

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

CIDELEI FERREIRA DE PAULA JUNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE
ATRITO INTERFACIAL EM ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO NO
PADRÃO ANULAR EM TUBULAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2015**

CIDELEI FERREIRA DE PAULA JUNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE
ATRITO INTERFACIAL EM ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO NO
PADRÃO ANULAR EM TUBULAÇÕES**

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima

PONTA GROSSA

2015



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE COMPARATIVA DE CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE ATRITO INTERFACIAL EM ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO NO PADRÃO ANULAR EM TUBULAÇÕES

por

CIDELEI FERREIRA DE PAULA JUNIOR

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 3 de Dezembro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido 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. Me. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Laercio Javarez Junior
Coordenador do Curso

Dedico este trabalho ao meu pai por não
poder estar aqui desfrutando da minha
felicidade e vitória.

AGRADECIMENTOS

Para a realização deste trabalho muitas pessoas abriram mão de seu tempo que poderiam estar fazendo algo mais prazeroso. Agradeço a o meu orientador, o professor Luiz, por ter dedicado parte de seu tempo com este trabalho me orientando e corrigindo meus erros, a minha esposa pela compreensão de eu ter menos tempo com ela para me dedicar a este trabalho, a minha mãe por ter me dado suporte para a conclusão do trabalho, minha sogra por ter me dado toda ajuda em casa e com meu filho, a minha irmã por ter cuidado do meu filho para eu realizar o trabalho, ao meu padrasto por ter me ajudado com minhas tarefas que eu não podia fazer e a Deus por ter me dado saúde e colocado essas pessoas na minha vida.

RESUMO

PAULA JUNIOR, Cidelei Ferreira de. **Análise comparativa de correlações para o fator de atrito interfacial em escoamentos gás-líquido no padrão anular em tubulações**. 2015. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

O escoamento bifásico consiste de um escoamento de duas fases diferentes ou componentes. Este escoamento pode ser um escoamento anular onde uma das fases ou componente escoam formando uma camada de filme sobre a outra fase ou componente. O escoamento bifásico pode estar presente em escoamento que sofrem ebulição ou condensação, por exemplo: geração de vapor, refrigeração ou indústria de petróleo. No escoamento anular é fundamental que o fator de atrito interfacial entre as fases seja conhecido, para que através da tensão cisalhante interfacial possa ser calculado o diferencial de pressão, forças e perda de carga. Assim podendo dimensionar os equipamentos para determinado escoamento. Para se calcular o fator de atrito interfacial vários autores propuseram correlações diferentes de fatores de atrito interfacial. O trabalho consiste em comparar os resultados das correlações existentes para calcular o fator de atrito interfacial em escoamento bifásico anular em tubo. Através de dados experimentais foram realizados de modo comparativo os cálculos dos fatores de atritos interfaciais propostos pelos autores com os fatores interfaciais medidos, obtidos da literatura. Foram constatados às restrições que cada método tem para quantificar os métodos de melhores precisões, os dados experimentais utilizados foram os de escoamento anular transicional. A comparação tem uma forma ampla e clara, utilizando métodos de quantificar os resultados finais, demonstrando quais métodos são mais precisos em relação aos dados experimentais utilizados.

Palavras-chave: Escoamento anular. Fator de atrito interfacial. Correlações.

ABSTRACT

PAULA JUNIOR, Cidelei Ferreira de. **Comparative analysis of correlations for interfacial friction factor in gas-liquid flows in the annular pattern in pipes** . 2015. 47 p. Final Coursework (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2015.

The two-phase flow is a flow of two different components or phases. This flow may be an annular flow where one phase or component flows forming a film layer over the other phase or component. The two-phase flow may be present on disposal suffering boiling or condensation, for example, steam generation or cooling the petroleum industry. The annular flow is essential that the interfacial friction factor between the phases is known, so that through interfacial shear stress can be calculated differential pressure, forces and pressure drop, so being able to scale the equipment for a given flow. To calculate the interfacial friction factor different authors have proposed different correlations interfacial friction factors. The work is to compare the results of the correlations to calculate the interfacial friction factor in two-phase flow annular tube. Through experimental data were performed so Comparative calculations of interfacial friction factors proposed by the authors with the measured interfacial factors, obtained from the literature. Were contacted to the constraints that each method is to quantify the methods best accuracies, experimental data used of the annular flow transitional. The comparison has a wide and clear, using methods to quantify the final results, demonstrating what methods are more accurate compared to the experimental data used.

Keywords: Annular flow. Interfacial friction factor. Correlations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática dos padrões de escoamento gás-líquido em linhas horizontais.	12
Figura 2 – Representação esquemática dos padrões de escoamento gás-líquido em linhas verticais.	13
Figura 3 – Representação esquemática do escoamento anular e suas variáveis.	24
Gráfico 1 – Valores calculados de C1, C2 e C3 em relação aos medidos. . . .	31
Gráfico 2 – Valores calculados de C4, C5 e C6 em relação aos medidos. . . .	32
Gráfico 3 – Valores calculados de C7, C8 e C9 em relação aos medidos. . . .	33
Gráfico 4 – Valores calculados de C10, C11 e C12 em relação aos medidos. . .	33
Gráfico 5 – Valores calculados de C13, C14 e C15 em relação aos medidos. . .	34
Gráfico 6 – VValores calculados de C16, C17 e C18 em relação aos medidos.	34
Gráfico 7 – Valores calculados de C19, C20 e C21 em relação aos medidos. . .	35
Gráfico 8 – Valores calculados de C22, C23 e C24 em relação aos medidos. . .	35
Gráfico 9 – Valores calculados de C25, C26 e C27 em relação aos medidos. . .	36
Gráfico 10 – Valores calculados de C28, C29 e C30 em relação aos medidos. . .	36
Gráfico 11 – Valores calculados de C31 e C32 em relação aos medidos.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correlações para o fator de atrito interfacial em escoamentos gás-líquido.	26
Tabela 2 – Variáveis das correlações.	29
Tabela 3 – Dados experimentais.	30
Tabela 4 – Raiz do valor quadrático médio (RMS)	38

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

C_{fi}	Fator de atrito interfacial	
C_{fL}	Fator de atrito da fase líquida na parede do tubo	
C_{fs}	Fator de atrito da fase gasosa na parede do tubo	
D	Diâmetro interno do tubo	[m]
Q	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
Re	Número de Reynolds	
RMS	RMS	
S	Perímetro	[m]
U	Velocidade	[m/s]

LETRAS GREGAS

δ_F	Espessura de filme adimensional	
H_F	Espessura dimensional de líquido	[mm]
μ	Viscosidade dinâmica	[kg/(m·s)]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
π	Pi (Constante circular)	[rad]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
σ	Tensão superficial	[N/m]
τ	Tensão de cisalhamento	[N/m ²]

SUBSCRITOS

G	Fase gasosa
K	Representa uma das fases dos fluídos
L	Fase líquida
SG	Superficial do gás
SL	Superficial do líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 PROBLEMA	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 JUSTIFICATIVA	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3 METODOLOGIA	23
3.1 O ESCOAMENTO ANULAR E SUAS VARIÁVEIS	23
3.2 CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE ATRITO INTERFACIAL	25
3.3 MÉTODO DE ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 RESULTADOS EM TERMOS DE GRÁFICOS	31
4.2 RESULTADOS EM TERMOS DE RMS	37
5 CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Escoamento em dutos é o meio comumente aplicado para o transporte de fluidos. As características do escoamento variam em função das propriedades dos fluidos e da geometria, da inclinação e do material no duto. Escoamentos com mais de uma fase ou componente são denominados escoamentos multifásicos, sendo o mais simples destes o escoamento bifásico, por exemplo: gás-líquido, gás-sólido e sólido-líquido. Os escoamentos bifásicos possuem, em função da mudança de suas características ao longo do duto, muitos modos (padrões) de escoamento. Estes padrões de escoamentos podem ser identificados e classificados de acordo com suas características.

Independente do diâmetro do tubo e da força gravitacional exercida no escoamento, os padrões de escoamentos bifásicos gás-líquido são dispersos, separado e intermitente (PAUCHON et al., 1993). O escoamento separado ocorre quando duas correntes de fluidos escoando simultaneamente estão separadas por uma interface bem definida, devido às forças desenvolvidas no escoamento. Os escoamentos separados gás-líquido, podem ser subclassificados em estratificado ou anular. Por sua vez, o escoamento anular pode ser subclassificado em semianular e anular.

O escoamento anular ocorre quando se forma um filme de líquido escoando em contato com a parede interna do tubo e um núcleo gasoso escoando na parte central do tubo, que por sua vez carrega uma pequena parte do líquido em forma de gotículas (PEDRAS, 1993). Segundo Bharathan e Wallis (1983) quando no escoamento bifásico ocorrer a formação de um filme anular de líquido o escoamento é considerado anular. O filme de líquido no escoamento anular pode se apresentar de três formas: suave, em transição ou rugoso.

No escoamento anular o gás não entra em contato com a parede do tubo, somente o líquido em forma de filme, desta forma, o gás para escoar sofre ação de uma força de atrito interfacial com o líquido devido à diferença de velocidade e de propriedades físicas entre os dois fluidos. Este atrito interfacial, de forma análoga ao atrito com paredes, pode ser definido em termos de um fator de atrito interfacial (PEDRAS, 1993). O escoamento semianular constitui-se uma transição de escoamento de golfadas instáveis (intermitente) para o anular (separado). O escoamento semianular ape-

sar de possuir alguns trechos com pequenos pistões com bolhas dispersas pode ser considerado um escoamento separado por existir fronteira interfacial na maior parte de sua extensão (AZZOPARDI; HILLS, 2003).

Em escoamentos na vertical, com o tubo inclinado a 90° em relação a horizontal, o filme é simétrico e tende a ter a mesma espessura ao longo do perímetro do tubo. Quando o tubo está inclinado a ângulo menor que 90° , devido à força gravitacional, o filme deixa de ser simétrico e sua espessura tende a aumentar na parte inferior e a diminuir na parte superior da circunferência do tubo. Em alguns casos, quando o tubo está alinhado na horizontal, a diferença de espessura é tão grande que o escoamento deixa de ser anular e se torna um escoamento estratificado ondulado, quando a velocidade de escoamento se torna inferior a necessária para que o escoamento permaneça anular. É comum subclassificarlos seguindo a proposição de Taitel e Dukler (1976), que os dividem em 6 padrões: bolhas, bolhas alongadas, golfadas, estratificado liso, estratificado ondulado e anular, a Figura 1 representa os modos de escoamento na horizontal (LIMA, 2011).

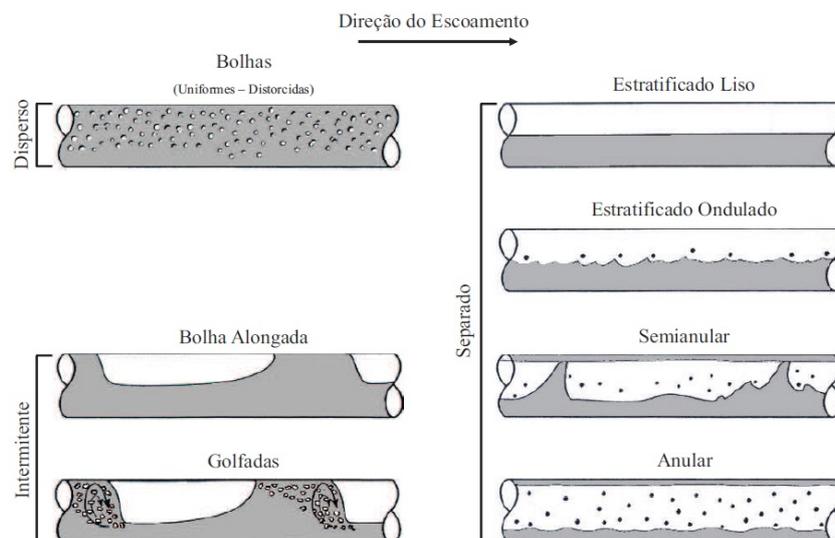


Figura 1 – Representação esquemática dos padrões de escoamento gás-líquido em linhas horizontais.

Fonte: Adaptada de Shoham (2006 apud LIMA, 2011).

Os escoamentos verticais se diferem dos horizontais, por não existir a presença de escoamento estratificado liso ou ondulado, sendo comum utilizar à classificação de Taitel, Bornea e Dukler (1980), dividido em 5 padrões: bolhas uniformes, bolhas distorcidas, golfadas, agitado, anular e gotas. A Figura 2 apresenta os padrões de escoamento na vertical.

