^2$	-	-
C5	$0,0037 \left[\lambda_L \left(\frac{25}{gD} + Fr^2 \right) \right]^{9/5}$	-	-
C6	$0,0226 \left[\lambda_L \left(\frac{19,75}{gD} + Fr^2 \right) \right]^{6/5} \left[0,836 + 2,75 \text{sen}^{1/4}(\theta) \right]$	-	-
C7	$\sqrt{\frac{g}{D}} \left\{ Fr_{min} + 0,73 Fr_L^{2,34} \left[(Fr_G + Fr_L)^{0,1} - 1,17 Fr_L^{0,064} \right]^2 \right\}$	-	-
C8	$\left[16100 \frac{D}{J} \left(\frac{\lambda_G^{1,38}}{\lambda_L^{0,166}} \right) \left(\frac{\Pi_\rho^{3,04} \Pi_\mu^{0,333} Re^{1,61}}{Fr^{0,317} We^{0,564}} \right) + 0,087 \right]^{-1}$	0,026–3,42	0,039–1,5
C9	$\frac{J_G}{D} \left(\frac{0,044 \lambda_L}{1 - 1,71 \lambda_L + 0,70 \lambda_L^2} \right)$	0,3–4,0	0,6–3,0
C10	$0,47 \left(\frac{J_L^{3/4}}{D^{6/5} L_i^{0,55}} \right)$	-	-
C11	$\frac{J_G}{D} \left(\frac{0,05 \lambda_L}{1 - 1,675 \lambda_L + 0,768 \lambda_L^2} \right)$	1,0–20,0	0,16–1,5
C12	$2,816 \frac{J_L}{D} N_v^{-0,612}$	-	-
C13	$f_h \cos \theta + f_v \text{sen} \theta$	-	-
C14	$\frac{J}{D} [\Psi(\lambda_L) \Phi(Re_L) \Theta(\theta, Fr_L)]$	-	-
C15	$\frac{J}{D} [\Psi(\lambda_L) \Phi(Re_L, Re_G)]$	0,3–9,0	0,06–0,2
C16	$\exp(1,51 - 17,04 D + 0,77 \ln J_L - 0,181 \ln \bar{S})$	0,06–16,5	0,03–2,89

Fonte: Autoria própria

O Gráfico 1 mostra o comportamento dos perfis em termos do número de Strouhal ($St \equiv fD/J_G$) das correlações para o cálculo da frequência da célula unitária, definidas na Tabela 2, em função da razão de velocidades superficiais de gás e de líquido, J_G/J_L , para uma inclinação $\theta = 0^\circ$, uma vez que a maioria delas é aplicável em escoamentos horizontais. No Gráfico 1a, as correlações C1 e C13 são idênticas para $\theta = 0^\circ$ e mostram o mesmo tipo de comportamento apresentado pelas correlações C2 e C6, nas quais é possível observar que a frequência diminui significativamente à medida que a razão gás/líquido aumenta e, em seguida, tende a aumentar para um valor

limite de razão gás/líquido, que pode estar relacionado com as transições de padrão. Os valores de frequência obtidos pelas correlações C9, C11 e C12 no Gráfico 1b se mostram aproximadamente constantes para qualquer valor da razão J_G/J_L , enquanto que a correlação C3 apresenta um crescimento um pouco mais pronunciado com o aumento gradativo da razão gás-líquido, sendo que este crescimento torna-se mais significativo para maiores valores de razão gás-líquido. No Gráfico 1c, todas as correlações mostram uma dependência da frequência com a razão J_G/J_L , de tal forma que o aumento na razão gás-líquido reduz os valores de frequência, conforme observado nas demais correlações. No Gráfico 1d, a correlação C14 apresenta pouca dependência com a razão gás-líquido, principalmente para valores mais altos da razão J_G/J_L , enquanto que as correlações C4, C5 e C15 mostram que há uma relação da frequência com J_G/J_L , ocorrendo uma diminuição da frequência significativamente até um determinado valor de J_G/J_L e um aumento a partir deste valor.

Gráfico 1 – Tendências e comportamentos das correlações de frequência para inclinação de 0°



Fonte: Autoria própria

3.2.1 Parâmetros Envolvidos nas Correlações de Frequência

Na sequência são apresentados os diversos parâmetros envolvidos nas correlações de frequência, apresentadas na Tabela 2. O subíndice k é utilizado para representar uma fase, sendo G para gás e L para líquido.

Velocidade superficial da fase J_k – Representa a velocidade que uma fase teria se escoasse sozinha na tubulação. É definida como a razão entre a vazão volumétrica da fase Q_k e a área A da seção transversal da tubo:

$$J_k = \frac{Q_k}{A} \quad (4)$$

Velocidade superficial da mistura J – Corresponde a velocidade do centro de volume da mistura e definida como a soma das velocidades superficiais das fases:

$$J = J_L + J_G \quad (5)$$

Fração homogênea da fase λ_k – Representa a razão entre o volume ocupado por uma fase e o volume da mistura, considerando que as fases tem a mesma velocidade, podendo ainda ser determinada pela razão entre a velocidade superficial da fase e a velocidade superficial da mistura:

$$\lambda_k = \frac{J_k}{J} \quad (6)$$

Número de Froude da mistura Fr – Número adimensional que representa a razão entre as forças de inércia e gravitacionais. É definido em termos da velocidade superficial da mistura, do diâmetro do tubo e da aceleração da gravidade g :

$$Fr = \frac{J}{\sqrt{gD}} \quad (7)$$

Número de Froude da fase Fr_k – É definido em termos da velocidade superficial da fase, do diâmetro do tubo e da aceleração da gravidade:

$$Fr_k = \frac{J_k}{\sqrt{gD}} \quad (8)$$

Número de Reynolds da mistura Re – Representa a razão entre as forças de inércia e viscosas. É definido em termos da velocidade superficial da mistura, da massa específica ρ_L e da viscosidade dinâmica μ_L do líquido e do diâmetro do tubo:

$$Re = \frac{J D \rho_L}{\mu_L} \quad (9)$$

Número de Reynolds da fase Re_k – É definido em termos da velocidade superficial, da massa específica e da viscosidade dinâmica da fase e do diâmetro do tubo:

$$Re_k = \frac{J_k D \rho_k}{\mu_k} \quad (10)$$

Número de Froude mínimo Fr_{min} – É definido na correlação C7 pelo autor como um valor limite do número de Froude do líquido para o ajuste da correlação:

$$Fr_{min} = 0,048 Fr_L^{0,81} \quad (11)$$

Razão de massas específicas Π_ρ – É definido na correlação C8 como a razão entre as massas específicas do gás e do líquido:

$$\Pi_\rho = \frac{\rho_G}{\rho_L} \quad (12)$$

Razão de viscosidades dinâmicas Π_μ – Na correlação C8, corresponde a razão entre as viscosidades dinâmicas do gás e do líquido:

$$\Pi_\mu = \frac{\mu_G}{\mu_L} \quad (13)$$

Número de Weber da mistura We – É definido como a razão entre as forças de inércia e de tensão superficial. É definida em termos da velocidade superficial da mistura, diâmetro do tubo, da massa específica do líquido e da tensão superficial gás-líquido σ :

$$We = \frac{J^2 D \rho_L}{\sigma} \quad (14)$$

Número adimensional de viscosidade inversa N_ν – Na correlação C12, o número adimensional de viscosidade inversa relaciona o efeito das forças de empuxo e viscosas, sendo definido como:

$$N_\nu = \frac{\sqrt{g D^3 (1 - \rho_G / \rho_L)}}{\nu_L} \quad (15)$$

Frequência horizontal f_h – Na correlação C13, a frequência na horizontal é definida pela correlação proposta por Gregory e Scott (1969):

$$f_h = 0,0226 \left[\lambda_L \left(\frac{19,75}{g D} + Fr^2 \right) \right]^{6/5} \quad (16)$$

Frequência vertical f_v – Na correlação C13, o autor realizou um ajuste nos coeficientes da correlação de Gregory e Scott (1969), para a frequência na vertical:

$$f_v = 0,8428 \left[\lambda_L \left(\frac{19,75}{g D} + Fr^2 \right) \right]^{1/4} \quad (17)$$

Função adimensional da fração homogênea $\Psi(\lambda_L)$ – Nas correlações C14 e C15, esta função adimensional é definida em termos da fração homogênea de líquido:

$$\Psi(\lambda_L) = 0,016 \lambda_L(2 + 3 \lambda_L) \quad (18)$$

Função adimensional do número de Reynolds do líquido $\Phi(\text{Re}_L)$ – Na correlação C14, para valores do Número de Reynolds do líquido menores que 4000, esta função representa um ajuste do Número de Reynolds do líquido, enquanto que para valores maiores ou igual a 4000, esta função apresenta um valor unitário:

$$\Phi(\text{Re}_L) = \begin{cases} 12,1 \text{Re}_L^{-0,37} & \text{se } \text{Re}_L < 4000 \\ 1 & \text{se } \text{Re}_L \geq 4000 \end{cases} \quad (19)$$

