

# Engenharias Mecânica e Industrial: Gestão e Simulação

Franciele Bonatto  
Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
(Organizadores)



**Atena**  
Editora

Ano 2018

**Franciele Bonatto**  
**Henrique Ajuz Holzmann**  
**João Dallamuta**  
(Organizadores)

# **Engenharias Mecânica e Industrial: Gestão e Simulação**

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E57	Engenharias mecânica e industrial [recurso eletrônico] : gestão e simulação / Organizadores Franciele Bonatto, Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018.  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web ISBN 978-85-85107-77-2 DOI 10.22533/at.ed.772180506  1. Automação industrial. 2. Engenharia mecânica. 3. Produtividade industrial. I. Bonatto, Franciele. II. Holzmann, Henrique Ajuz. III. Dallamuta, João.  CDD 670.427
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A engenharia mecânica provavelmente seja a mais versátil de todas as engenharias. Sua gama de atuação envolve praticamente todas as atividades industriais e inúmeros temas transversais como materiais, métodos, gestão e qualidade. Temas estes que se subdividem em vários outros, o que torna a organização de um livro de engenharia mecânica é uma tarefa desafiadora, porém gratificante. Nesta obra é possível verificar a diversidade de temas envolvendo a engenharia mecânica e industrial com metodologias de simulação e gestão.

A simulação é na sua essência uma ferramenta experimental e refere-se a um modelo de realidade que nos permite avaliar e prever a dinâmica de desdobramento dentro de condições pré definidas.

É uma das bases da atividade de engenharia, sem a qual viabilidades econômicas e sobretudo de segurança em projetos de componentes e sistemas não seriam obtidas. Processos de simulação buscam melhores índices de segurança e retorno para o projeto.

Neste livro são apresentados vários trabalhos, alguns com resultados práticos, sobre simulações em vários campos da engenharia industrial, nas áreas de escoamentos, elementos de máquinas e aproveitamento energético.

Igualmente importante para a segurança, mas sobretudo para o retorno econômico de projetos, são as técnicas de gestão adequadas. São apresentados trabalhos de análise de qualidade de vida, acidentes de trabalho e melhoria contínua do ambiente industrial. Estas abordagens trazem o elemento humano para a discussão e ratificam a importância do profissional de engenharia para a sociedade como um todo.

Boa leitura

Franciele Bonatto  
Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ANÁLISE DA CARÇAÇA INTERTRAVADA DE UM TUBO FLEXÍVEL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	
<i>Virgínia Siqueira Gonçalves</i>	
<i>Elias Rocha Gonçalves Júnior</i>	
<i>Álvaro de Azeredo Araújo de Carvalho</i>	
<i>Juliana Araujo Brasil</i>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>15</b>
ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO NO PADRÃO ANULAR: UMA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE ATRITO INTERFACIAL	
<i>Cidelei Ferreira de Paula Junior</i>	
<i>Luiz Eduardo Melo Lima</i>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>28</b>
MODELAGEM NUMÉRICA EM LÂMINA DE MOLA SEMIELÍPTICA	
<i>Marcella Monnique Mello da Silva</i>	
<i>Leonel Leonardo Delgado Morales</i>	
<i>Vinícius Rodrigues Moraes Silva</i>	
<i>Yanique Vidal Costa</i>	
<i>André Nepomuceno Trajano</i>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>37</b>
DETECÇÃO DE DEFEITOS EM ROLAMENTOS INDUSTRIAIS ATRAVÉS DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	
<i>Luís Henrique Ferreira de Oliveira</i>	
<i>Jorge Nei Brito</i>	
<i>Lucas Costa Brito</i>	
<i>Daniel Junio Soares Rodrigues</i>	
<i>Vinícius Augusto Diniz Silva</i>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>49</b>
AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE SOMMERFELD E OCVRK PARA MANCAIS HIDRODINÂMICOS RADIAIS	
<i>Gabriel Alves Costa</i>	
<i>Erickson Fabiano Moura Sousa Silva</i>	
<i>Sillas de Oliveira Cezar</i>	
<i>Victor Hugo Martins de Almeida</i>	
<i>Vaneide Gomes</i>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>63</b>
ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE UM TRANSPORTADOR DE LÂMINAS DE CLÍNQUER	
<i>Raphael Calazans Cardoso</i>	
<i>Frederico Castro Souza</i>	
<i>Abraão Santos Silva</i>	
<i>Gustavo Dória Lima</i>	
<i>Sandro Griza</i>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>74</b>
TRAÇADO DO DIAGRAMA DE INTERAÇÃO N, M DE PILARES EM CONCRETO ARMADO SOB FLEXÃO NORMAL COMPOSTA	
<i>Ana Carolina De Oliveira Ribeiro</i>	
<i>Caroline Martins Calisto</i>	
<i>Cristiane Caroline Campos Lopes</i>	
<i>Thamires Carvalho Neves</i>	