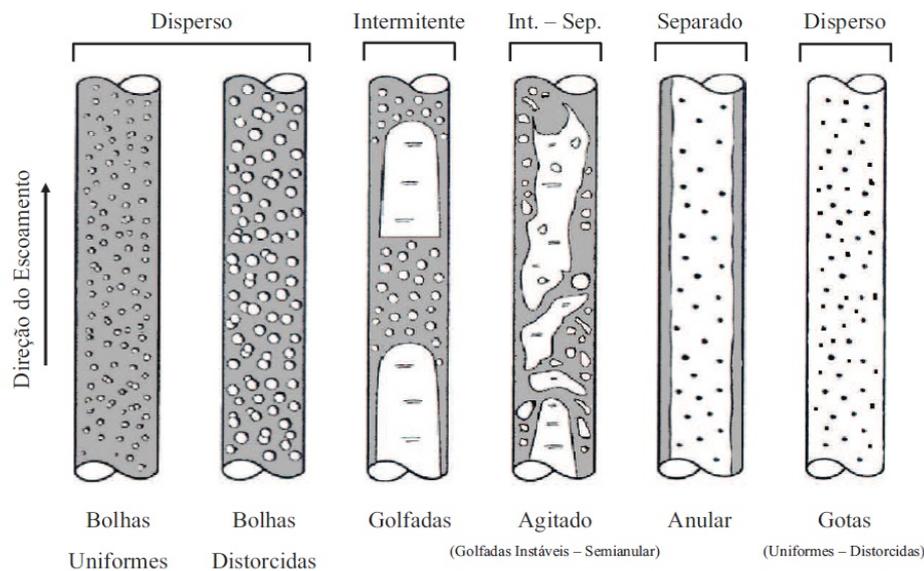


Figura 2 – Representação esquemática dos padrões de escoamento gás-líquido em linhas verticais.

Fonte: Adaptada de Shoham (2006 apud LIMA, 2011).

O escoamento anular é comumente encontrado em várias aplicações industriais, por exemplo, em processos onde ocorre ebulição de líquido e condensação de vapores em sistemas de escoamento de fluidos. O escoamento anular pode ocorrer em dispositivos como condensadores, caldeiras, reatores, torres de refrigeração e tubulações de petróleo.

Em muitos condensadores ocorre o escoamento anular devido ao fluido condensar primeiramente na superfície de contato com o tubo formando um filme de líquido (SOUZA, 2009). Na refinaria de petróleo é também comum encontrar a ocorrência de escoamento anular. Quando é fornecido calor ao petróleo, uma fração evapora, assim formando uma mistura de gás-líquido, que ocorre devido à diferença de volatilidade dos componentes da mistura líquida inicial. E devido à diferença de densidades, o líquido tenderá a descer e o gás a subir e o escoamento dentro do tubo poderá se tornar anular (FERREIRA; AQUINO NETO, 2005).

O escoamento anular na vertical pode ser cocorrente, onde o líquido escoar em mesmo sentido que da fase gasosa, ou contracorrente, onde o líquido escoar em sentido contrário à da fase gasosa. Em escoamentos anulares com espessura de filme relativamente pequena (filme fino) o escoamento gasoso sente a presença de uma superfície rugosa, com a rugosidade relativa correlacionada em função da razão entre a espessura média do filme e o diâmetro da tubulação.

Em escoamentos onde a vazão de líquido é próxima a de reversão, onde a energia disponível para arrastar os fluídos é próxima do mínimo para existir a elevação dos fluídos, neste caso o escoamento pode ser denominado de escoamento anular transicional (PEDRAS, 1993).

1.1 PROBLEMA

Como o conhecimento dos mecanismos físicos envolvidos nas definições de correlações para o fator de atrito interfacial em escoamento anular gás-líquido pode melhorar a precisão dos modelos para previsão de escoamentos bifásicos?

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa das correlações para estimativa do fator de atrito interfacial em escoamento anular gás-líquido.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre as correlações existentes e suas aplicações e limitações.
- Comparar os resultados de cada correlação contra dados experimentais.
- Verificar quais correlações apresentam melhores resultados para escoamento anular transicional.

1.3 JUSTIFICATIVA

A tensão de cisalhamento interfacial entre dois fluidos é um dos principais fenômenos existentes no escoamento anular gás-líquido e importante para sua modelagem. O fator de atrito interfacial é o parâmetro adimensional necessário à determinação da tensão de cisalhamento interfacial. Desta forma, muitos pesquisadores têm se dedicado cada vez mais à proposição de uma melhor aproximação para este fator de atrito interfacial (WONGWISES; KONGKIATWANITCH, 2001).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica é apresentada uma breve descrição de alguns trabalhos relacionados com o desenvolvimento de correlações para a determinação do fator de atrito interfacial em escoamentos gás-líquido no padrão anular. Os diferentes modelos que são apresentados nestes trabalhos estão baseados no estudo dos fenômenos físicos envolvidos, bem como na análise de dados experimentais.

Gazley (1948 apud LI et al., 2013) foi um dos primeiros a estudar o fator de atrito interfacial em escoamento anular na horizontal, considerando que o fator de atrito interfacial é aproximadamente igual ao fator de atrito na parede da fase gasosa, desde que a velocidade média do gás seja muito maior do que a do líquido. Posteriormente, Ellis e Gay (1959 apud NAJI, 2011) obtiveram uma correlação para o fator de atrito interfacial, que não era diretamente relacionada ao fator de atrito na parede da fase gasosa, utilizando um número de Reynolds para o escoamento do gás, que pode ser determinado para escoamentos anular ou estratificado.

O escoamento anular tem sido bastante estudado principalmente na década de 60, principalmente devido à indústria nuclear (PEDRAS, 1993). Desde então, começaram a serem desenvolvidas formulações analíticas que descrevem o escoamento anular utilizando como base dados obtidos de estudos realizados previamente. Por exemplo, Schlichting e Gersten (1960 apud PARAS; VLACHOS; KARABELAS, 1994) propuseram uma correlação para determinar o fator de atrito interfacial em escoamentos estratificado cuja interface é considerada totalmente rugosa.

Utilizando dados coletados de um gerador de vapor com tubos na vertical e auxiliado por um computador para o processamento destes dados, Chien e Ibele (1964 apud EL-SHANAWANY; EL-SHIRBINI; MURGATROYD, 1978) determinaram as variáveis em cada trecho do tubo e realizaram uma análise comparativa contra diferentes conjuntos de dados experimentais em escoamento anular. Deste modo, propuseram um modelo para determinação do fator de atrito interfacial baseado somente na espessura de filme adimensional.

Linehan (1968 apud KIM; LEE; BANKOFF, 1985) realizou experimentos com o escoamento anular e estratificado próximo da horizontal ($\theta = 4^\circ$) e próximo da vertical ($\theta = 87^\circ$) e obteve correlações para o fator de atrito interfacial baseadas nas

propriedades dos fluidos. Ele observou que o fator de atrito interfacial, quando há a ocorrência de ondas na interface gás-líquido, depende somente do número de Reynolds do líquido e independe da inclinação do escoamento. Isto foi também observado em experimentos de outros autores segundo o autor.

Wallis (1969 apud PEDRAS, 1993), utilizando dados experimentais de escoamentos verticais e horizontais no padrão anular, verificou que o parâmetro determinante para o fator de atrito interfacial é a velocidade média relativa ao líquido. Ele propôs duas equações para calcular o fator de atrito interfacial, de acordo com uma classificação para o escoamento anular em dois tipos: com filme de líquido completamente rugoso (ARM, do inglês *Apparent Roughness Model*) e com filme de líquido plano. Ele descreve o escoamento anular rugoso como aquele que sente a presença de uma rugosidade quatro vezes superior à espessura média do filme.

Posteriormente, vários autores começaram a utilizar os dados de Wallis (1969) em seus estudos para o desenvolvimento de correlações com base no modelo proposto por ele. Porém, muitas destas correlações apresentam problemas de precisão quando o filme de líquido é muito espesso (WONGWISES; KONGKIATWANITCH, 2001). Moeck (1970) desenvolveu uma correlação para determinar o fator de atrito interfacial em escoamento anular, utilizando dados experimentais de outros autores, que não depende diretamente do número de Reynolds, mas é diretamente proporcional a espessura de filme de líquido.

Eck (1973 apud HART; HAMERSMA; FORTUIN, 1989) desenvolveu um equacionamento utilizando correlações empíricas, o qual depende do número de Reynolds do gás e da espessura de filme adimensional. Através de experimentos realizados em tubos verticais com escoamentos anular e estratificado de filme de líquido em contracorrente ao fluxo de gás, ou seja, enquanto o gás sobe o líquido desce, comumente encontrado em condensadores. Taitel e Dukler (1976 apud TORRES, 1992) propuseram que o fator de atrito interfacial está diretamente relacionado à tensão de cisalhamento interfacial, à massa específica do gás e à velocidade relativa, de forma análoga a tensão ao fator de atrito na parede da fase gasosa para escoamento anular e estratificado.

Bharathan (1979 apud DUKLER; SMITH; CHOPRA, 1984), utilizando o gradiente de pressão de um escoamento de ar e água, realizou ajuste empíricos na equação proposta por Wallis (1969). Segundo ele, uma pequena diferença nas constantes

foi suficiente para obtenção de valores mais precisos do gradiente de pressão para escoamentos anular.

Cheremisinoff e Davis (1979 apud NAJI, 2011) desenvolveram correlações que foram obtidas a partir de experimentos em escoamentos estratificados, mas que podem também ser utilizadas para a determinação do fator de atrito interfacial em escoamentos anulares, apresentando incertezas relativamente baixas. Nesta correlação, o número de Reynolds da mistura é a única variável de entrada, cuja definição é diferente da utilizada por escoamentos monofásicos. Na mesma época, Tsiklauri, Besfamiliny e Baryshev (1979 apud NAJI, 2011) apresentaram uma correlação semelhante a de Cheremisinoff e Davis (1979), corrigindo para seu escoamento anular as constantes e mantendo a mesma definição de número de Reynolds do líquido.

Hewitt (1981 apud PEDRAS, 1993) desenvolveu uma correlação para determinar o fator de atrito interfacial utilizando o modelo de rugosidade aparente (ARM) descrito por Wallis (1969). Esta correlação tem como variável base o fator de atrito da parede monofásico da fase líquida para o cálculo do fator de atrito interfacial em escoamento anular

Lee e Bankoff (1983 apud NAJI, 2011) realizaram experimentos utilizando um tubo inclinado com o líquido escoando em contracorrente ao escoamento do gás. Eles desenvolveram duas correlações relativamente mais complexas que as desenvolvidas anteriormente para escoamento estratificado, apresentando como fator determinante os números de Reynolds do gás e do líquido, sendo cada uma delas aplicável para diferentes faixas de valores para os números de Reynolds do líquido.

Laurinat, Hanratty e Dallman (1984) utilizaram em seus experimentos tubos inclinados próximos à horizontal para interpretar correlações que foram desenvolvidas para escoamentos verticais, a priori. Com a realização destes experimentos, os autores relacionaram o fator de atrito interfacial com o número de Reynolds da superfície de líquido, em diferentes velocidades de escoamento do gás nas regiões de escoamento (estratificado, anular, intermitente e transição de estratificado para anular), e concluíram que o fator de atrito interfacial não depende da quantidade de líquido sendo arrastado pelo gás, mas sim das propriedades do filme de líquido.

Através de dados experimentais baseados em balanço de forças no escoamento de gás, Dukler, Smith e Chopra (1984) observou as correlações de Wallis (1969) e sugeriu que a correlação para escoamento anular rugoso (RAF, do inglês

Rough Annular Flow) fosse somente utilizada quando a espessura de filme for proporcional à rugosidade da interface independente do fluxo de gás. Ele comparou também as correlações propostas por Wallis (1969) e Bharathan (1979), ambas dependentes da espessura de filme de líquido, colocando o fator de atrito interfacial em função do número de Reynolds do líquido para escoamento anular. Ele descreveu que afirmar que o fator de atrito interfacial depende somente da espessura de filme é uma expressão limitada para apenas algumas configurações de escoamento, demonstrando então a importância que o número de Reynolds tem na determinação do fator de atrito interfacial.

Kim, Lee e Bankoff (1985) realizaram experimentos com tubos inclinados em uma grande variedade de ângulos no intervalo de 4° a 87° , utilizando água e vapor d'água como em processos semelhantes aos ocorridos em um condensador, nos quais o escoamento é estratificado e contracorrente. Através de seus experimentos, eles constataram que o número de Froude é melhor que o número de Reynolds como número adimensional para descrever a velocidade do gás. Considerando o escoamento adiabático eles encontraram correlações para escoamentos horizontal e vertical, que foram submetidas à comparação contra dados experimentais e com as correlações de Linehan (1968), Theofanous, Houze e Johns (1975) e Ellis e Gay (1959).