Função adimensional da inclinação e do número de Froude do líquido $\Theta(\theta, \text{Fr}_L)$ – Na correlação C14, a forma desta função adimensional depende do ângulo de inclinação da tubulação e do número de Froude do líquido:

$$\Theta(\theta, \text{Fr}_L) = \begin{cases} 1 + 2 \left(\frac{\text{sgn}(\theta) \sqrt{|\theta| \cos \theta}}{\text{Fr}_L} \right) & \text{se } |\theta| \leq 0,17 \text{ rad} \\ 1,8 \left(\frac{0,6 + 2\theta - \theta^2}{\text{Fr}_L} \right) \sqrt{\cos \theta} & \text{se } \theta > 0,17 \text{ rad} \end{cases} \quad (20)$$

Na Equação (20), $\text{sgn}(\theta)$ é a função sinal do ângulo de inclinação do tubo, definida como:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} -1 & \text{se } \theta < 0 \text{ rad} \\ 0 & \text{se } \theta = 0 \text{ rad} \\ 1 & \text{se } \theta > 0 \text{ rad} \end{cases} \quad (21)$$

Função adimensional dos números de Reynolds das fases $\Phi(\text{Re}_L, \text{Re}_G)$ – A correlação C15 apresenta duas condições para esta função adimensional, porém ambas são validas somente para o fluxo de líquido laminar ($\text{Re}_L < 4000$):

$$\Phi(\text{Re}_L, \text{Re}_G) = \begin{cases} 10,836 \text{Re}_L^{-0,337} & \text{se } \text{Re}_G \leq 4000 \\ 6,40 \text{Re}_L^{-0,141} & \text{se } \text{Re}_G > 4000 \end{cases} \quad (22)$$

Fator de deslizamento \bar{S} – Na correlação C16, o fator de deslizamento é definido com a razão entre a velocidade do gás e a velocidade do líquido, podendo ser calculado a partir da viscosidade dinâmica do líquido local e seu valor referência, $\mu_{L,0} = 1 \text{ Pa.s}$, e das velocidades superficiais de gás e líquido:

$$\bar{S} = 1 + 1,95 \left(\frac{\mu_L}{\mu_{L,0}} \right)^{0,01} \left(\frac{J_G}{J_L} \right)^{3/2} \quad (23)$$

3.3 MÉTODO DE ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES DE FREQUÊNCIA

A análise da precisão das correlações, apresentadas na Tabela 2, baseia-se na determinação do valor médio do módulo do desvio relativo ϵ_R entre os valores calculado e medido para a frequência, f , e na determinação da Raiz do Valor Quadrático Médio, do inglês *Root Mean Square* (RMS), dos desvios relativos referentes aos N pontos experimentais, cujas definições são dadas de acordo com a Equação (24) e a Equação (25), respectivamente:

$$\epsilon_R = \frac{1}{N} \sum \frac{|f_{calculada} - f_{medida}|}{f_{medida}} \quad (24)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \epsilon_R^2} \quad (25)$$

Para a realização dos cálculos, tanto das correlações e suas variáveis auxiliares quanto dos valores médios do módulo do desvio relativo e RMS, foi utilizado uma planilha eletrônica desenvolvida no programa ©Microsoft Excel 2016.

3.4 DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS

Os dados utilizados neste trabalho, para comparações das correlações apresentadas na Tabela 2, foram extraídos do trabalho desenvolvido por Bueno (2010), que realizou seus experimentos utilizando ar e água como mistura em uma seção de testes de 306 diâmetros de extensão e 26 mm de diâmetro interno. Os dados foram obtidos para ângulos de inclinação de 0° a 90° , variando a cada 15° . O aparato experimental consiste basicamente no escoamento em dois circuitos separados de ar e água que são levadas até um misturador para formar o escoamento bifásico, que na sequência passa pela seção de testes de acrílico, onde foram realizadas as medições em duas estações diferentes, uma a $77D$ e outra a $257D$, a jusante do misturador. Nestas estações, o escoamento intermitente é monitorado através de sensores de impedância conectados a um sistema de aquisição de dados, que são utilizados para obter os valores frequência. Após percorrer a seção de testes, a mistura é descarregada em um tubo vertical de 75 mm de diâmetro que atua como um separador de água e ar. A Tabela 3 apresenta os intervalos das variáveis determinadas para cada inclinação em que foram realizados os experimentos do Bueno (2010).

Tabela 3 – Intervalos das variáveis determinadas experimentalmente por Bueno (2010)

θ / [°]	J_G / [cm/s]	J_L / [cm/s]	P / [mbar]	f / [Hz]	N
0	30,2–185,9	29,0–121,0	982–1058	0,46–3,88	10
15	29,8–203,6	31,0–121,0	946–985	0,94–4,78	10
30	30,6–191,7	31,0–122,0	978–1038	1,25–6,28	10
45	26,5–186,9	32,0–122,0	982–1042	1,41–4,75	10
60	25,0–181,8	27,0–121,0	1000–1078	1,52–4,52	10
75	26,8–189,5	29,3–121,0	975–1053	1,37–4,24	10
90	19,3–202,1	30,0–125,0	1018–1193	1,13–4,71	22

Fonte: Autoria própria

Para o cálculo da frequência é necessário o conhecimento das características geométricas da tubulação na qual está escoando a mistura bifásica, bem como as propriedades dos fluidos que são determinadas em função da temperatura e da pressão em que foram realizados os experimentos. Bueno (2010) realizou seus experimentos à pressão atmosférica $P_{atm} = 947$ mbar e numa temperatura ambiente $T = 25$ °C, tal que as propriedades dos fluidos são obtidas a partir do Fox, McDonald e Pritchard (2006, Tabela A8, p. 719), para esta condição operacional. A massa específica do ar é estimada a partir da equação de estado dos gases ideais, considerando $T = 25$ °C e a pressão absoluta local para cada um dos testes experimentais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentada a análise dos resultados obtidos a partir dos cálculos das correlações para a frequência e sua comparação contra os dados de frequência obtidos experimentalmente (BUENO, 2010). Para melhor compreensão desta análise de resultados, inicialmente são apresentados os resultados de forma gráfica para cada ângulo de inclinação da tubulação e, na sequência, são apresentados os resultados em termos dos módulos dos desvios relativos e do RMS calculados, na forma de tabelas de dados.