<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>82</b>
ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDA NA PLATAFORMA CONTINENTAL BRASILEIRA	
<i>Ricardo Cardoso Guimarães</i>	
<i>Phelype Haron Oleinik</i>	
<i>Eduardo de Paula Kirinus</i>	
<i>Bruno Vasconcellos Lopes</i>	
<i>William Correa Marques</i>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>90</b>
APLICATIVO EM AMBIENTE MATLAB PARA METODOLOGIA EDUCACIONAL NO DIMENSIONAMENTO DE PROJETOS FOTOVOLTAICOS	
<i>Bruno de Alencar Carneiro</i>	
<i>Rubens Soeiro Gonçalves</i>	
<i>Rômulo Diêgo Marinho Siqueira</i>	
<i>Ricardo Medeiros Rodrigues</i>	
<i>Dalmir dos Santos Matos</i>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>106</b>
ANÁLISE E DISCUSSÕES SOBRE ACIDENTES DE TRABALHO NAS OPERAÇÕES COM TRATORES AGRÍCOLAS NA REGIÃO DO ALTO SERTÃO SERGIPANO	
<i>Antonio Cardoso Ferreira</i>	
<i>Fábio Santos de Oliveira</i>	
<i>Fabício Oliveira da Silva</i>	
<i>Jubirai José Galliza Júnior</i>	
<i>Vagner dos Anjos Costa</i>	
<i>Silvio Leonardo Valença</i>	
<i>Cochiran Pereira dos Santos</i>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>118</b>
AS DIFERENTES NUANCES NA QUALIDADE DE VIDA NO TRABALHO (QVT) NA CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDO COMPARATIVO EM EQUIPES DE MANUTENÇÃO E PROJETOS	
<i>André Luis Martins de Souza</i>	
<i>Renata Alessandra Evangelista</i>	
<i>Alexandre Assis Bueno</i>	
<i>Lucas Oliveira Magalhães</i>	
<i>Pedro de Freitas Silva</i>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>132</b>
O USO DA KAIZEN NO SETOR DE MONTAGEM	
<i>Maikon Ricardo Peruchini</i>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>145</b>

## ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO NO PADRÃO ANULAR: UMA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE ATRITO INTERFACIAL

### **Cidelei Ferreira de Paula Junior**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
Câmpus Ponta Grossa, Departamento Acadêmico  
de Mecânica

Ponta Grossa – Paraná

### **Luiz Eduardo Melo Lima**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
Câmpus Ponta Grossa, Departamento Acadêmico  
de Mecânica

Ponta Grossa – Paraná

**RESUMO:** escoamentos gás-líquido em tubos podem se apresentar na forma de um escoamento anular, no qual o líquido escoava como um filme fino na parede e o gás escoava no centro do tubo. Este padrão de escoamento ocorre frequentemente em processos de ebulição e condensação, por exemplo, nas indústrias de geração de vapor, refrigeração ou petróleo. No escoamento anular, o fator de atrito interfacial é um dos parâmetros importantes para o fechamento das equações governantes, influenciando a tensão de cisalhamento interfacial e, por consequência o gradiente de pressão. Na literatura, são encontradas várias correlações para a estimativa do fator de atrito interfacial. O objetivo deste trabalho consiste na realização de uma análise comparativa de algumas destas correlações contra dados experimentais, também obtidos da literatura.