Abolfadl e Wallis (1985 apud PEDRAS, 1993) sugeriram que o fator de atrito interfacial para escoamento anular fosse calculado estendendo-se a tensão superficial do gás até a interface, através da distribuição do comprimento de mistura do escoamento central, utilizando as ideias de Prandtl para o conceito de comprimento de mistura. Owen, Hewitt e Bott (1985 apud PEDRAS, 1993) observaram que, similar ao escoamento monofásico, se o fluxo de gás aumentar existe uma tendência de que a tensão interfacial aumente, em contrapartida o fator de atrito interfacial diminui, em escoamentos com vazões mássicas elevadas. Isso ocorre devido à diminuição da espessura de filme, diminuindo as frequências das ondas que se propagam sobre o filme.

Zabaras, Dukler e Moalem-Marón (1986 apud PEDRAS, 1993) observaram que em um tubo na vertical com escoamento anular a ação da tensão interfacial sobre o líquido é maior que a ação da gravidade, com isso o líquido consegue fluir no mesmo sentido do gás (ascendente) e não para baixo (descendente). Eles constataram que quanto maior for a espessura de filme de líquido, a porção de líquido próximo ao gás

subirá, enquanto que a porção de líquido mais próximo à parede do tubo sofrerá a ação da força da gravidade e descerá, com isto a tensão de cisalhamento irá mudar de direção. Estas são características encontradas em escoamentos transicionais.

Crowley, Wallis e Rothe (1986 apud NAJI, 2011) relacionaram o atrito interfacial com o atrito de parede da fase gasosa, como já havia sido realizado por outros autores. Mas, eles propuseram suas próprias relações, utilizando a espessura de filme de líquido como fator determinante para escoamento anular com óleo e gás. Kowalski (1987 apud TORRES, 1992) realizou experimentos medindo o gradiente de pressão, a fração de gás e a tensão de cisalhamento do gás junto a parede. A tensão de cisalhamento foi deduzida através da extrapolação do perfil de tensões cisalhantes de Reynolds, obtido a partir de um anemômetro de filme quente. Com isso, obteve os fatores de atrito na interface e do gás e do líquido na parede. Para calcular o fator de atrito do gás na parede ele utilizou a correlação de outro autor, mas para a obtenção dos fatores de atrito interfacial e do líquido na parede, ele sugeriu outras novas correlações: uma para estratificado liso e outra para estratificado ondulado.

Hamersma e Hart (1987) propuseram uma correlação, utilizada para determinar a rugosidade interfacial, que pode ser utilizada para determinar o fator atrito interfacial de escoamentos anular e estratificado através da equação implícita de Colebrook-White (COLEBROOK; WHITE, 1937). Na mesma época, Andritsos e Hanratty (1987 apud TORRES, 1992) realizaram experimentos em escoamentos estratificados na horizontal para determinar o fator de atrito interfacial, assumindo a interface como sendo plana e aplicando balanços de energia no escoamento do gás, para diferentes gradientes de pressão e espessura de filme de líquido. Com base nestes dados obtidos, eles propuseram correlações para o fator de atrito interfacial.

Jensen (1987) realizou uma comparação dos perfis de velocidade dos escoamentos anulares analisados por vários autores e classificou o perfil de velocidade em duas regiões: a região que se refere ao filme de líquido e a região que se refere ao fluido que escoar no centro. Com dados de laboratório, ele calculou as vazões mássicas do gás e do líquido, após integração obteve os perfis de velocidade e realizou comparações com os perfis de velocidade obtidos pelos outros autores. Ele utilizou três perfis de velocidade para o líquido, obtendo os melhores resultados para o perfil de velocidade desenvolvido por Dobran (1983 apud JENSEN, 1987), denominado perfil duplo de velocidades (*double velocity profile*). Para o escoamento do gás, o au-

tor desenvolveu um perfil de velocidade que leva em consideração o fator de atrito interfacial e quantidade de gotas de líquido no gás. Em seu experimento, ele observou que quanto maior a quantidade de líquido disperso como gotas no gás, menor será a turbulência no gás.

Baker, Nielson e Gabb (1988 apud NAJI, 2011), semelhante a Hamersma e Hart (1987), correlacionaram equações para se obter uma rugosidade interfacial entre os fluidos. Através desta rugosidade é possível determinar o fator de atrito interfacial utilizando correlações, para o fator de atrito na parede da fase gasosa, disponíveis na literatura para escoamentos monofásicos. Na literatura é possível encontrar outras correlações, para o fator de atrito interfacial, desenvolvidas pelo autor.

Hart, Hamersma e Fortuin (1989) realizaram experimentos, para escoamentos estratificado-ondulado na horizontal, utilizando uma mistura gás-água com etileno glicol. Eles obtiveram um melhor ajuste para o perímetro molhado na parede do tubo, apresentando um valor cerca de 80% superior ao utilizar a mistura gás-água sem o etileno glicol. Desenvolveram um modelo do escoamento no interior do tubo para obter por cálculo a perda de carga e a fração de gás em escoamentos horizontais ou próximos da horizontal para escoamento estratificado mas que podem ser utilizados para escoamento anular. Este modelo representava o líquido como um arco, sem que o escoamento fechasse a circunferência total do tubo. O autor utilizou as correlações de Eck (1973 apud HART; HAMERSMA; FORTUIN, 1989) para calcular o fator de atrito do gás com a parede do tubo e com a interface. Segundo ele, foi possível obter uma correlação empírica mais ajustada do que a proposta por Hamersma e Hart (1987), apresentando valores mais próximos dos valores reais obtidos em escoamentos horizontais.

Xiao et al. (1990 apud NAJI, 2011) apresentaram estudos diferenciados dos autores anteriormente descritos, propondo um modelo mecanicista para ser utilizado em escoamentos horizontais, ou próximos à horizontal. Este modelo tem por objetivo a determinação do padrão de escoamento existente no interior do tubo, demonstrando a relação entre a queda de pressão e a defasagem do líquido em relação ao gás, para escoamentos estratificado, intermitente, anular e bolhas dispersas. Eles realizaram comparações com alguns dos modelos empíricos descritos anteriormente, obtendo uma maior precisão para seu modelo, que é aplicado exclusivamente para escoamentos horizontais ou próximos da horizontal para escoamento estratificado ou anular.

Pedras (1993) afirmou que as propriedades da estrutura da interface determina a interação entre as fases, a qual varia com as propriedades dos fluidos e com as do escoamento. Assim como outros autores, ele utilizou como base o modelo de rugosidade aparente de Wallis (1969). O autor realizou experimentos variando a espessura de filme, desenvolvendo um equacionamento para obter a tensão de cisalhamento para escoamento anular transicional e para escoamento anular rugoso (ARM). Segundo o autor, o arraste de gotas de líquido está diretamente ligada ao fator de atrito interfacial, uma vez que as gotas de líquido dispersas no gás são formadas pelo líquido que se despreendem das cristas das ondas do filme de líquido, com isso, as gotas obtêm a velocidade de escoamento do gás. Por outro lado, as gotas dispersas também tendem a se depositar no filme de líquido. Com estes fenômenos, o gás transfere quantidade de movimento para o líquido. Em comparação com o escoamento sem o arraste de gotas, a tensão de cisalhamento na parede aumenta e a tensão de cisalhamento na interface diminui. Com estes experimentos, ele mostrou que a gravidade pode ser desconsiderada para a obtenção do fator de atrito interfacial.

Com uma base de dados adquirida a partir de estudos anteriores, Paras, Vlachos e Karabelas (1994) realizaram experimentos com tubos na horizontal e inclinados até 45° para escoamentos estratificados. Segundo o autor, as correlações obtidas para tal escoamento podem ser utilizadas em escoamentos anulares para base de dados. Com estes experimentos, os autores estimaram o fator de atrito interfacial utilizando o número de Reynolds da superfície de líquido.

Fukano e Furukawa (1998) realizaram experimentos com escoamento anular ascendente na vertical, alterando a viscosidade cinemática do líquido por meio de uma mistura de água e glicerol, com a promessa de resultados mais precisos. Através dos dados medidos do fator de atrito interfacial, eles realizaram comparação de sua correlação com as de outros autores.

Petalas, Aziz et al. (2000 apud NAJI, 2011), semelhante a Xiao et al. (1990), desenvolveram um modelo mecanicista cuja promessa é ser mais preciso e abrangente que os modelos empíricos desenvolvidos anteriormente para escoamento anular e estratificado. Eles afirmam que isso deve ao fato de que os experimentos realizados em estudos anteriores eram limitados para determinados fluidos e para inclinações específicas, produzindo um erro maior quando utilizados fora das condições originais. Como exemplo, eles utilizam uma correlação empírica de experimentos re-

alizados com ar e água para calcular as variáveis em escoamento de reservatórios de petróleo, ou ainda para diâmetros de tubos diferentes do utilizado originalmente no desenvolvimento da sua correlação.

Fore, Beus e Bauer (2000) já haviam realizado estudos prévios sobre os escoamentos bifásicos anular por volta de 1979, mas só em 2000 foi que eles propuseram uma correlação para o fator de atrito interfacial atualizando a correlação de Wallis (1969), combinando os dados obtidos anteriormente com outros dois experimentos mais modernos e abrangentes. Esta correlação foi embasada em escoamentos em transição ou completamente rugosos determinado por Wallis (1969) (ARM). Além de seus dados obtidos em experimentos, eles utilizaram dados experimentais de outros autores e realizaram comparação de sua correlação, com a correlação desenvolvida por Wallis (1969), a qual demonstrou ser mais precisa para espessuras de filme de líquido mais finas.

Wongwises e Kongkiatwanitch (2001) apresentaram uma correlação para determinar o fator de atrito interfacial em escoamento anular vertical. Os diferenciais em seu experimento estão na utilização de espessuras de filmes relativamente elevadas, por considerar em sua correlação as gotículas de líquido arrastadas pelo gás e utilizar elétrodos anulares calibrados e montados no mesmo nível da parede do tubo para medir a espessura de filme. Além de seus dados obtidos em experimentos, eles utilizaram dados experimentais de outros autores e realizaram comparação de sua correlação, com a correlação desenvolvida por Wallis (1969), a qual demonstrou ser mais precisa para escoamento com espessuras de filme de líquido mais finas.

Asante et al. (2002 apud NAJI, 2011) optaram em realizar seus próprios experimentos para a definição de sua correlação, utilizando como fluidos ar-água e ar-óleo. Apesar de seus experimentos serem realizados para escoamentos estratificados e de gotas dispersas, alguns autores ainda utilizaram esta correlação para escoamento anular obtendo valores significativos. Naji (2011) desenvolveu uma correlação para o fator de atrito interfacial. Para demonstrar a precisão de sua correlação, realizou um estudo comparativo com várias correlações para o cálculo do fator de atrito interfacial, contra dados experimentais. Para isto, determinou o desvio médio entre todos os valores calculados em relação aos dados experimentais, obtendo um erro relativo para cada correlação, constatando que sua correlação era extremamente mais precisa que as demais analisadas neste estudo em escoamentos anulares.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia para realização do trabalho proposto. Inicialmente, apresenta-se uma breve descrição do escoamento anular e suas variáveis. Na sequência são apresentadas as correlações encontradas para determinação do fator de atrito interfacial, observando suas aplicações e limitações. Por fim, apresenta-se o método de análise destas correlações.

3.1 O ESCOAMENTO ANULAR E SUAS VARIÁVEIS

No escoamento anular, vide Figura 3, o gás escoa no centro do tubo com velocidade U_G que é superior à velocidade do líquido U_L , na forma de filme de espessura H_F . Este líquido escoa na periferia do tubo, exercendo tensão de cisalhamento $\tau_{W,F}$, que em contato com o gás exerce uma tensão interfacial τ_i , qual depende do fator de atrito interfacial C_{fi} . R_D representa a fração de gotículas de líquido no gás e R_F representa a fração de filme de líquido. O diâmetro hidráulico do gás $D_G = D - 2H_F$ e o perímetro da interface $S_i = D_G\pi$ dependem da espessura de filme, por outro lado, $S_L = \pi D$ corresponde ao perímetro do tubo. A área ocupada pelo gás é dada por $A_G = \pi D_G^2/4$ e a área ocupada pelo filme de líquido é dada por $A_L = A - A_G$. Considerando que o escoamento ocorre num tubo de diâmetro interno D , de comprimento L e a área de seção transversal do tubo $A = \pi D^2/4$.

Considerando K umas das fases do escoamento, podendo ser a fase líquida L ou a fase gasosa G , torna-se necessário também definir na sequência as principais variáveis relacionadas ao escoamento bifásico, para se ter uma maior clareza e concisão ao longo do texto.