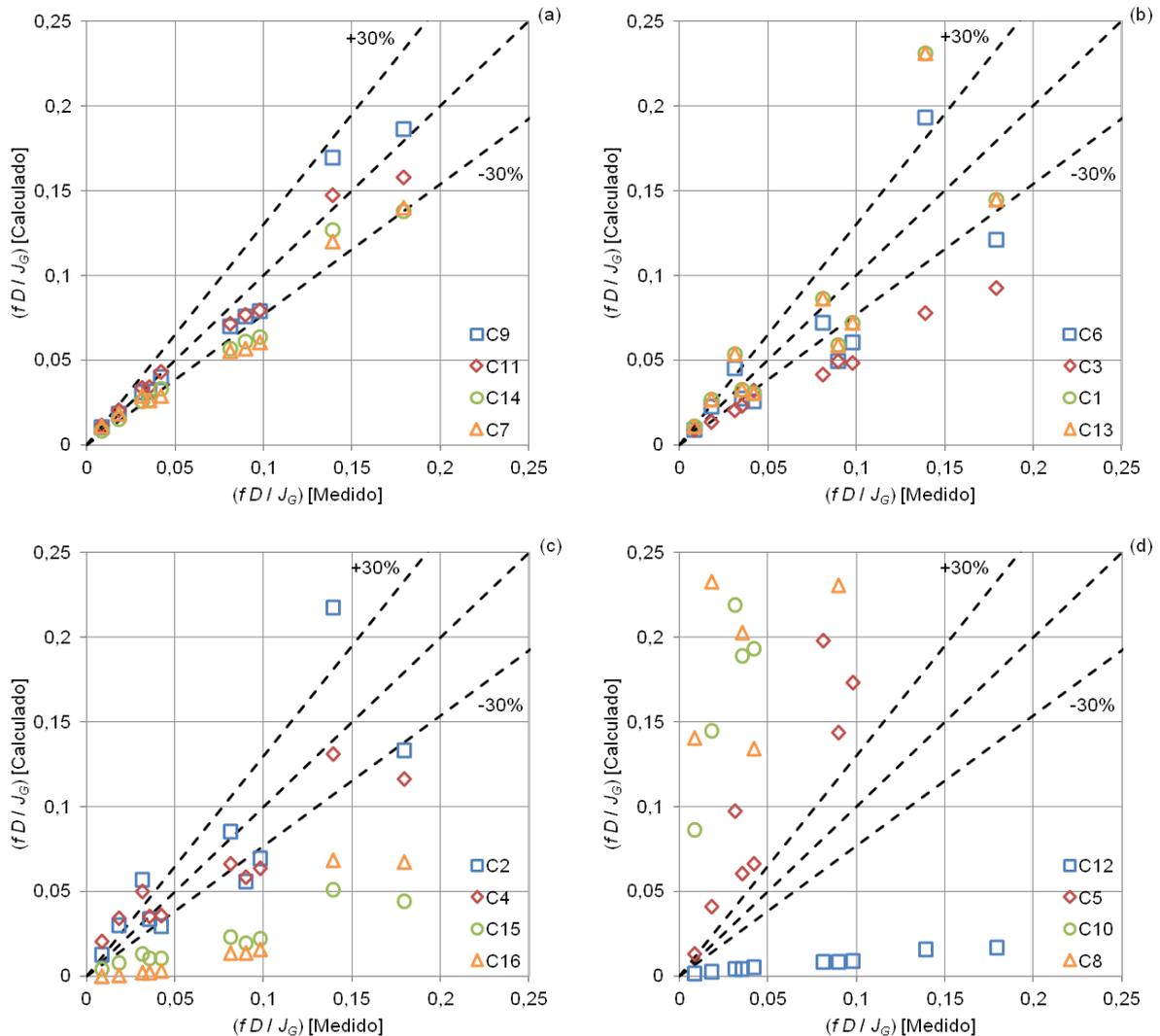
4.1 ANÁLISE A PARTIR DOS GRÁFICOS

Os gráficos são apresentados em termos do número de Strouhal ($St \equiv fD/J_G$) para os valores de frequência calculados e medidos. O eixo das abcissas representa a frequência medida e o eixo das ordenadas representa a frequência calculada. Para cada inclinação da tubulação, foram gerados quatro gráficos, sendo que cada um destes apresenta um conjunto de quatro correlações que melhor se aproximam em termos dos resultados de RMS. Foram estabelecidas nos gráficos faixas de -30% e +30%, consideradas como sendo limites satisfatórios para os desvios analisados.

De acordo com o Gráfico 2, para escoamentos na horizontal ($\theta = 0^\circ$) as correlações que apresentaram melhores resultados foram C9, C11, C14 e C7, conforme Gráfico 2a. Essas correlações foram desenvolvidas a partir de escoamentos ar-água na horizontal e cada autor utilizou valores distintos de diâmetro para obtê-las, exceto a correlação C14, que foi desenvolvida a partir de vários conjuntos de dados em várias inclinações, fluidos e diâmetros. As correlações que apresentaram resultados menos satisfatórios são C12, C5, C10 e C8, conforme Gráfico 2d. Dessas correlações, apenas a C8 foi desenvolvida para escoamentos inclinados.

Para escoamentos com inclinação $\theta = 15^\circ$, as correlações C11, C9, C2, C1, C4, C13, mostradas nos Gráficos 3a e 3b, apresentam resultados satisfatórios. Dentre estas, apenas a C13 é desenvolvida para escoamentos inclinados. No Gráfico 3d, as correlações que apresentaram resultados menos satisfatórios foram C5, C6, C10 e C8, sendo a C6 e C8 estudadas para escoamentos com inclinação.

Gráfico 2 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-água num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 0°

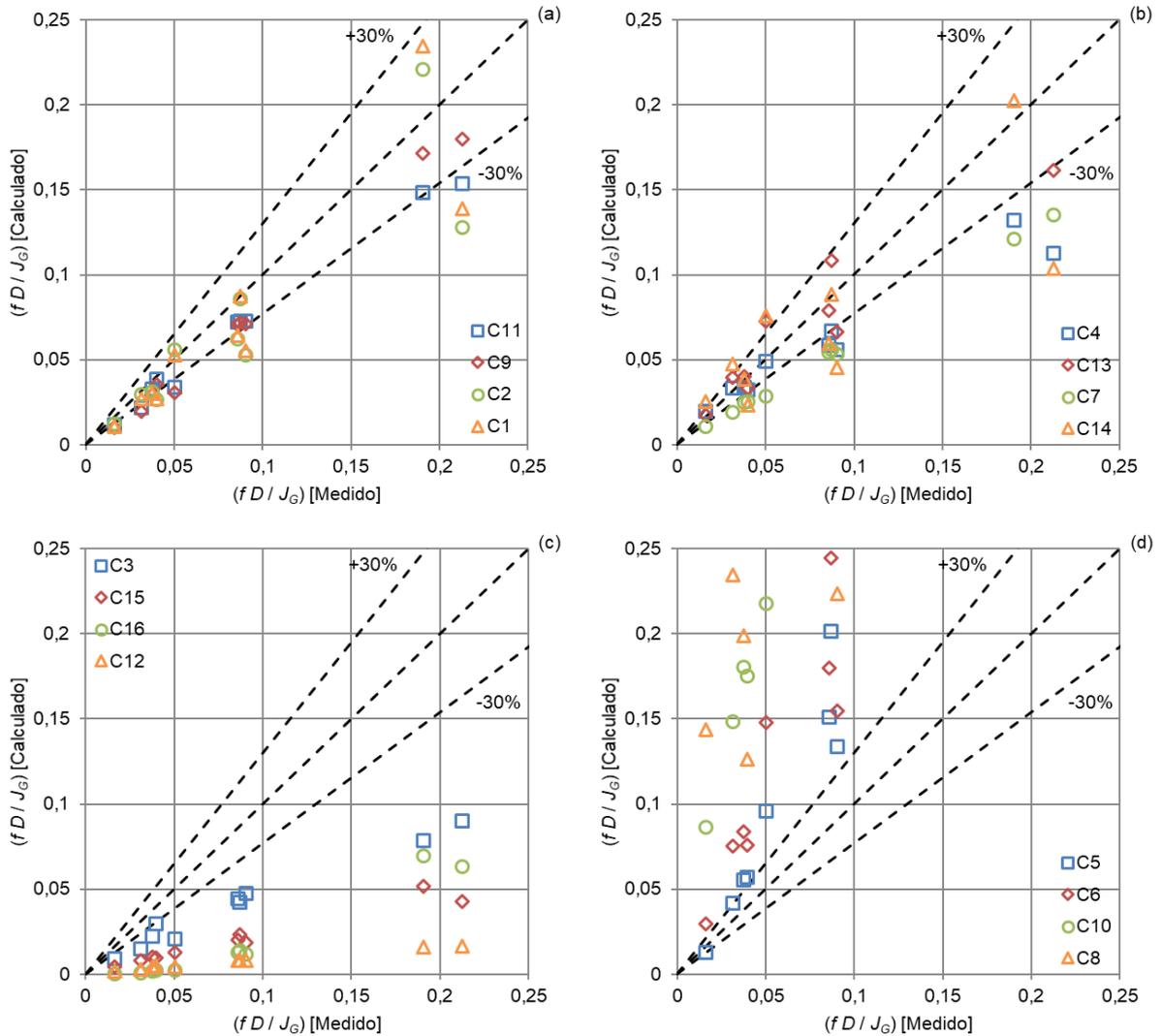


Fonte: Autoria própria

De acordo com o Gráfico 4, as correlações C4, C2, C11 e C1 apresentaram resultados aceitáveis e todas são para escoamentos na horizontal. O melhor resultado apresentado foi da correlação C4, que foi desenvolvida para escoamentos horizontais em vários diâmetros. Os resultados menos satisfatórios encontram-se nas correlações C5, C6, C10 e C8, sendo que a C8 foi desenvolvida para escoamentos inclinados, apresentando desvios bastante significativos.

No Gráfico 5, são apresentados os resultados para a inclinação $\theta = 45^\circ$. No Gráfico 5a, observa-se que as duas melhores correlações são C13 e C14, que apresentam dependência funcional com ângulo de inclinação. Mais uma vez, as correlações que apresentaram maiores desvios foram C5, C6, C10 e C8, sendo que C6 e C8 são aplicáveis a tubulações inclinadas.