Foram observadas as características e limitações de cada correlação analisada, bem como a precisão de cada uma em relação aos dados experimentais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escoamento anular. Fator de atrito interfacial. Correlações.

**ABSTRACT:** Gas-liquid flows in pipes can be in the form of an annular flow in which the liquid flows as a thin film on the wall and gas flows in the pipe center. This flow pattern occurs frequently at boiling and condensation processes, for example, in the industries of steam generation, cooling or petroleum. In annular flow, the interfacial friction factor is one of the important parameters for closing the governing equations influencing the interfacial shear stress and therefore the pressure gradient. In the literature, several correlations are found to estimate the interfacial friction factor. The objective of this work is to carry out a comparative analysis of some of these correlations against experimental data also obtained from literature. The features and limitations of each correlation were observed, as well as the accuracy of each in relation to the experimental data.

**KEYWORDS:** Annular flow. Interfacial friction factor. Correlations.

## 1 | INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos são aqueles em que mais de uma fase ou componente escoam simultaneamente em um duto, sendo o caso mais simples o bifásico, por exemplo, o escoamento gás-líquido. Segundo Pauchon et al. (1993), os escoamentos gás-líquido podem ser geralmente classificados, de acordo com a distribuição espacial das fases, em três padrões: disperso (Fig. 1a,g), separado (Fig. 1b,e,f,j,k) e intermitente (Fig. 1c,d,h,i). Os escoamentos estratificado e anular são subclassificações do escoamento separado e ocorrem quando duas correntes de fluidos escoam simultaneamente separadas por uma interface bem definida, como resultado das forças desenvolvidas no escoamento.

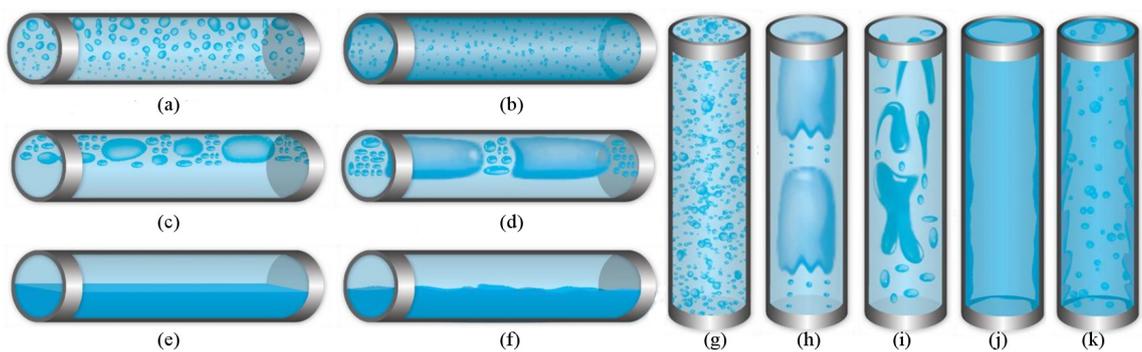


Figura 1. Padrões de escoamento gás-líquido em tubos: na horizontal (a; b; c; d; e; f) e na vertical (g; h; i; j; k).

Fonte: Adaptada de Bratland (2010).

O escoamento anular é frequentemente encontrado em várias aplicações industriais, por exemplo, em sistemas onde ocorre ebulição de líquido e condensação de vapores: condensadores, caldeiras, reatores, torres de refrigeração e tubulações de petróleo. 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. O filme de líquido no escoamento anular pode se apresentar de três formas: liso, em transição ou rugoso (PEDRAS, 1993). O núcleo gasoso escoando em contato com o filme de líquido sofre ação de uma força de atrito interfacial devido à diferença de velocidade e de propriedades físicas. Este atrito interfacial, de forma análoga ao atrito com paredes, pode ser definido em função de um fator de atrito interfacial.