Fração da fase α_K - É definida pela razão da área transversal ocupada pela fase A_K e pela área transversal do tubo A :

$$\alpha_K = A_K/A \quad (1)$$

Velocidade da fase U_K - É definida pela razão entre a vazão volumétrica da fase Q_K e a área transversal da fase A_K :

$$U_K = Q_K/A_K \quad (2)$$

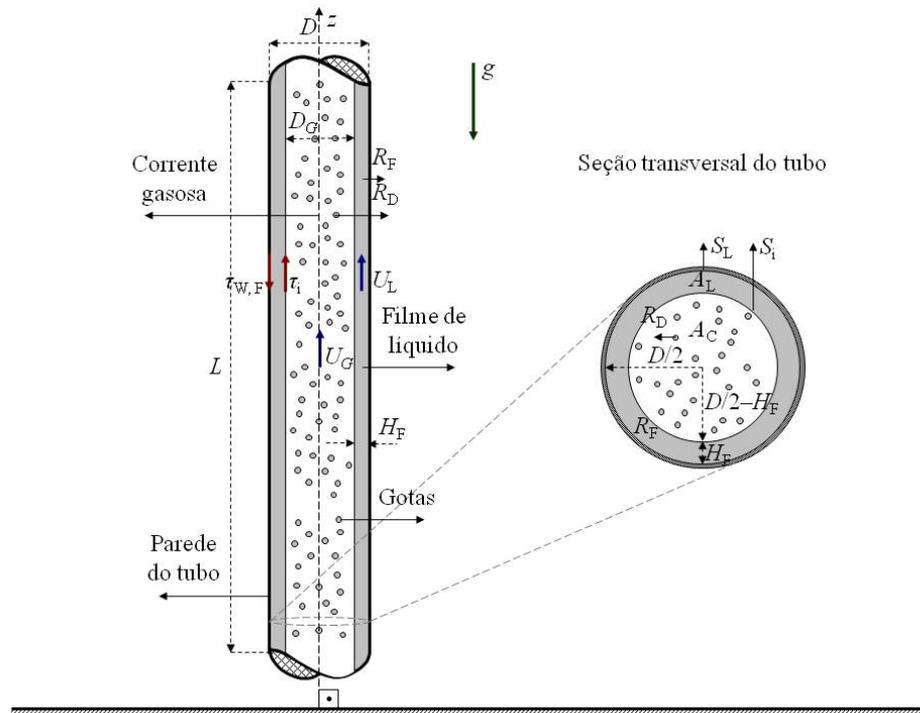


Figura 3 – Representação esquemática do escoamento anular e suas variáveis.
Fonte: Adaptada de Lima (2011).

Velocidade superficial da fase U_{SK} – É definida pela razão entre a vazão volumétrica da fase e a área da seção transversal do tubo, representando a velocidade que a fase teria se estivesse escoando sozinha no tubo:

$$U_{SK} = Q_K / A \quad (3)$$

Massa específica da fase gasosa ρ_G - Definida pela equação de estado de gás ideal em função da pressão do gás P_G e a temperatura média do escoamento T :

$$\rho_G = P / (RT) \quad (4)$$

Massa específica da fase líquida ρ_L - É definido pelo inverso do volume específico, o qual está representado em Moran, Shapiro e Neto (2009).

Número de Reynolds da fase Re_K - É definido em função do diâmetro hidráulico da fase D_K , da massa específica da fase ρ_K , da velocidade da fase U_K e da viscosidade dinâmica da fase μ_K :

$$Re_K = \rho_K U_K D_K / \mu_K \quad (5)$$

Sendo μ_L a viscosidade dinâmica da fase líquida e μ_G a viscosidade dinâmica da fase gasosa, encontradas em Fox, McDonald e Pritchard (2006).

Velocidade de deslizamento U_{gj} - É definida em função do número do Reynolds do líquido Re_L e velocidade superficial do líquido U_{SL} :

$$U_{gj} = \left(\frac{1}{1,225 \times 10^{-3} Re_{SL}^{0,56}} - 1 \right) U_{SL} \quad (6)$$

Número de Reynolds de deslizamento Re_{gi} - É definido em função da massa específica do líquido, do diâmetro do tubo, da velocidade de deslizamento e da viscosidade dinâmica do líquido:

$$Re_{gi} = \rho_L D U_{gj} / \mu_L \quad (7)$$

Número de Reynolds superficial da fase Re_{SK} - É definido em função da massa específica da fase, do diâmetro do tubo, da velocidade da fase superficial e viscosidade dinâmica da fase:

$$Re_{SK} = \rho_K D U_{SK} / \mu_K \quad (8)$$

Espessura de filme adimensional δ_F - É definida pela razão de espessura de filme e diâmetro interno do tubo:

$$\delta_F = H_F / D \quad (9)$$

Fator de atrito na parede com a fase gasosa C_{fg} - É definida em função da vazão mássica do gás $\dot{m}_G = Q_G \rho_G$, do perímetro do líquido e viscosidade dinâmica do gás:

$$C_{fg} = 0,046 \left(\frac{D_G U_G}{\nu_G} \right)^{-2} \quad (10)$$

Onde $\nu_G = \mu_G / \rho_G$ é a viscosidade cinemática do gás.

Tensão de cisalhamento interfacial τ_i - É definida em função do fator de atrito interfacial C_{fi} , da massa específica do gás, da velocidade superficial do gás e da fração de vazio:

$$\tau_i = \frac{C_{fi} \rho_G U_{SG}^2}{2\alpha^2} \quad (11)$$

3.2 CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE ATRITO INTERFACIAL

Foram encontrados vários trabalhos na literatura que apresentaram correlações para o fator de atrito interfacial, conforme apresentado na Tabela 1. Estes trabalhos procuraram demonstrar as vantagens de seu método, em sua maioria, realizaram

algum tipo de comparação com outros métodos. Por exemplo, o trabalho de Naji (2011) que realizou comparações entre 24 correlações, incluindo a desenvolvida pelo próprio. Neste trabalho é realizada uma análise comparativa considerando 32 correlações, incluindo a maioria das utilizadas na análise realizada por Naji (2011). A comparação é importante para demonstrar o desempenho das correlações em escoamento anular transicional na vertical .

Tabela 1 – Correlações para o fator de atrito interfacial em escoamentos gás-líquido.

Autor	C_{fi}	Num.
Gazley (1948)	C_{fg}	C1
Ellis e Gay (1959)	$1,29\text{Re}_G^{-0,57}$	C2
Schlichting e Gersten (1960)	$\frac{0,25}{\left(2 \log_{10} \frac{2}{2,3\delta_F} + 1,74\right)^2}$	C3
Chien e Ibele (1964)	$1,2\delta_F^{0,485}$	C4
Linehan (1968)	$0,0131 + 0,23 \times 10^{-5}\text{Re}_L$	C5
Wallis (1969)	$0,005(1 + 300\delta_F)$	C6
Moeck (1970)	$0,005 \left[1 + 1458\delta_F^{1,42}\right]$	C7
Eck (1973)	$\frac{0,0625}{\left[\log_{10} \left(\frac{15}{\text{Re}_G} + \frac{2,3\delta_F}{3,715}\right)\right]^2}$	C8
Taitel e Dukler (1976)	$0,046\text{Re}_L^{-0,2}$	C9
Cheremisinoff e Davis (1979)	$0,008 + 2 \times 10^{-5}\text{Re}_{SL}$	C10
Tsiklauri, Besfamiliny e Baryshev (1979)	$0,0055 + 2,6 \times 10^{-5}\text{Re}_L$	C11
Hewitt (1981)	$C_{fL} \left[1 + 24 \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{1/3} \delta_F\right]$	C12
Bharathan e Wallis (1983)	$0,005 + 406\delta_F^{2,04}$	C13
Lee e Bankoff (1983)	$0,012 + 2,694 \times 10^{-7}\text{Re}_{LE}$	C14
Laurinat, Hanratty e Dallman (1984)	$C_{fL} \left(2 + \frac{2,5 \times 10^{-5}\text{Re}_L}{D}\right)$	C15
Kim, Lee e Bankoff (1985)	$(0,025 + 0,16 \times 10^{-5}\text{Re}_L)$	C16
Abolfadl e Wallis (1985)	$0,0072\delta_A^5 [0,25 \ln \xi - A_m]^{-2}$	C17
Crowley, Wallis e Rothe (1986)	$C_{fL} (1 + 75\delta_F)$	C18
Kowalski (1987)	$0,079\text{Re}_G^{-0,25}$	C19
Hamersma e Hart (1987)	$0,25 \left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon_h}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re}_G^{0,9}}\right)\right]^{-2}$	C20
Andritsos e Hanratty (1987)	$C_{fg} \left[1 + 15\sqrt{\delta_F} \left(\frac{U_{SG}}{U_{SGT}} - 1\right)\right]$	C21
Baker, Nielson e Gabb (1988)	$0,25 \left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon_b}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re}_G^{0,9}}\right)\right]^{-2}$	C22
Hart, Hamersma e Fortuin (1989)	$C_{fg} \left(0,00926\text{Re}_{SL}^{0,726}\right)$	C23
Xiao et al. (1990)	$0,053N_{GV}^{0,23} N_{LV}^{0,202} N^{-0,46} N_L^{0,076}$	C24
Pedras (1993)	$-7,8 \times 10^{-3} + 52 \frac{\rho_G}{\rho_L} (1 - \sqrt{\alpha_p}) \text{Reg}^{0,4}$	C25
Paras, Vlachos e Karabelas (1994)	$0,022 + 3,7 \times 10^{-6}\text{Re}_{SL}$	C26
Fukano e Furukawa (1998)	$0,425(12)^{-1,33}(1 + 12\delta_F)^8$	C27
Petalas, Aziz et al. (2000)	$C_{fg} \left[0,24 \left(\frac{\sigma}{\rho_G U_{SG}^2 D_G}\right)^{0,085} \text{Reg}^{0,305}\right]$	C28
Fore, Beus e Bauer (2000)	$0,005 \left\{1 + 300 \left[\left(1 + \frac{17500}{\text{Re}_G}\right) \delta_F - 0,0015\right]\right\}$	C29
Wongwises e Kongkiatwanitch (2001)	$17172\text{Re}_{SG}^{-0,768} \delta_F^{-0,253}$	C30
Asante et al. (2002)	$0,61 \left(\varepsilon^{0,35} H_F^{0,61} \text{Re}_G^{-0,52} \text{Re}_L^{0,6}\right) + 0,32$	C31

(continua)

**Tabela 1 – Correlações para o fator de atrito interfacial em escoamentos gás-líquido.
(continuação)**

Autor	C_{fi}	Num.
Naji (2011)	$C_{fL} \left(\frac{\rho_L U_L^2}{\rho_G U_G^2} \right) \left(\frac{D_G}{S_L} \right)$	C32

Fonte: Autoria própria

Na correlação C12, C_{fL} representa o fator de atrito da fase líquida com a parede do tubo, determinado por:

$$C_{fL} = 0,046 \left(\frac{DU_L}{\nu_L} \right)^{-2} \quad (12)$$

O Re_G^* é um número de Reynolds do gás em função do Reynolds do líquido. Na correlação C14, Lee e Bankoff (1983) utilizou Reynolds Re_{LE} em função do Reynolds do gás, Reynolds do líquido e em função do Re_G^* :

$$Re_G^* = 1,837 \times 10^5 Re_L^{-0,184} \quad (13)$$

$$Re_{LE} = (Re_G - Re_G^*) \left(\frac{Re_L}{1000} \right)^{1,534} \quad (14)$$

Na correlação C17, $\delta_A = 1 - 2H_F/D$ em função da espessura de filme e diâmetro do tubo. A_m e ξ são definidos pelas equações:

$$A_m = \frac{1}{3}(\delta_A)^{1,5} - \frac{1}{2} \tan^{-1}(\delta_A)^{0,5} \quad (15)$$

$$\xi = [1 + (\delta_A)^{0,5}]/[1 - (\delta_A)^{0,5}] \quad (16)$$

Na correlação C20, ε_H é a rugosidade do filme de líquido na interface utilizada por Hamersma e Hart (1987) sendo definida pela equação:

$$\varepsilon_H = 2,3H_F \quad (17)$$

Na correlação C21, U_{SGT} é a velocidade superficial do gás em transição que identifica o surgimento de grandes ondas irregulares é definida pela equação:

$$U_{SGT} = 5 \left(\frac{\rho_{G0}}{\rho_G} \right)^{1/2} \quad (18)$$

Sendo ρ_{G0} a massa específica do gás a pressão atmosférica.