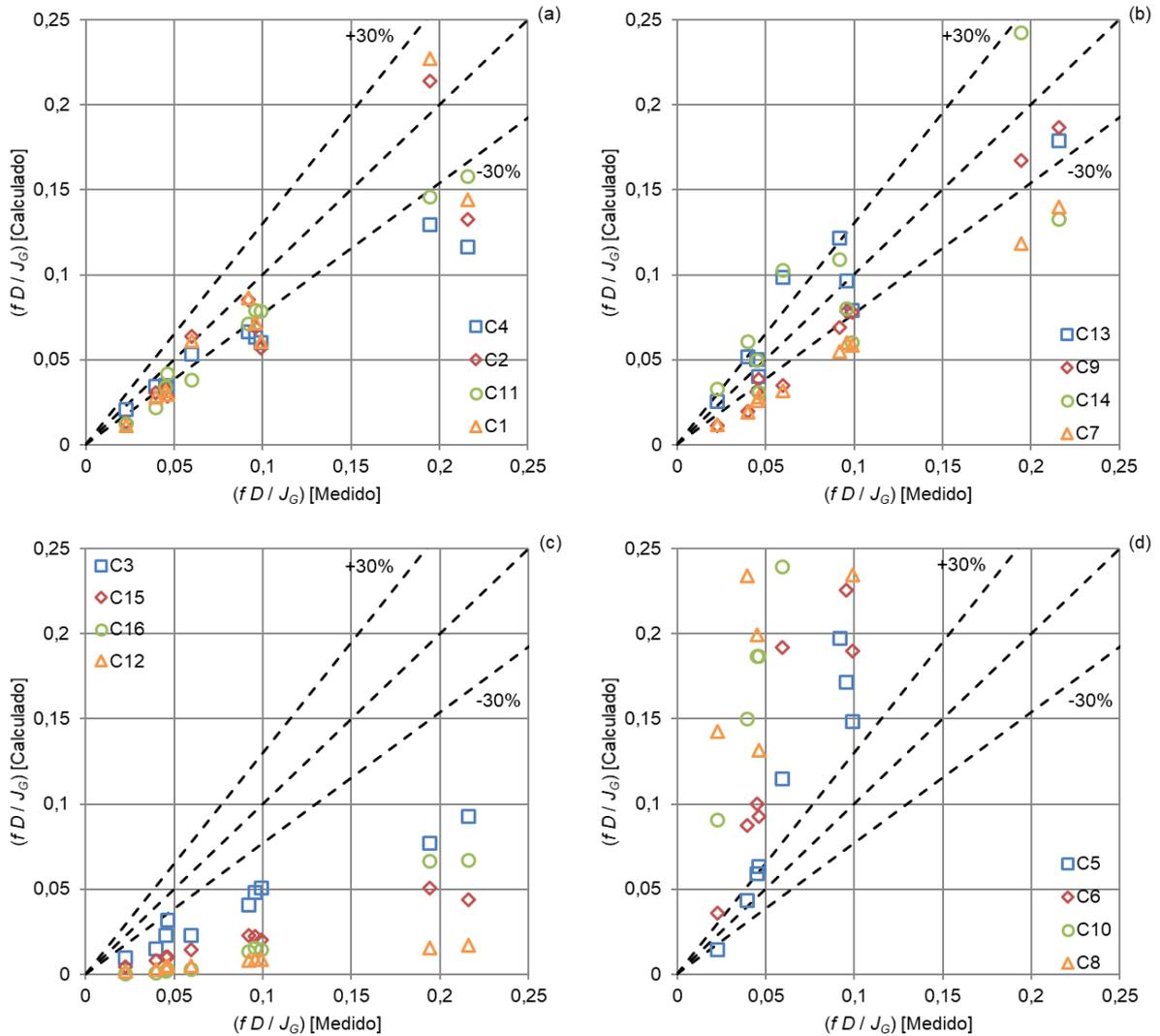
Gráfico 3 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-água num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 15°



Fonte: Autoria própria

Considerando a inclinação $\theta = 60^\circ$, de acordo com o Gráfico 6a, as correlações C13 e C14 foram as únicas que apresentaram os menores valores de desvios relativos dentro dos limites estabelecidos, $\pm 30\%$, sendo que ambas correlações foram desenvolvidas para escoamentos inclinados, mostrando neste caso a validade de previsão da frequência pelas mesmas. As correlações C4 e C2 também apresentaram bons resultados e, apesar de serem desenvolvidas especificamente para tubulações na horizontal, mostraram boa parte dos valores dentro dos limites de desvios estabelecidos. As correlações C5, C6, C10 e C8 apresentaram os resultados menos satisfatórios, exibindo desvios bastante significativos, sendo que alguns pontos da correlação C8 ficaram fora das escalas do gráfico, sendo desenvolvida especificamente para escoamentos na vertical.

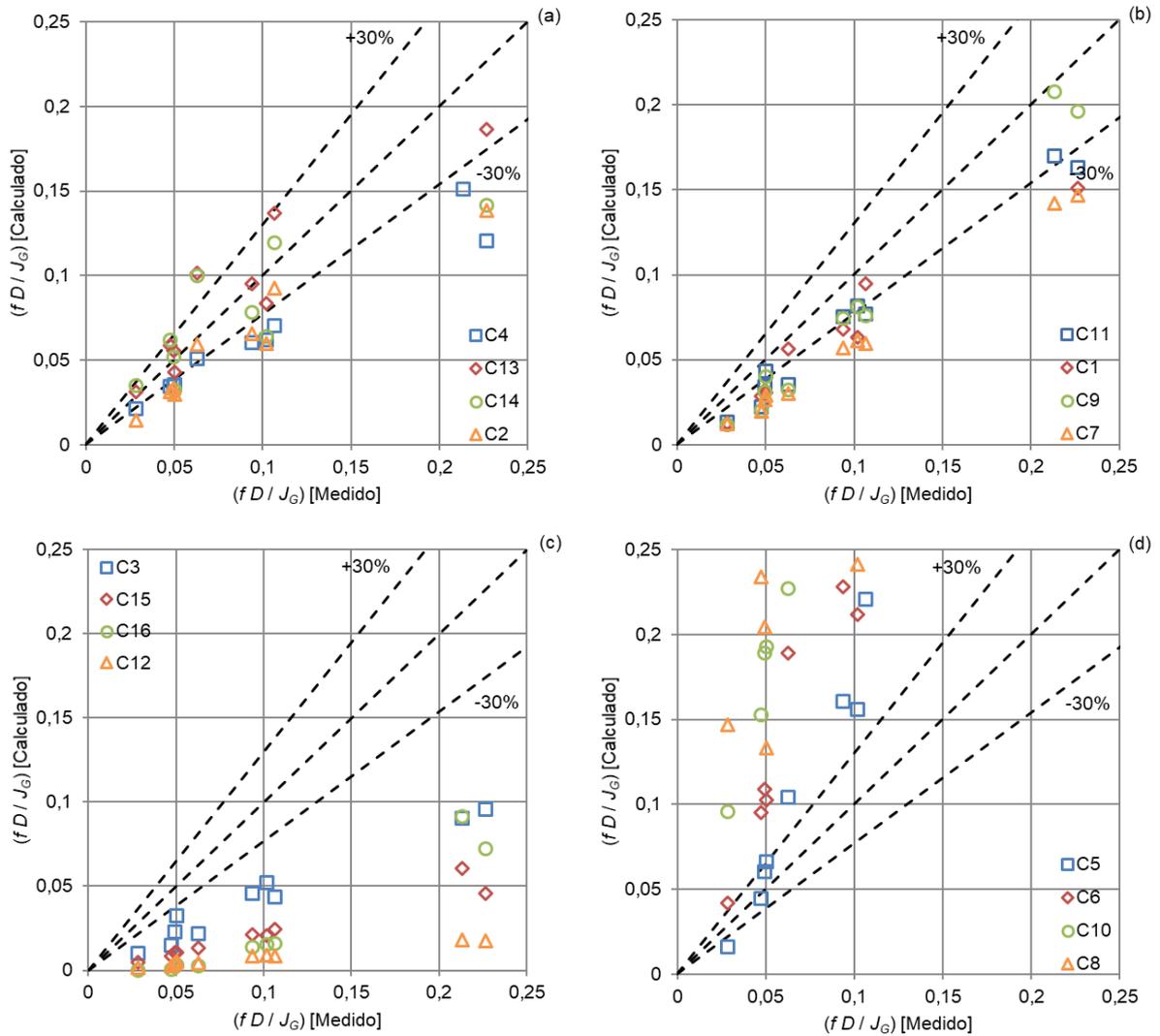
Gráfico 4 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ar-água num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 30°



Fonte: Autoria própria

De acordo com o Gráfico 7a, para a inclinação de $\theta = 75^\circ$, a correlação que melhor se comportou foi C13, ficando com a maioria dos seus pontos dentro dos limites estabelecidos. As correlações C4, C2 e C11, apesar de apresentarem valores de desvios um pouco fora dos limites estabelecidos, podem ser consideradas como satisfatórias para tubulações nesta inclinação, pois foram desenvolvidas para escoamentos de ar-água na horizontal com diferentes diâmetros. As correlações nos Gráficos 7b, 7c e 7d apresentaram comportamentos semelhantes àqueles obtidos para a inclinação de 60°, exceto a correlação C14 que apresentou melhores resultados na inclinação de 60°. Das correlações mostradas no Gráfico 7d, C5 é a única que apresenta valores de desvios um pouco mais satisfatórios e foi desenvolvida para escoamentos na horizontal para um diâmetro três vezes maior do que o dos dados utilizados.

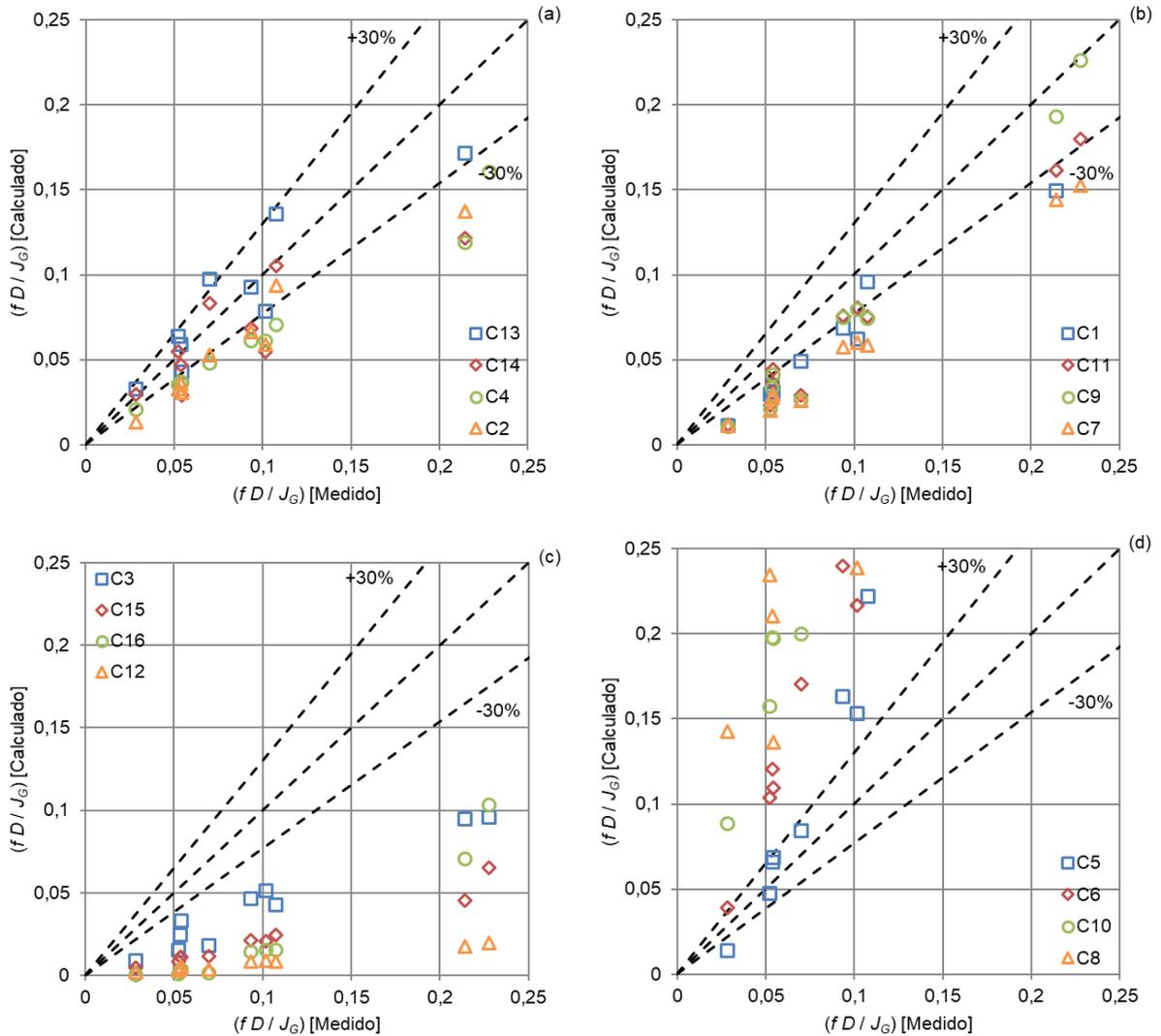
Gráfico 5 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-água num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 45°



Fonte: Autoria própria

As correlações que apresentaram os melhores resultados para vertical, $\theta = 90^\circ$, de acordo com o Gráfico 8a, foram C4, C9, C11 e C2. Embora estas correlações não tenham sido desenvolvidas para escoamentos na vertical e seus ajustes estejam baseadas em dados de tubulações com maiores valores de diâmetro, apresentaram os menores valores em módulo dos desvios relativos para este caso de escoamento vertical analisado. Todas as correlações apresentadas no Gráfico 8d apresentaram valores dos desvios bastante significativos. A correlação C8, que foi desenvolvida para tubulações inclinadas, apresentou os maiores valores de desvios para esta inclinação de tubulação.

Gráfico 6 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ar-água num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 60°



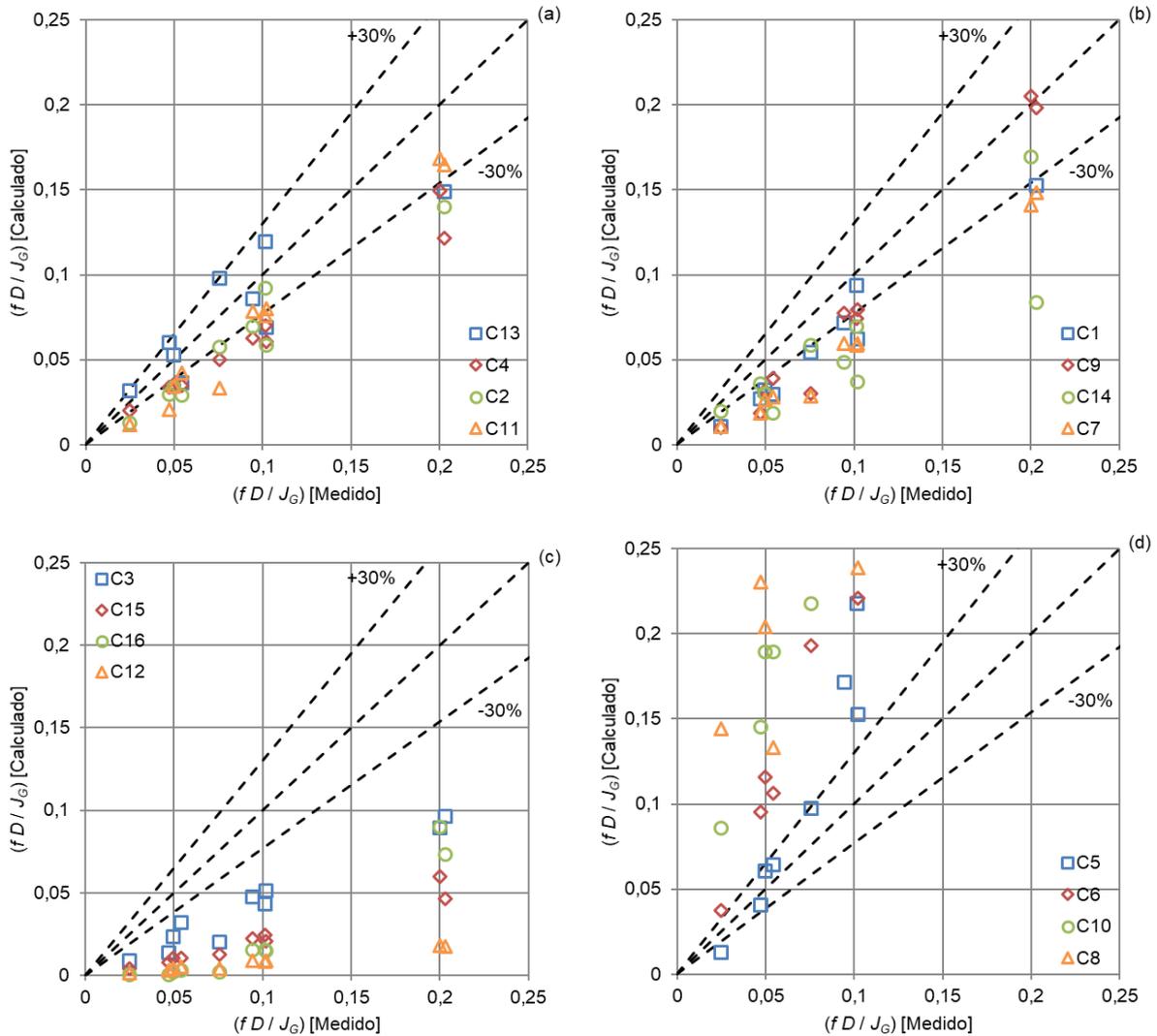
Fonte: Autoria própria

4.2 ANÁLISE DOS VALORES DE DESVIOS RELATIVOS E RMS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos em termos dos valores em módulo dos desvios relativos para as correlações de frequência, conforme Tabela 4, e dos valores de RMS destes desvios, conforme Tabela 5.