Na equação C22, ε_b é a rugosidade da superfície líquida na interface utilizada por Baker, Nielson e Gabb (1988) sendo definida pela equação:

$$\varepsilon_b = \frac{34\sigma}{\rho_G U_L^2} \quad (19)$$

Onde σ é a tensão superficial da água em contato com o ar, definido por:

$$\sigma = (-0,166T + 76,12)10^{-3} \quad (20)$$

Na equação C24, N representam números adimensionais utilizados, definidos pelas equações:

$$N_{GV} = U_G^4 \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma}} \quad (21)$$

$$N_{LV} = U_L^4 \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma}} \quad (22)$$

$$N_d = d \sqrt{\frac{\rho_L g}{\sigma}} \quad (23)$$

$$N_L = \mu_L^4 \sqrt[4]{\frac{g}{\rho_L \sigma^3}} \quad (24)$$

3.3 MÉTODO DE ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES

A análise da precisão das correlações apresentadas na Tabela 1 baseia-se na raiz do valor quadrático médio (*RMS*, do inglês Root Mean Square), referente ao desvio relativo ϵ_R entre o valor calculado e medido para o fator de atrito interfacial, C_{fi} , para os N pontos experimentais, definidos de acordo com (NAJI, 2011) por:

$$\epsilon_R = \frac{[(C_{fi})_{calculado} - (C_{fi})_{medido}]}{(C_{fi})_{medido}} \quad (25)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \epsilon_R^2} \quad (26)$$

As correlações para calcular o fator de atrito interfacial propostas pelos respectivos autores foram desenvolvidas para escoamentos com valores diferentes de espessura de filme, velocidade dos fluídos, inclinação e fluídos presentes no escoamento, por isso, podendo ter resultados mais próximos dos medidos nos experimentos. A Tabela 2 apresenta uma comparação qualitativa entre as correlações, demonstrando as suas principais particularidades:

Tabela 2 – Variáveis das correlações.

Correlação	Fluídos utilizados	Escoamento	Variáveis	Inclinação
C1	Água-ar	Anular	C_{fg}	0°
C2	Água-ar	Anular/estratificado	Re_G	0° a 90°
C3	Água-ar	Estratificado	δ_F	0° a 45°
C4	Água-ar	Anular/estratificado	δ_F	0° a 90°
C5	Água-ar	Anular/estratificado	Re_L	0° a 90°
C6	Água-ar	Anular	δ_F	0° a 90°
C7	Água-ar	Anular	δ_F	0° a 90°
C8	Óleo-água	Anular/estratificado	$Re_G; \delta_F$	0° a 90°
C9	Água-ar	Anular/estratificado	Re_L	0° a 90°
C10	Água-ar	Anular	Re_{SL}	90°
C11	Água-ar	Anular	Re_L	0° a 90°
C12	Água-ar	Anular/estratificado	$\delta_F; \rho_k$	0° a 45°
C13	Água-ar	Anular/estratificado	δ_F	0° a 45°
C14	Água-ar	Estratificado	Re_{LE}	0° a 45°
C15	Água-ar	Anular	$C_{fg}; Re_L; D$	90°
C16	Água-vapor	Estratificado	Re_L	4° a 87°
C17	Água-ar	Anular	(a)	(b)
C18	Líquido-gás	Anular	$C_{fL}; \delta_F$	(b)
C19	Líquido-gás	Estratificado	Re_G	(b)
C20	Água-ar	Anular	$Re_G; \varepsilon_h$	90°
C21	Líquido-gás	Estratificado	$C_{fg}; \delta_F; U_{SG}; U_{SGT}$	0° a 45°
C22	Líquido-gás	Anular/estratificado	$\varepsilon_b; Re_G$	(b)
C23	Líquido-gás	Anular/estratificado	$C_{fg}; Re_{SL}$	0° a 45°
C24	Líquido-gás	Anular/estratificado	(a)	0° a 45°
C25	Água-ar	Anular	$\rho_K; Re_{gj}; \alpha_p$	90°
C26	Água-ar	Estratificado	$H_F; Re_{SL}$	0° a 45°
C27	Líquido-gás	Anular	δ_F	90°
C28	Líquido-gás	Anular/estratificado	(a)	(b)
C29	Água-gás	Anular	$Re_G; \delta_F$	90°
C30	Água-ar	Anular	$Re_{SG}; \delta_F$	90°
C31	Óleo/água-ar	Estratificado	(a)	0° a 45°
C32	Líquido-gás	Anular	(a)	0° a 90°

(a) Depende de mais de três variáveis.

(b) Os valores são desconhecidos.

Fonte: Autoria própria

Para realização dos cálculos, foi utilizado o programa Microsoft Office Excel 2007. Os dados experimentais de escoamento anular que foram utilizados para análise comparativa das correlações apresentadas na Tabela 1, são obtidos do trabalho do autor Pedras (1993), o qual realizou os experimentos com tubo de 27,1 mm de diâmetro na vertical, obtendo escoamento anular transicional. Os dados experimentais estão presentes na Tabela 3. Para a obtenção do fator de atrito interfacial medido, foi utilizado um balanço de energia (PEDRAS, 1993), definido como:

$$C_{fi} = \frac{D\sqrt{\alpha}}{2\rho_G} \left(\frac{U_{SG}}{\alpha} - \frac{U_{SL}}{1-\alpha} \right)^{-2} \left(-\rho_C g - \frac{dp}{dz} \right) \quad (27)$$

Tabela 3 – Dados experimentais.

U_{SL} m/s	N° –	U_{SG} (m/s)	P (Pa)	T (°C)	dP/dZ (Pa/m)	H_F (mm)	α –	C_{fi} –
0,02333	1	14,24	96299,3	23	-762,1	0,25	0,963	0,0435
0,02333	2	14,47	96765,9	23	-733,8	0,33	0,952	0,03875
0,02333	3	15,35	96653,5	23	-723,3	0,29	0,958	0,0347
0,02333	4	16,59	96671,8	23	-738,8	0,25	0,963	0,03087
0,02333	5	17,75	96552,5	23	-722,4	0,22	0,968	0,02691
0,02333	6	18,43	96166,9	24	-734,6	0,15	0,978	0,02718
0,02333	7	22,11	96190,2	24	-754,4	0,08	0,988	0,02125
0,02879	8	13,24	96335,1	22	-792,4	0,38	0,945	0,049
0,02879	9	15,16	96286,6	23	-751,3	0,25	0,963	0,03803
0,02879	10	16,99	96629,5	23	-787,7	0,2	0,971	0,03272
0,02879	11	19,42	96331,4	23	-789,4	0,19	0,972	0,02502
0,02879	12	22,39	96323	24	-951,7	0,1	0,985	0,02497
0,02879	13	23,96	96371,6	26	-992,9	0,09	0,987	0,02329
0,02879	14	25,47	96557	25	-1065,3	0,08	0,988	0,02214
0,03607	15	13,5	96417,5	25	-947	0,38	0,945	0,05692
0,03607	16	14,84	96376	25	-911,9	0,33	0,952	0,04635
0,03607	17	18,29	96421,8	24	-950,7	0,24	0,965	0,03307
0,03607	18	20,09	96468,3	24	-990	0,21	0,969	0,0289
0,03607	19	23,63	96392,8	24	-1095,6	0,16	0,976	0,02378
0,03607	20	27,38	96524,2	23	-1292,7	0,13	0,981	0,02127
0,03607	21	35,21	97007,2	24	-1701	0,09	0,986	0,01724
0,04517	22	13,33	96366,1	22	-1073	0,39	0,943	0,06516
0,04517	23	15,39	96341	22	-1051,7	0,33	0,952	0,04918
0,04517	24	17,44	96359,8	22	-1067,6	0,29	0,958	0,03953
0,04517	25	19,96	96444,7	22	-1139,6	0,23	0,966	0,03306
0,04517	26	23,07	96558,8	21	-1236,3	0,16	0,976	0,0279
0,04517	27	27,35	96720,1	21	-1457,7	0,13	0,981	0,02385
0,04517	28	35,33	97474,9	21	-2012,6	0,11	0,984	0,01963
0,05427	29	13,43	96437,1	24	-1133,1	0,34	0,95	0,0701
0,05427	30	15,41	96417,7	24	-1116,7	0,28	0,959	0,05399
0,05427	31	17,34	96442,5	24	-1137,7	0,22	0,968	0,04496
0,05427	32	20,05	96537,5	24	-1218,2	0,19	0,972	0,03634
0,05427	33	23,16	96695,1	25	-1351,8	0,16	0,976	0,03066
0,05427	34	27,36	97021,2	25	-1628,1	0,13	0,981	0,02691
0,05427	35	35,51	97681,2	25	-2187,5	0,11	0,983	0,0212
0,06337	36	13,28	97060	25	-1322	0,4	0,942	0,081
0,06337	37	15,27	97058,3	25	-1320,6	0,3	0,956	0,06411
0,06337	38	17,37	97104,3	24	-1359,6	0,26	0,962	0,05172
0,06337	39	20,29	97236,1	25	-1471,3	0,21	0,969	0,04205
0,06337	40	23,34	97448,3	25	-1651,1	0,16	0,976	0,03661
0,06337	41	27,51	97782,5	25	-1934,3	0,14	0,979	0,03096
0,06337	42	30,7	98014,1	24	-2215,3	0,12	0,982	0,02867
0,07065	43	13,29	96483,2	22	-1341,7	0,35	0,949	0,08399
0,07065	44	15,34	96479,2	22	-1338,3	0,28	0,959	0,06495
0,07065	45	17,55	96544,1	22	-1393,3	0,26	0,962	0,05184
0,07065	46	20,4	96696,9	22	-1522,8	0,21	0,969	0,04285
0,07065	47	23,48	96930,7	23	-1720,9	0,17	0,975	0,03742
0,07065	48	27,55	97289,4	23	-2024,9	0,14	0,979	0,03227
0,07065	49	30,29	97552,6	23	-2248	0,12	0,982	0,02996

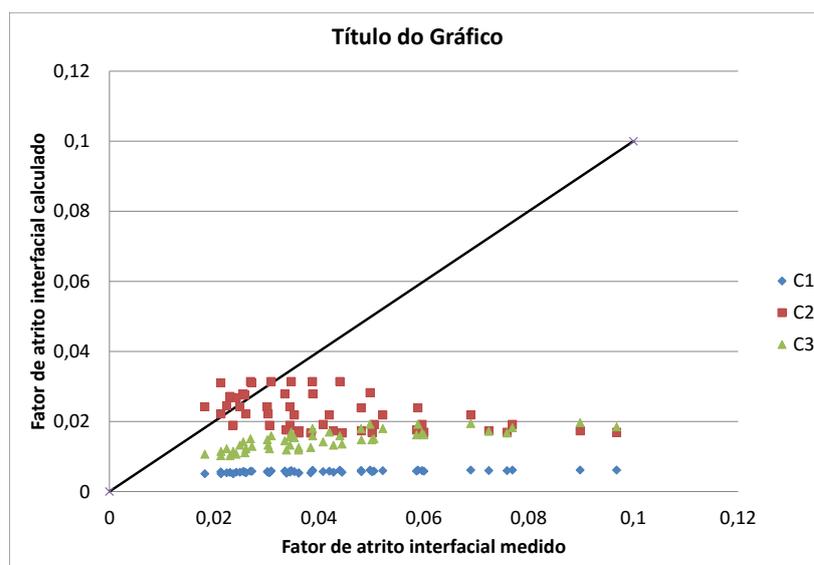
Fonte: Adaptado de Pedras (1993)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos cálculos das correlações para o fator de atrito interfacial, mostrando a comparação das correlações em relação aos valores medidos em escoamento anular transicional na vertical. Para maior compreensão, é mostrado na forma de gráficos a dispersão dos dados em comparação com os valores medidos. Por fim, os respectivos desvios relativos médios em termos do *RMS* são apresentados na Tabela 4.