A partir da análise dos valores de desvios relativos e de RMS para cada ângulo de inclinação, de acordo com as Tabelas 4 e 5, a correlação que apresentou menores valores de desvio e de RMS na horizontal ($\theta = 0^\circ$) foi a correlação C9, para a inclinação de 15° foi a correlação C11, para as inclinações de 30° e 45° foi a correlação C4, enquanto que para as inclinações de 60° e 75° foi a correlação C13 e, finalmente, para a inclinação de 90° a que apresentou resultados mais satisfatórios foi a correlação C4.

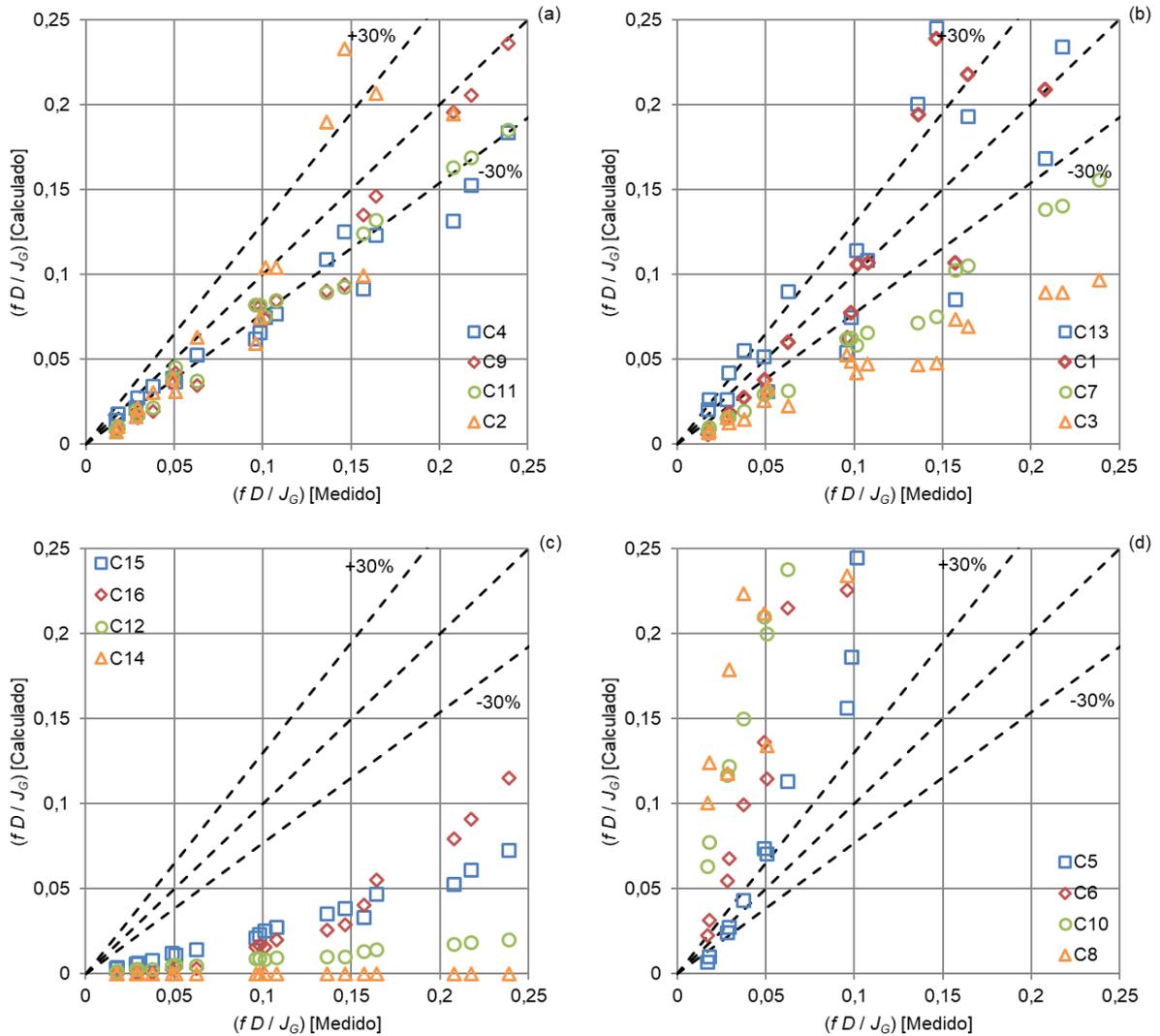
Gráfico 7 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-água num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 75°



Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado na Tabela 5, as correlações C1 e C2 apresentaram valores próximos de RMS e ambas foram desenvolvidas para escoamentos horizontais. Os autores que desenvolveram estas correlações adotaram uma forma semelhante para defini-las, utilizando a velocidade do escoamento para uma frequência mínima observada no experimento, porém considerando fluidos e diâmetros distintos. As velocidades utilizadas foram de 6 m/s e 4,8 m/s para C1 e C2, respectivamente. A correlação C2 apresentou menores valores de RMS em comparação com a correlação C1 para todas as inclinações, com exceção na horizontal (0°). Greskovich e Shrier (1972) estudaram a correlação proposta por Gregory e Scott (1969) para grandes diâmetros e, segundo os autores, essa correlação não é sugerida para diâmetros maiores do que aqueles que foram utilizados no experimento.

Gráfico 8 – Comparação entre os valores calculado e medido de frequência para escoamento ár-água num tubo de 26 mm de diâmetro e com inclinação de 90°



Fonte: Autoria própria

A correlação C3 foi desenvolvida a partir de dados obtidos para uma tubulação de 300 mm de diâmetro, visto que o autor propôs um modelo que abrangesse dados de tubulações de grandes diâmetros. Os valores de RMS, apresentados na Tabela 5, ficaram acima do valor aceitável para todas as inclinações analisadas com esta correlação. O menor valor de RMS ocorreu para horizontal (0°), tendendo a aumentar até a inclinação de 60° e depois reduzir para a inclinação de 90°.

A correlação C4 foi a que apresentou melhores resultados para os valores de RMS, tanto para a inclinação de 30° quanto para as inclinações de 45° e 90°. Apresentou um resultado satisfatório também para a inclinação de 15°. Apesar de ser desenvolvida para a horizontal, o autor utilizou dados de vários diâmetros de tubulação, incluindo um de 31 mm, que é próximo daquele utilizado por Bueno (2010).

Tabela 4 – Valores em módulo dos desvios relativos das correlações de frequência analisadas para cada inclinação

Correlação	ϵ_R / [%]						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
C1	33,95	22,97	26,89	32,10	35,16	34,12	29,92
C2	38,99	21,81	26,30	30,70	33,74	32,68	28,43
C3	35,56	48,72	53,70	56,23	58,17	56,80	55,77
C4	43,71	23,04	26,38	31,35	33,92	31,62	25,89
C5	128,34	80,32	74,95	75,02	72,79	76,71	130,22
C6	30,57	131,62	142,24	148,63	148,87	160,96	228,43
C7	23,96	37,16	42,37	45,00	47,03	45,20	39,78
C8	590,14	387,89	317,43	285,26	266,32	284,08	327,98
C9	11,67	22,82	28,49	30,79	33,15	31,60	25,00
C10	456,41	314,42	272,41	250,05	234,73	246,42	272,08
C11	12,77	21,21	27,68	31,14	34,00	31,89	28,76
C12	87,81	90,60	91,48	91,93	92,28	92,02	91,65
C13	33,95	23,30	25,12	25,61	23,39	25,29	30,96
C14	20,97	34,15	35,11	29,39	22,57	39,11	100,00
C15	67,51	75,58	77,69	78,76	79,60	78,94	76,35
C16	84,15	87,29	87,23	86,40	86,31	85,93	78,97

Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Valores de RMS dos desvios relativos das correlações de frequência analisadas para cada inclinação

Correlação	RMS / [%]						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
C1	40,26	26,11	30,32	34,62	37,24	36,52	35,79
C2	46,06	25,56	29,48	33,32	35,56	34,56	32,98
C3	38,24	49,67	54,42	56,97	59,04	57,57	56,26
C4	60,14	26,69	28,89	32,23	34,25	32,23	28,41
C5	155,26	99,69	93,41	101,61	102,92	107,76	162,55
C6	33,15	142,63	155,16	167,37	170,40	183,72	260,28
C7	26,60	37,28	42,67	45,75	48,26	46,65	40,59
C8	755,63	442,22	348,84	307,26	283,28	305,59	356,27
C9	13,97	25,03	31,74	35,66	39,34	37,99	30,11
C10	504,31	321,83	274,79	251,71	236,89	248,67	274,30
C11	15,96	22,89	29,79	33,91	37,63	35,67	30,62
C12	87,87	90,60	91,48	91,93	92,29	92,03	91,65
C13	40,26	26,84	31,39	32,96	27,79	27,41	35,57
C14	23,15	40,27	39,36	32,99	28,06	43,02	100,00
C15	68,17	75,62	77,72	78,82	79,69	79,04	76,41
C16	85,45	88,04	87,95	87,41	87,45	87,14	80,94

Fonte: Autoria própria

A correlação C5 apresentou valores de RMS acima de 100% para quase todas as inclinações. Esta correlação foi adaptada a partir do modelo de Gregory e Scott (1969), porém, para uma velocidade mínima de 5 m/s, um diâmetro três vezes maior que o utilizado nesta análise e dados do escoamento ar-água em alta pressão.

A correlação C6, apesar de ser desenvolvida a partir de dados obtidos para diversos diâmetros em pequenas inclinações, apresentou valores menores de RMS

para a horizontal e, para o restante das inclinações, os valores de RMS ficaram acima de 140%, mesmo com o ângulo de inclinação sendo levado em consideração nos cálculos, os valores de RMS aumentam com o aumento da inclinação.

O modelo proposto pela correlação C7 foi desenvolvido para os dados de Heywood e Richardson (1979), para um diâmetro de 42 mm na horizontal e comparado com dados de uma tubulação inclinada de 101,6 mm de diâmetro, na qual apresentou bons resultados. De acordo com a Tabela 5 o único resultado aceitável foi para a horizontal, onde apresentou um valor de RMS de 26,60%, os desvios tendem a aumentar até uma inclinação de 60° e reduzir até a inclinação de 90°.

A correlação C8 apresenta desvios significativos para a frequência calculada, embora no seu desenvolvimento, o autor tenha levado em consideração várias propriedades do escoamento que nenhum outro autor utilizou. O autor coletou dados para a vertical, porém, o menor desvio ocorreu para a inclinação de 60°. Para desenvolver o modelo, o autor utilizou um banco de dados específico, de tal modo que resultados satisfatórios somente devem ser obtidos para condições semelhantes às utilizadas no experimento realizado.

O modelo para o cálculo de frequência pela correlação C9 apresentou resultados satisfatórios para as inclinações de 0° e 15°, sendo que em 0° apresentou menores valores de RMS e todos os pontos apresentaram valores em módulo dos desvios menores que 30%. Nesse modelo, os autores apresentaram a frequência em termos do número de Strouhal e em função da fração homogênea de líquido, que foi obtida a partir de um ajuste de curva para os dados de escoamento na horizontal e comparados com dados de outros autores para diferentes diâmetros, apresentando desvios pouco significativos.

A correlação C10, obtida por um ajuste de curva, leva em consideração o comprimento da tubulação, porém para a presente análise apresentou valores de RMS acima de 200%, sendo os menores valores para escoamento inclinado. No experimento realizado para desenvolvê-la, o comprimento de tubulação utilizado pode ser distinto do utilizado neste trabalho e, portanto, apresenta estes desvios significativos para a frequência calculada, que é inversamente proporcional a este comprimento.

A correlação C11 também foi escrita em termos do número de Strouhal, semelhante à correlação C9, e apresentou resultados satisfatórios para inclinações de 0° até 30°, sendo a segunda melhor aplicação para horizontal (0°).

O modelo da correlação C12 foi desenvolvido utilizando dados para uma mistura de ar-óleo, com o objetivo de estudar o efeito da viscosidade na frequência. O menor valor de RMS foi obtido para 0° e não teve muita variação para as demais inclinações. Como não há muitas correlações baseadas em dados para maiores valores de viscosidade do líquido, esta pode ser uma correlação limitada.

A correlação C13 apresentou melhores resultados para escoamento inclinado do que para a horizontal, visto que foi especificamente desenvolvida a partir de dados de escoamentos com inclinação. Para as inclinações de 60° e 75° , foi a correlação que apresentou os menores valores de RMS.

A correlação C14 também foi escrita a partir de dados para diversos fluidos, diâmetros e inclinações de tubulação (sendo a maior parte em 0°), sendo assim, apresentou os menores valores de RMS para horizontal, conforme esperado pelos autores.

A correlação C15 apresentou valores de RMS acima de 60% em todas as inclinações, sendo o menor de 68,17% para 0° . Para desenvolvê-la, os autores utilizaram um líquido de maior viscosidade do que aquele que está sendo analisado neste trabalho. Esta correlação foi desenvolvida com base na correlação C14 e desconsidera o efeito da inclinação na equação, aumentando assim os valores de RMS quando comparadas. Esta correlação só é válida quando o líquido é laminar, porém para os dados de Bueno (2010) o líquido se comportou como turbulento, o que pode explicar as divergências encontradas.

Al-Safran (2016) desenvolveu a correlação C16 baseado em dados de escoamentos com várias características diferentes. O menor valor de RMS foi obtido para a inclinação de 90° e, ainda assim, se aproxima de 81%. Segundo o autor, esta correlação apresenta maior precisão para valores mais altos e mais baixos de velocidades superficiais do gás e não para valores intermediários, como no caso dos dados utilizados neste trabalho.

Analisando de uma forma mais geral as correlações utilizadas neste estudo, as que apresentaram melhores resultados para todas as inclinações foram as correlações C9 e C11, podendo assim ser utilizadas para todas as inclinações. Para se obter resultados mais precisos para cada inclinação, sugere-se que as correlações C9 e C11 possam ser usadas para inclinações de até 15° . Para inclinações acima de 15° até 45° sugere-se a utilização da correlação C4, para inclinações acima de 45° até 75° sugere-se a utilização da correlação C13, apresentando desvios aceitáveis, e

para inclinações acima de 75° até 90° a correlação C4 pode ser utilizada, apresentando menores desvios. Das correlações desenvolvidas para escoamento de horizontal a vertical, as correlações C13 e C14 apresentaram um bom desempenho, porém, recomenda-se a aplicação somente da correlação C13 para escoamentos verticais.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizada uma análise comparativa entre algumas correlações existentes na literatura para o cálculo da frequência do escoamento intermitente. A análise foi realizada através da comparação com dados experimentais de frequência disponíveis na literatura, para vários ângulos de inclinação de tubulação. Com a comparação entre os modelos, foi possível verificar quais são mais precisos e como se comportam quando utilizados em uma aplicação com condições diferentes daquelas em que foram desenvolvidos.

A maioria das correlações encontradas na literatura foram desenvolvidas para escoamento em tubulações na horizontal, apesar disto podem apresentar desvios aceitáveis quando empregadas para o cálculo em tubulações inclinadas. Nenhum dos modelos estudados apresentou sempre a maior precisão para todas as inclinações, mas para cada inclinação, modelos diferentes se mostraram mais eficientes que outros. De acordo com os resultados obtidos, as correlações que apresentaram os melhores resultados de forma geral foram C9 e C11, as duas apresentam resultados muito próximos e satisfatórios, tanto para a horizontal quanto para a vertical, exceto em algumas inclinações. Das correlações desenvolvidas para a vertical, C13 também apresentou resultados considerados satisfatórios para quase todas as inclinações.

Cada correlação foi proposta com base em um conjunto de dados que se restringe às condições em que foram desenvolvidas. Grande parte destas correlações pode apresentar resultados aceitáveis para dados de um experimento com características diferentes, porém, alguns modelos quando aplicados sob outras condições podem apresentar resultados com desvios significativos, principalmente, quando se tem um banco de dados mais limitado. Alguns autores tentaram desenvolver modelos que abrangessem dados mais diversos com relação aos fluidos de trabalho, aos diâmetros e inclinações de tubulação, apesar disso, esses modelos não se mostraram os mais eficientes para esta análise.

Como sugestão para trabalhos futuros, as correlações podem ser comparadas utilizando um maior banco de dados para tubulações inclinadas, com maiores diâmetros e com outros fluidos de trabalho, como forma de verificar a aplicação das mesmas para escoamentos com maior viscosidade do líquido, já que existem poucos

modelos desenvolvidos para esta situação, bem como poucos modelos desenvolvidos para dados de tubulações inclinadas. Além disto, a busca por um modelo mais preciso e abrangente para estimativa da frequência do escoamento intermitente pode ser realizada a partir da aquisição e análise de mais dados experimentais.

REFERÊNCIAS

AL-SAFRAN, Eissa M. Investigation and prediction of slug frequency in gas/liquid horizontal pipe flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Elsevier, v. 69, n. 1, p. 143–155, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

_____. Probabilistic modeling of slug frequency in gas/liquid pipe flow using the Poisson probability theory. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Elsevier, v. 138, p. 88–96, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 27, 30 e 48.

AL-SAFRAN, Eissa M.; TAITEL, Yehuda; BRILL, James P. Prediction of slug length distribution along a hilly terrain pipeline using slug tracking model. **Journal of Energy Resources Technology**, American Society of Mechanical Engineers, v. 126, n. 1, p. 54–62, 2004. Citado na página 18.

ANDREUSSI, P.; BENDIKSEN, K. H.; NYDAL, O. J. Void distribution in slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 19, n. 5, p. 817–828, 1993. Citado na página 17.