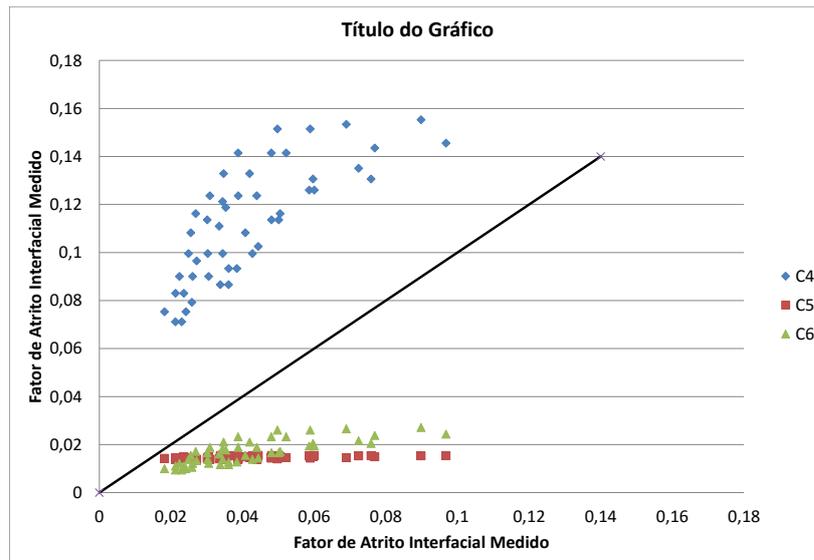
4.1 RESULTADOS EM TERMOS DE GRÁFICOS

Na sequência, são representadas em gráficos as correlações calculadas e comparadas com o fator de atrito interfacial determinado experimentalmente. É demonstrado três correlações por gráfico para melhor visualização. O eixo das abscissas representa o fator de atrito interfacial medido e o eixo das ordenadas representa as correlações calculadas. No Gráfico 1, observa-se que as três correlações presentes não demonstram crescimento do fator de atrito interfacial calculado como o medido, mas C2 demonstra estar próxima do medido para valores entre 0,02 e 0,04.



**Gráfico 1 – Valores calculados de C1, C2 e C3 em relação aos medidos.
Fonte: Autoria própria.**

No Gráfico 2, as correlações C5 e C6 demonstram comportamentos semelhantes entre elas. Ambas não aumentam o fator de atrito interfacial calculado quando aumentado o medido, em quanto que a correlação C4 demonstra um comportamento de crescimento semelhante ao medido, mas seus valores estão mais longe que as outras duas correlações.



**Gráfico 2 – Valores calculados de C4, C5 e C6 em relação aos medidos.
Fonte: Autoria própria.**

No Gráfico 3, as três correlações demonstram comportamentos semelhantes, mas a C9 demonstra mais eficiência em escoamentos com o líquido com fator de atrito interfacial entre 0,02 e 0,04.

No Gráfico 4, as correlações C10 e C12 obtiveram bons resultados onde o escoamento medido é entre 0,02 e 0,06, mas com valores superiores perderam a eficiência. A correlação C11 se demonstra com valores próximos de constantes.

No Gráfico 5, as correlações C14 e C15 demonstraram eficiência em escoamentos entre 0,02 e 0,04, mas para outros valores do fator de atrito interfacial, elas demonstraram muita dispersão. C13 demonstra dispersões nos valores para mais e para menos.

No Gráfico 6, de mesmo modo que as correlações do Gráfico 5, as correlações C16 e C18 demonstram eficiência em escoamentos com o fator de atrito entre 0,02 e 0,04, mas tendo maior RMS em escoamento com fator de atrito interfacial maior.

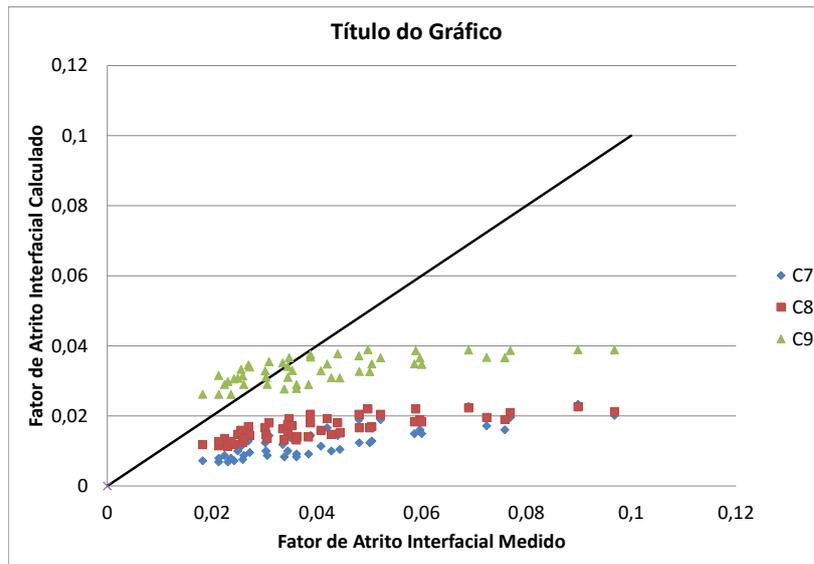


Gráfico 3 – Valores calculados de C7, C8 e C9 em relação aos medidos.
Fonte: Autoria própria.

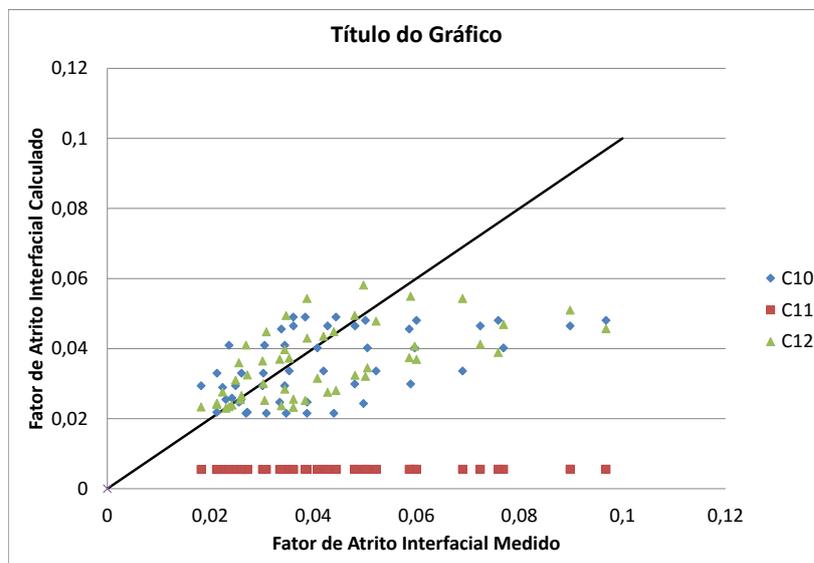
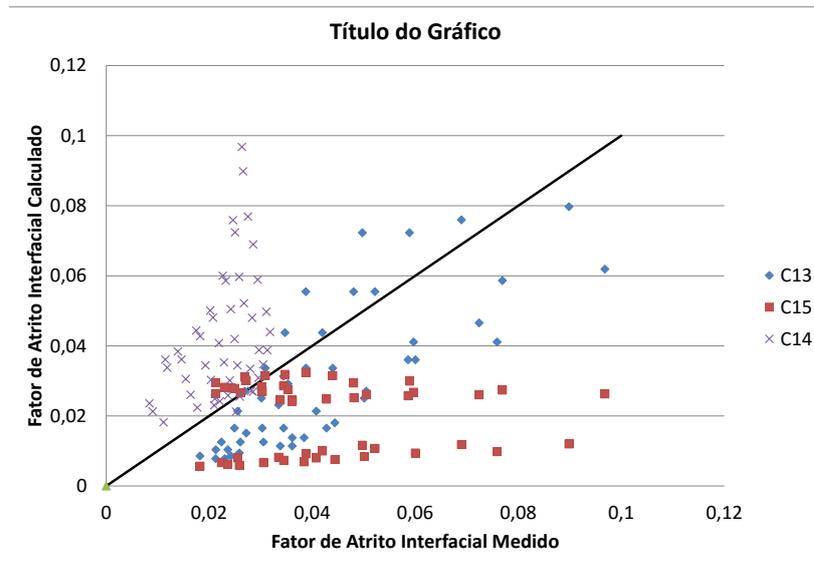


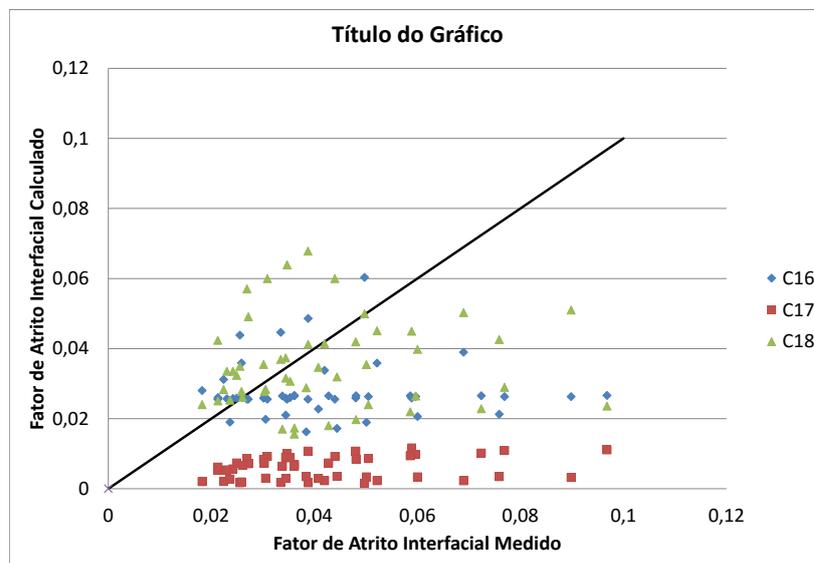
Gráfico 4 – Valores calculados de C10, C11 e C12 em relação aos medidos.
Fonte: Autoria própria.

No Gráfico 7, a correlação C20 demonstra mais proximidade que as anteriores em escoamentos com fator de atrito interfacial maiores e C19, C20 e C21 demonstram aproximação em fator de atrito interfacial entre 0,02 e 0,04.

No Gráfico 8, a correlação C22 teve alguns valores próximos da reta, mas teve



**Gráfico 5 – Valores calculados de C13, C14 e C15 em relação aos medidos.
Fonte: Autoria própria.**



**Gráfico 6 – VValores calculados de C16, C17 e C18 em relação aos medidos.
Fonte: Autoria própria.**

também outros valores dispersaram. A correlação C23 demonstrou eficácia em alguns valores do escoamento em fator de atrito interfacial maiores, mas teve muitos valores que se mantiveram distantes da reta. C24 teve alguns valores próximos do medido, mas sua maioria manteve-se superiores ao medido.

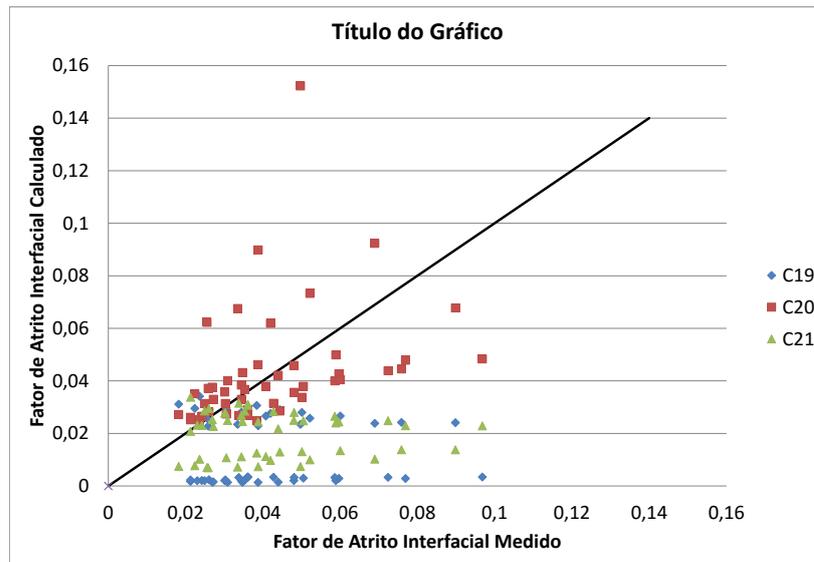


Gráfico 7 – Valores calculados de C19, C20 e C21 em relação aos medidos.
Fonte: Autoria própria.

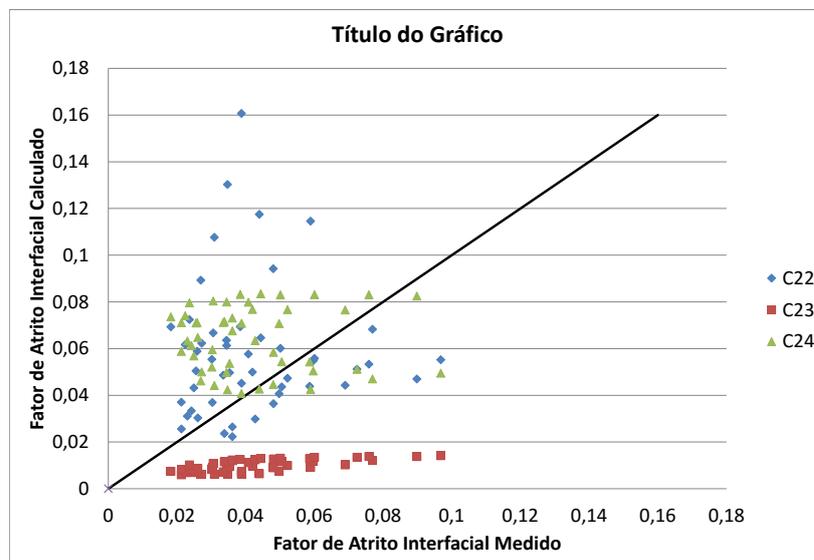


Gráfico 8 – Valores calculados de C22, C23 e C24 em relação aos medidos.
Fonte: Autoria própria.

No Gráfico 9, C25 manteve a eficiência para todos os valores, tendo alguns valores distantes, mas demonstrando melhor rendimento entre os deste trabalho. C26 demonstra precisão em valores de 0,02 a 0,03, mas se mantém constante nos outros valores enquanto que o fator de atrito medido aumenta. C27 assim como maioria dos

autores, demonstrou eficiência entre 0,02 e 0,04 de fator de atrito interfacial, mas não conseguiu demonstrar a mesma eficiência para valores maiores.

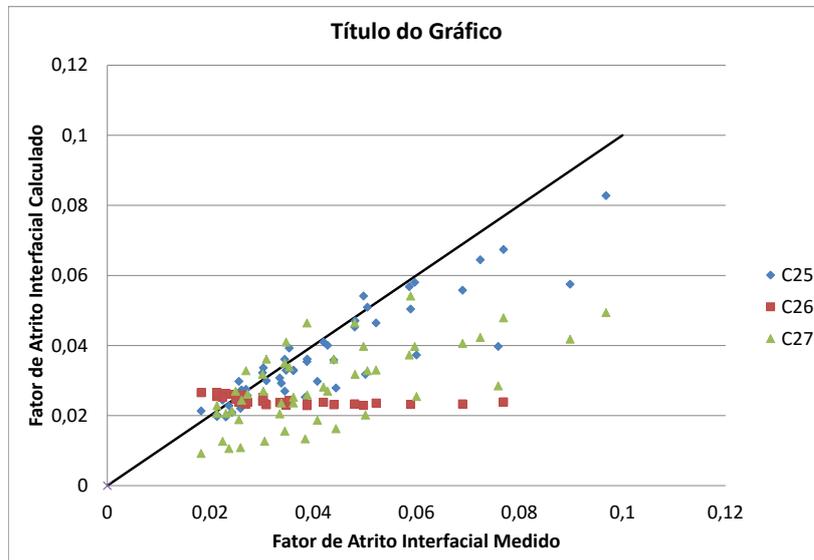


Gráfico 9 – Valores calculados de C25, C26 e C27 em relação aos medidos.
Fonte: Autoria própria.

No Gráfico 10, as correlações C28, C29 e C30 tiveram somente valores inferiores que o medido, tendo somente um ponto em que a C30 teve valor maior.

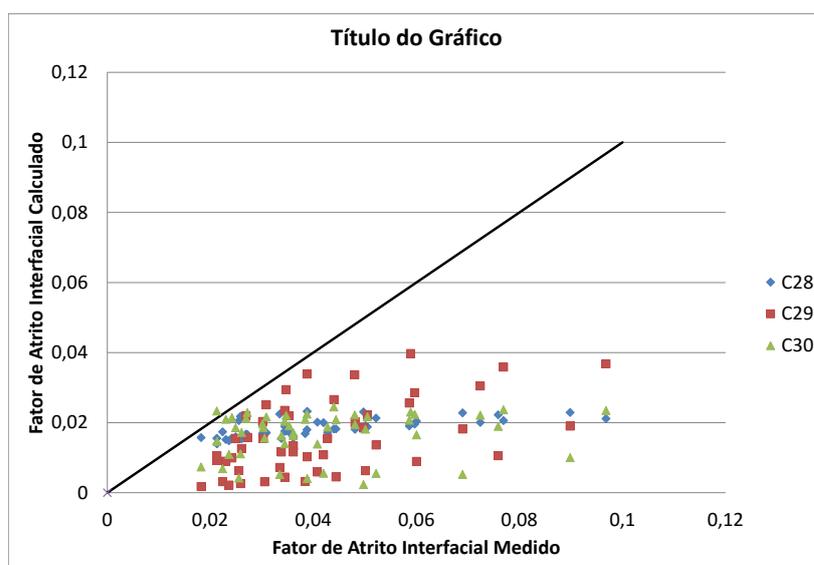
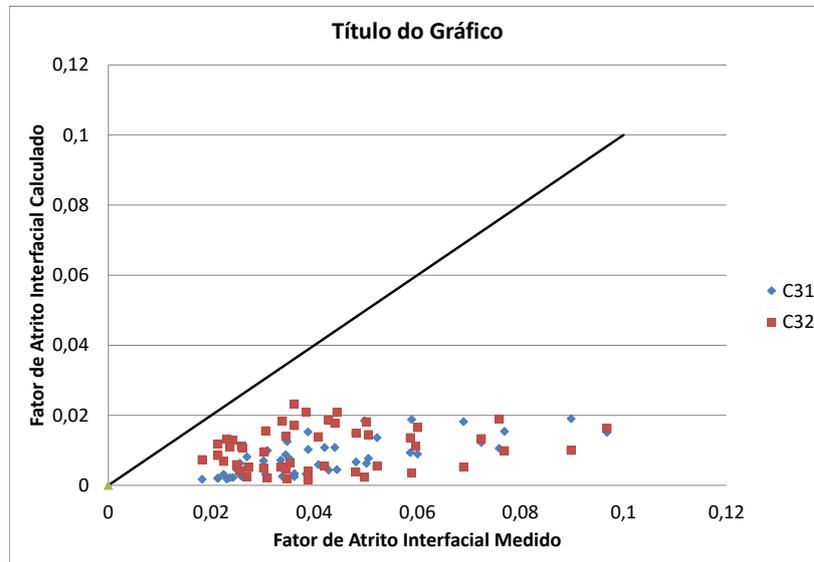


Gráfico 10 – Valores calculados de C28, C29 e C30 em relação aos medidos.
Fonte: Autoria própria.

No Gráfico 11, assim como as correlações apresentadas no Gráfico 10, ambas correlações tiveram somente valores inferiores que o medido, tendo somente um ponto em que a C30 teve valor maior que o medido.



**Gráfico 11 – Valores calculados de C31 e C32 em relação aos medidos.
Fonte: Autoria própria.**

Analisando os gráficos, pode ser ver que as correlações C4, C12, C13, C18 e C27 que obtiveram aumento do valor semelhante ao do C_{fi} medido, são em função de δ_F . As correlações que são em função diretamente do Re_L e Re_{SL} tendem ter valores com menor variação que o fator de atrito interfacial medido. Isto ocorre devido à velocidade do líquido não variar tanto quanto a velocidade de deslizamento entre as fases. O fator de atrito interfacial medido varia diretamente com a diferença de velocidade das fases. Pode se observar que a correlação C25 que é em função da velocidade de deslizamento é a correlação que têm crescimento mais próximo ao fator de atrito interfacial medido.

4.2 RESULTADOS EM TERMOS DE RMS

Através da Tabela 4 pode se identificar que as correlações que tiveram menor RMS em relação ao medido são C9, C10, C12, C13, C18, C20, C25 e C27.

Na correlação C9 o autor Taitel e Dukler (1976) desenvolveu a correlação para ambos escoamentos separados em qualquer inclinação e utilizando em sua correlação

Tabela 4 – Raiz do valor quadrático médio (RMS)

NUM.	RMS / (%)	NUM.	RMS / (%)
C1	25,4	C17	23,5
C2	13,5	C18	6,4
C3	19,1	C19	27,7
C4	49,4	C20	3,9
C5	19,1	C21	10,9
C6	17,5	C22	10,6
C7	20,3	C23	22,6
C8	17,8	C24	9,3
C9	6,1	C25	1,4
C10	4,9	C26	24,2
C11	25,5	C27	5,8
C12	4,2	C28	17,2
C13	8,2	C29	14,2
C14	28,5	C30	15,2
C15	11,6	C31	23,8
C16	11,1	C32	22,0

Fonte: Autoria própria.

variáveis utilizadas também por outros autores, mas estando em função do número de Reynolds do líquido ele que obteve menor desvio padrão médio neste trabalho.

A correlação C10 o autor a desenvolveu para escoamento similar o utilizado no trabalho, demonstrando baixo RMS sendo a correlação em função do número de Reynolds superficial do líquido.

A correlação C12 apesar de ser para escoamento separado próximo da horizontal teve resultados próximos dos medidos, tendo o terceiro menor RMS. Sendo a correlação em função da espessura de filme adimensional e as massas específicas das fases.

A correlação C13 foi desenvolvida para escoamento separado para angulações próximas da horizontal. C13 está em função da espessura de filme adimensional, a qual foi utilizada por outros autores e, mesmo não sendo uma correlação para escoamento na vertical, teve RMS menor que algumas correlações específicas de escoamento anular na vertical.

A correlação C18 foi desenvolvida para escoamentos de óleo e gás, utilizando como variáveis o fator de atrito do líquido na parede do tubo e a espessura de filme. Entretanto, teve a RMS menor que maior parte das correlações com água e ar.

Utilizando a ideia de Hamersma e Hart (1987) em C20 pode se ver que utilizar a correlação de Colebrook e White (1937) usando a correlação da rugosidade de filme

citada por Hamersma e Hart (1987), pode se obter valores próximos dos reais para escoamentos semelhantes ao utilizado neste trabalho, sendo em função do Reynolds do gás e rugosidade aparente.

O autor Pedras (1993) quem desenvolveu a correlação C25 e os experimentos utilizados neste trabalho, havia demonstrado a precisão de sua correlação para este escoamento, sendo afirmada neste trabalho, demonstrando menor RMS em comparação com as correlações utilizadas neste trabalho. A correlação C27 foi desenvolvida para escoamento anular na vertical, por consequência, demonstrou resultados satisfatórios, sendo a correlação em função de espessura de filme.

Das correlações que tiveram menor RMS, quatro delas dependem da velocidade do líquido ou da velocidade superficial do líquido; quatro dependem da espessura de filme, sendo a C18 dependente das duas, e uma equação depende da velocidade do gás.

As correlações C15, C29 e C30 têm características de escoamento anular na vertical semelhante ao utilizado no trabalho, os resultados foram com RMS maior se comparadas com as correlações de melhor desempenho. Alguns fatores que podem influenciar no RMS:

A correlação C15 foi utilizada pelo autor Laurinat, Hanratty e Dallman (1984) em escoamento contracorrente enquanto que o escoamento do experimento é cocorrente, sendo a correlação em função do fator de atrito da parede com a fase gasosa, número de Reynolds do líquido e diâmetro do tubo.

A correlação C29 foi utilizado por Fore, Beus e Bauer (2000) em escoamento com líquido e gás de diferentes densidades, pressão de escoamento maior, temperaturas maiores e número de Reynolds do líquido com valores maiores que do experimento utilizado no trabalho, o que difere do escoamento utilizado neste trabalho. Sendo a correlação em função do número do Reynolds do gás e espessura de filme.

Nos experimentos realizados por Wongwises e Kongkiatwanitch (2001) com a correlação C30, o autor utilizou velocidades do líquido muito maiores que as utilizadas neste experimento. Sendo a correlação em função do número do Reynolds superficial do gás e espessura de filme adimensional.

5 CONCLUSÕES

Pode se observar que os escoamentos anulares e estratificados têm muita similaridades se comparar o fator de atrito interfacial entre as fases, sendo o escoamento anular mais complexo para obtenção do fator de atrito interfacial em tubos na horizontal, por variar a espessura de filme no perímetro do tubo, tendo em vista que o fator de atrito interfacial depende da espessura de filme. Em escoamento separado na vertical, o único modelo de escoamento é o anular e tendo a espessura de filme relativamente à mesma em todo o perímetro do tubo, podendo assim, calcular o fator de atrito interfacial utilizando a média da espessura de filme sem trazer maiores erros de calculo.

É importante ter o conhecimento de qual correlação é a melhor para determinado escoamento, tendo em vista que a precisão do valor de tensão cisalhante interfacial está ligada diretamente com o fator de atrito interfacial. Sendo os dados comparados inicialmente em experimentos pode-se ter a ideia de qual correlação deve ser utilizada para ter a melhor aproximação dos valores reais, sem ter problemas de dimensionamento do equipamento.

Para se calcular o fator de atrito interfacial em escoamento anular na vertical alguns autores que propuseram suas correlações para escoamentos estratificados deram a sugestão que a correlação poderia ser utilizada para escoamento anular, mas talvez não tenha a mesma eficiência. Pode-se ver que algumas correlações para escoamento estratificado demonstram eficiência na determinação do fator de atrito interfacial podendo ser utilizadas, pois algumas correlações de escoamento anular não tiveram eficiência maior que as de escoamento estratificado. Para se obtenção de uma maior precisão no fator de atrito interfacial calculado é importante que a correlação utilizada seja conhecida e demonstrada sua eficiência em outros trabalhos de escoamento semelhante ao escoamento que será produzido.