BARNEA, Dvora; TAITEL, Yehuda. A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 19, n. 5, p. 829–838, 1993. Citado na página 18.

BRATLAND, Ove. **Pipe Flow 2: Multi-phase Flow Assurance**. 1. ed. Dr. Ove Bratland's Flow Assurance Site, 2010. Disponível em: <<http://www.drbratland.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

BUENO, Luis Gerardo Gómez. **Estudo experimental de escoamentos líquido-gás intermitentes em tubulações inclinadas**. fev. 2010. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, fev. 2010. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/263073>>. Citado 7 vezes nas páginas 7, 29, 36, 37, 38, 45 e 48.

COOK, Martin; BEHNIA, Masud. Film profiles behind liquid slugs in gas-liquid pipe flow. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 43, n. 9, p. 2180–2186, 1997. Citado na página 17.

DIÁRIO DO PRÉ-SAL. **Tipos de plataforma de perfuração e a embarcação de armazenagem**. 2017. Acesso em: 20 abr. 2017. Disponível em: <<https://diariodopresal.wordpress.com/petroleo-e-gas/>>. Citado na página 12.

DUKLER, Abraham E.; HUBBARD, Martin G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, ACS Publications, v. 14, n. 4, p. 337–347, 1975. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

FERNANDES, R. C.; SEMIAT, R.; DUKLER, A. E. Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 29, n. 6, p. 981–989, 1983. Citado na página 17.

FOSSA, M.; GUGLIELMINI, G.; MARCHITTO, A. Intermittent flow parameters from void fraction analysis. **Flow Measurement and Instrumentation**, Elsevier, v. 14, n. 4, p. 161–168, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 30.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. [S.l.]: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2006. Citado na página 37.

GOKCAL, Bahadir et al. Prediction of slug frequency for high viscosity oils in horizontal pipes. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. [S.l.], 2009. Citado 4 vezes nas páginas 21, 24, 26 e 30.

GREGORY, G. A.; SCOTT, D. S. Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 15, n. 6, p. 933–935, 1969. Citado 10 vezes nas páginas 18, 19, 20, 21, 22, 25, 30, 34, 44 e 46.

GRESKOVICH, Eugene J.; SHRIER, Adam L. Slug frequency in horizontal gas-liquid slug flow. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development**, ACS Publications, v. 11, n. 2, p. 317–318, 1972. Citado 3 vezes nas páginas 19, 26 e 44.

GRIFFITH, Peter; WALLIS, Graham B. Two-phase slug flow. **Journal of Heat Transfer**, Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge, v. 83, n. 3, 1961. Citado na página 16.

HENAU, V. de; RAITHBY, G. D. A transient two-fluid model for the simulation of slug flow in pipelines – I. Theory. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 21, n. 3, p. 335–349, 1995. Citado na página 17.

HERNANDEZ-PEREZ, V.; ABDULKADIR, M.; AZZOPARDI, Barry J. Slugging frequency correlation for inclined gas-liquid flow. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 6, p. 44–51, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 21, 25 e 30.

HEYWOOD, N. I.; RICHARDSON, J. F. Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: Determination of liquid holdup by γ -ray absorption. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 34, n. 1, p. 17–30, 1979. Citado 6 vezes nas páginas 18, 20, 22, 26, 30 e 47.

HILL, T. J.; WOOD, D. G. et al. A new approach to the prediction of slug frequency. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. [S.l.], 1990. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

_____. Slug flow: Occurrence, consequences, and prediction. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **University of Tulsa Centennial Petroleum Engineering Symposium**. [S.l.], 1994. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 21.

ISHII, Mamoru. **Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow**. Eyrolles, Paris, France: [s.n.], 1975. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricite de France. Citado na página 17.

ISHII, Mamoru; HIBIKI, Takashi. **Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011. Citado na página 12.

ISSA, R. I.; KEMPF, M. H. W. Simulation of slug flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 29, n. 1, p. 69–95, 2003. Citado na página 17.

JEPSON, W. P.; TAYLOR, R. E. Slug flow and its transitions in large-diameter horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 19, n. 3, p. 411–420, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 30.

KOKAL, S. L.; STANISLAV, J. F. An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes - I. Flow patterns. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 44, n. 3, p. 665–679, 1989. Citado na página 17.

LIMA, Luiz Eduardo Melo. **Análise do modelo de mistura aplicado em escoamentos isotérmicos gás-líquido**. jul. 2011. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, jul. 2011. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264105>>. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 29.

MANOLIS, I. G.; MENDES-TATSIS, M. A.; HEWITT, G. F. The effect of pressure on slug frequency on two-phase horizontal flow. In: **The 2nd Conference on Multiphase Flow**. Kyoto, Japan: [s.n.], 1995. Citado 3 vezes nas páginas 21, 26 e 30.

NETTO, J. R. Fagundes; FABRE, J.; PERESSON, L. Shape of long bubbles in horizontal slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 25, n. 6, p. 1129–1160, 1999. Citado na página 17.

NICKLIN, D. J. Two-phase flow in vertical tube. **Trans. Instn. Chem. Engrs.**, v. 40, p. 61–68, 1962. Citado na página 16.

NYDAL, Ole Jørgen. **An Experimental Investigation on Slug Flow**. 1991. Tese (Doutorado), 1991. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 30.

RODRIGUES, Hendy Tisserant. **Simulação numérica do escoamento bifásico gás-líquido no padrão de golfadas utilizando um modelo lagrangeano de seguimento de pistões**. out. 2009. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, out. 2009. Citado 3 vezes nas páginas 13, 14 e 28.

RODRIGUES, Hendy T. et al. A comparative study of closure equations for gas-liquid slug flow. In: **Proceedings of International Congress of Mechanical Engineering – COBEM**. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 22.

ROSA, E. S. et al. Analysis of slug tracking model for gas–liquid flows in a pipe. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Springer, v. 37, n. 6, p. 1665–1686, 2015. Citado na página 18.

ROUMAZEILLES, P. M. et al. An experimental study on downward slug flow in inclined pipes. **SPE Production & Facilities**, Society of Petroleum Engineers, v. 11, n. 03, p. 173–178, 1996. Citado na página 24.

SAKAGUCHI, T. et al. Estimations of large bubble length, liquid slug length, slug unit length and slug period of gas-liquid two-phase slug flow in vertical pipes. **Japanese Journal of Multiphase Flow**, Japan Society of Multiphase Flow; 1999, v. 15, n. 3, p. 288–295, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 30.

SCHULKES, R. et al. Slug frequencies revisited. In: BHR GROUP. **15th International Conference on Multiphase Production Technology**. [S.l.], 2011. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 30.

SHEA, R. H. et al. Slug frequency prediction method comparison. In: **Proceedings of the 4th North American Conference on Multiphase Technology**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 227–237. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 30.

SHOHAM, Ovadia. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, 2006. Citado na página 14.

TAITEL, Yehuda; BARNEA, Dvora. Two-phase slug flow. **Advances in heat transfer**, Elsevier, v. 20, p. 83–132, 1990. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.

_____. Effect of gas compressibility on a slug tracking model. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 53, n. 11, p. 2089–2097, 1998. Citado na página 18.

TAITEL, Yehuda; DUKLER, Abraham E. A model for slug frequency during gas-liquid flow in horizontal and near horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 3, n. 6, p. 585–596, 1977. Citado na página 19.

TRONCONI, Enrico. Prediction of slug frequency in horizontal two-phase slug flow. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 36, n. 5, p. 701–709, 1990. Citado na página 20.

VICENCIO, Fernando Enrique Castillo. **Caracterização experimental do escoamento intermitente líquido-gás em tubulações horizontais**. set. 2013. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, set. 2013. Citado na página 12.

WALLIS, Graham B. **One-dimensional two-phase flow**. [S.I.]: McGraw-Hill, 1969. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 28.

WANG, Xin; GUO, Liejin; ZHANG, Ximin. An experimental study of the statistical parameters of gas-liquid two-phase slug flow in horizontal pipeline. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Elsevier, v. 50, n. 11, p. 2439–2443, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 30.

WOODS, Bennett D.; FAN, Zhongliang; HANRATTY, Thomas J. Frequency and development of slugs in a horizontal pipe at large liquid flows. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 32, n. 8, p. 902–925, 2006. Citado na página 27.

ZABARAS, G. J. et al. Prediction of slug frequency for gas-liquid flows. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. [S.I.], 1999. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 30.

ZHAO, Y.; YEUNG, H.; LAO, L. Slug frequency in high viscosity liquid and gas flow in horizontal pipes. In: BHR GROUP. **16th International Conference on Multiphase Production Technology**. [S.I.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 30.

ZHENG, G.; BRILL, J. P.; TAITEL, Y. Slug flow behavior in a hilly terrain pipeline. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 20, n. 1, p. 63–79, 1994. Citado na página 18.