Quanto maior a velocidade de deslizamento maior é a força que o gás tem para desprender o líquido das cristas das ondas, aumentando a quantidade de líquido desprendido assim maior o arraste de líquido. Quanto maior a espessura de filme maior será as ondas no filme, aumentando a área de contato entre as fases e diminuindo a área transversal da onda facilitando o desprendimento de líquido.

Maior o arraste de líquido maior será o gasto de energia para acelerar as gotas de líquido aumentando o fator de atrito interfacial. O fator de atrito interfacial depende do arraste de líquido o qual depende da velocidade de deslizamento e espessura de filme. Isto pode ser verificado através dos valores obtidos das correlações. Pode se ver que a correlação de Pedras (1993) a qual teve valores mais próximos do medido no experimento era em função da velocidade de deslizamento e da fração de vazio qual é inversamente proporcional ao filme de líquido.

Verificou-se que das correlações que tiveram melhor desempenho, todas dependiam indiretamente ou de uma das velocidades do líquido ou da espessura de líquido. Fica claro a dependência do fator de atrito interfacial com as características do escoamento do líquido em escoamento anular transicional.

Verificou-se que para escoamento transicional anular na vertical, com Reynolds do gás variando entre 20000 e 60000, a correlação de Pedras (1993) têm maior eficiência que as outras descritas neste trabalho.

Para que este trabalho demonstra-se com mais eficiência a comparação das correlações, seria interessante realizar a comparação com dados experimentais de diferentes escoamentos, sendo escoamento anular na vertical, horizontal, transicional, cocorrente e contracorrente, mostrando qual seria a melhor correlação a ser utilizada para determinado escoamento.

REFERÊNCIAS

ABOLFADL, Mohamed; WALLIS, Graham B. A mixing length model for annular two-phase flow. **PCH PhysicoChemical Hydrodynamics**, v. 6, n. 1-2, p. 49–68, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 26.

ANDRITSOS, N.; HANRATTY, T. J. Interfacial instabilities for horizontal gas-liquid flows in pipelines. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 13, n. 5, p. 583–603, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 26.

ASANTE, Ben et al. Two phase flow: accounting for the presence of liquids in gas pipeline simulation. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. **PSIG Annual Meeting**. [S.l.], 2002. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 26.

AZZOPARDI, Barry; HILLS, John. **Flow patterns, transitions and models for specific flow patterns**. [S.l.]: Springer, 2003. Citado na página 12.

BAKER, A.; NIELSON, K.; GABB, A. Pressure loss, liquid-holdup calculations developed. **Oil Gas J.:(United States)**, v. 86, n. 11, 1988. Citado 3 vezes nas páginas 20, 26 e 28.

BHARATHAN, Desikan. **Air-water countercurrent annular flow**. [S.l.], 1979. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.

BHARATHAN, D.; WALLIS, G. B. Air-water countercurrent annular flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 9, n. 4, p. 349–366, 1983. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 26.

CHEREMISINOFF, Nicholas P.; DAVIS, E. James. Stratified turbulent-turbulent gas-liquid flow. **AIChE journal**, Wiley Online Library, v. 25, n. 1, p. 48–56, 1979. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 26.

CHIEN, Sze-Foo; IBELE, W. Pressure drop and liquid film thickness of two-phase annular and annular-mist flows. **Journal of Heat Transfer**, American Society of Mechanical Engineers, v. 86, n. 1, p. 89–96, 1964. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 26.

COLEBROOK, C. F.; WHITE, C. M. Experiments with fluid friction in roughened pipes. **Proceedings of the royal society of london. series a, mathematical and Physical sciences**, JSTOR, p. 367–381, 1937. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 38.

CROWLEY, Christopher J.; WALLIS, Graham B.; ROTHE, Paul H. **State-of-the-art Report on Multiphase Methods for Gas and Oil Pipelines**. [S.l.]: Create, Incorporated, 1986. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 26.

DOBTRAN, Flavio. Hydrodynamic and heat transfer analysis of two-phase annular flow with a new liquid film model of turbulence. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Elsevier, v. 26, n. 8, p. 1159–1171, 1983. Citado na página 19.

DUKLER, A. E.; SMITH, L.; CHOPRA, A. Flooding and upward film flow in tubes—i. experimental studies. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 10, n. 5, p. 585–597, 1984. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

ECK, Bruno. **Technische stromunglehre**. [S.l.]: Springer, New York, 1973. Citado 3 vezes nas páginas 16, 20 e 26.

EL-SHANAWANY, M.; EL-SHIRBINI, A. A.; MURGATROYD, W. A model for predicting the dry-out position for annular flow in a uniformly heated vertical tube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Elsevier, v. 21, n. 5, p. 529–536, 1978. Citado na página 15.

ELLIS, S. R. M.; GAY, B. The parallel flow of two fluid streams: interfacial shear and fluid-fluid interaction. **Trans. Inst. Chem. Engrs**, v. 37, n. 4, p. 206–213, 1959. Citado 3 vezes nas páginas 15, 18 e 26.

FERREIRA, Alexandre de Andrade; AQUINO NETO, Francisco Radler de. A destilação simulada na indústria do petróleo. **Quim. Nova**, SciELO Brasil, v. 28, n. 3, p. 478–482, 2005. Citado na página 13.

FORE, L. B.; BEUS, G.; BAUER, R. C. Interfacial friction in gas–liquid annular flow: analogies to full and transition roughness. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 26, n. 11, p. 1755–1769, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 22, 26 e 39.

FOX, Robert W; MCDONALD, Alan T; PRITCHARD, Philip. **Introdução à mecânica dos fluidos**. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 2006. 715–716 p. Citado na página 24.

FUKANO, T.; FURUKAWA, T. Prediction of the effects of liquid viscosity on interfacial shear stress and frictional pressure drop in vertical upward gas–liquid annular flow. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 24, n. 4, p. 587–603, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 26.

GAZLEY, Carl. **Interfacial shear and stability in two-phase flow**. [S.l.]: publisher not identified, 1948. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 26.

HAMERSMA, P. J.; HART, J. A pressure drop correlation for gas/liquid pipe flow with a small liquid holdup. **Chemical engineering science**, Elsevier, v. 42, n. 5, p. 1187–1196, 1987. Citado 6 vezes nas páginas 19, 20, 26, 27, 38 e 39.

HART, J.; HAMERSMA, P. J.; FORTUIN, J. Correlations predicting frictional pressure drop and liquid holdup during horizontal gas-liquid pipe flow with a small liquid holdup. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 15, n. 6, p. 947–964, 1989. Citado 3 vezes nas páginas 16, 20 e 26.

HEWITT, G. F. Prediction of pressure drop in annular flow by phenomenological modeling. **Handbook of Multiphase Systems, Hemisphere, Washington**, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 26.

JENSEN, M. K. The liquid film and the core region velocity profiles in annular two-phase flow. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 13, n. 5, p. 615–628, 1987. Citado na página 19.

KIM, H. J.; LEE, S. C.; BANKOFF, S. G. Heat transfer and interfacial drag in countercurrent steam-water stratified flow. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 11, n. 5, p. 593–606, 1985. Citado 3 vezes nas páginas 15, 18 e 26.

KOWALSKI, J. E. Wall and interfacial shear stress in stratified flow in a horizontal pipe. **AIChE journal**, Wiley Online Library, v. 33, n. 2, p. 274–281, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 26.

LAURINAT, J. E.; HANRATTY, T. J.; DALLMAN, J. C. Pressure drop and film height measurements for annular gas-liquid flow. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 10, n. 3, p. 341–356, 1984. Citado 3 vezes nas páginas 17, 26 e 39.

LEE, S. C.; BANKOFF, S. G. Stability of steam-water countercurrent flow in an inclined channel: flooding. **Journal of heat transfer**, American Society of Mechanical Engineers, v. 105, n. 4, p. 713–718, 1983. Citado 3 vezes nas páginas 17, 26 e 27.

LI, Haiwang et al. A simple model for predicting the pressure drop and film thickness of non-newtonian annular flows in horizontal pipes. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 102, p. 121–128, 2013. Citado na página 15.

LIMA, Luiz Eduardo Melo. **Análise do Modelo de Mistura Aplicado em Escoamentos Isotérmicos Gás-Líquido**. 2011. 147 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 12, 13 e 24.

LINEHAN, John H. **INTERACTION OF TWO-DIMENSIONAL, STRATIFIED, TURBULENT AIR–WATER AND STEAM–WATER FLOWS**. [S.l.], 1968. Citado 3 vezes nas páginas 15, 18 e 26.

MOECK, E. O. **Annular-dispersed two-phase flow and critical heat flux**. [S.l.]: Atomic Energy of Canada Limited, 1970. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 26.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; NETO, Francesco Scofano. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. [S.l.]: LTC, 2009. 715–716 p. Citado na página 24.

NAJI, Ahmed Saib. Interfacial friction factor in horizontal and inclined annular two-phase flow in pipes. 2011. Citado 9 vezes nas páginas 15, 17, 19, 20, 21, 22, 26, 27 e 28.

OWEN, D. G.; HEWITT, G. F.; BOTT, T. R. Equilibrium annular flows at high mass fluxes data and interpretation. **PCH Physicochemical Hydrodynamics**, v. 6, n. 1-2, p. 115–131, 1985. Citado na página 18.

PARAS, S. V.; VLACHOS, N. A.; KARABELAS, A. J. Liquid layer characteristics in stratified—atomization flow. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 20, n. 5, p. 939–956, 1994. Citado 3 vezes nas páginas 15, 21 e 26.

PAUCHON, C. et al. Tacite: a comprehensive mechanistic model for two-phase flow. In: **BHRG Conference on Multiphase Production**. [S.l.: s.n.], 1993. Citado na página 11.

PEDRAS, Marcos Heinzelmann Junqueira. Atrito interfacial em escoamento anular transicional. 1993. Citado 12 vezes nas páginas 11, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 26, 29, 30, 39 e 41.

PETALAS, Nicholas; AZIZ, Khalid et al. A mechanistic model for multiphase flow in pipes. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, Petroleum Society of Canada, v. 39, n. 06, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 26.

SCHLICHTING, Herrmann; GERSTEN, Klaus. **Boundary-layer theory**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1960. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 26.

SHOHAM, Ovadia. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. [S.l.]: Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

SOUZA, R. Escoamento bifásico líquido-gás: previsão de gradientes de pressão com a correlação de lockhart martinelli and fluidodinâmica computacional. **Projeto Final de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2009. Citado na página 13.

TAITEL, Yehuda; BORNEA, Dvora; DUKLER, AE. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. **AIChE Journal**, American Institute of Chemical Engineers, v. 26, n. 3, p. 345–354, 1980. Citado na página 12.

TAITEL, Yemada; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 22, n. 1, p. 47–55, 1976. Citado 4 vezes nas páginas 12, 16, 26 e 37.

THEOFANOUS, T. G.; HOUZE, R. N.; JOHNS, D. M. Horizontal, stratified gas-liquid flow: the interfacial region. In: **AIChE Symposium on Heat Transfer, San Francisco, CA**. [S.l.: s.n.], 1975. Citado na página 18.

TORRES, Flávio Ramos. **Caracterização da interface and determinação experimental do fator de atrito interfacial em escoamentos horizontais and**

estratificados. 1992. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 19.

TSIKLAURI, G. V.; BESFAMILINY, P. V.; BARYSHEV, Yu V. Experimental study of hydrodynamic processes for wavy water film in a cocurrent air flow. In: **Two-phase Momentum, Heat and Mass Transfer**. [S.l.]: Hemisphere New York, 1979. v. 1, p. 357–372. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 26.

WALLIS, Graham B. **One-dimensional two-phase flow**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1969. v. 1. Citado 6 vezes nas páginas 16, 17, 18, 21, 22 e 26.

WONGWISES, Somchai; KONGKIATWANITCH, Wittaya. Interfacial friction factor in vertical upward gas-liquid annular two-phase flow. **International communications in heat and mass transfer**, Elsevier, v. 28, n. 3, p. 323–336, 2001. Citado 5 vezes nas páginas 14, 16, 22, 26 e 39.

XIAO, J. J. et al. A comprehensive mechanistic model for two-phase flow in pipelines. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. [S.l.], 1990. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 26.

ZABARAS, G.; DUKLER, A. E.; MOALEM-MARON, D. Vertical upward cocurrent gas-liquid annular flow. **AIChE journal**, Wiley Online Library, v. 32, n. 5, p. 829–843, 1986. Citado na página 18.