É possível encontrar na literatura um número razoável de correlações para estimativa do fator de atrito interfacial, obtidas com base nos fenômenos físicos envolvidos, bem como a partir da análise de dados experimentais (NAJI, 2011). Muitas destas correlações têm uma faixa de aplicação limitada e, geralmente, apresentam uma precisão satisfatória somente em condições semelhantes àquelas consideradas na sua definição.

Taitel e Dukler (1976) propuseram uma definição para o fator de atrito interfacial como sendo equivalente ao fator de atrito na parede da fase gasosa, em escoamentos nos padrões estratificado e anular, porém a tensão de cisalhamento interfacial é definida em termos da massa específica do gás, da velocidade relativa e da definição do fator de atrito interfacial proposta por eles.

Cheremisinoff e Davis (1979) desenvolveram uma correlação para o fator de atrito interfacial obtida a partir de experimentos de escoamento estratificado, mas que pode também ser utilizada em escoamento anular, apresentando incertezas relativamente baixas. Nesta correlação, o número de Reynolds do líquido é o único parâmetro de entrada, cuja definição é um pouco diferente da frequentemente utilizada em escoamentos monofásicos.

Hewitt (1981) desenvolveu uma correlação para o fator de atrito interfacial utilizando o modelo de rugosidade aparente (ARM, do inglês *Apparent Roughness Model*) descrito por Wallis (1969). Esta correlação utiliza o fator de atrito da parede da fase líquida (monofásico) para o cálculo do fator de atrito interfacial em escoamento anular. Também utilizando o ARM, Bharathan e Wallis (1983) desenvolveram uma correlação para o fator de atrito interfacial em função da espessura adimensional de filme de líquido no escoamento anular.

Crowley, Wallis e Rothe (1986) 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 de fechamento, utilizando a espessura de filme de líquido como fator determinante para o escoamento anular gás-óleo.

Hamersma e Hart (1987) propuseram uma correlação para determinação da rugosidade interfacial, que pode ser utilizada para determinação do fator atrito interfacial em escoamentos estratificado e anular, através da solução da equação implícita de Colebrook-White (COLEBROOK, 1939). Da mesma forma, Baker, Nielsen e Gabb (1988) também desenvolveram correlações para a determinação da rugosidade interfacial. Com base nestas correlações de rugosidade interfacial 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.

Xiao, Shoham e Brill (1990) propuseram um modelo mecanicista para ser utilizado em escoamentos horizontais ou quase horizontais. Este modelo tem por objetivo a determinação do padrão de escoamento, 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 em escoamentos estratificado e anular.

Também com base no ARM, Pedras (1993) constatou que 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 desprende das cristas das ondas do filme de líquido. Com isto, as gotas adquirem a velocidade 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. A partir dos seus experimentos, ele mostrou também que a gravidade pode ser desconsiderada na determinação do fator de atrito interfacial.

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 para o fator de atrito interfacial, eles realizaram comparação de sua correlação juntamente com as de outros autores.

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa de algumas correlações disponíveis na literatura para estimativa do fator de atrito interfacial no escoamento anular gás-líquido. Esta análise passa pela realização de um breve levantamento bibliográfico sobre estas correlações, suas aplicações e limitações, bem como pela verificação de quais correlações apresentam os melhores resultados contra dados experimentais.

## 2 | METODOLOGIA

Nesta metodologia são apresentadas: uma descrição do escoamento anular, as correlações para o fator de atrito interfacial analisadas neste trabalho e a descrição do método utilizado para a análise destas correlações.

### 2.1 Escoamento Anular e suas Variáveis

Considere uma mistura de gás ( $G$ ) e líquido ( $L$ ) escoando num tubo vertical de diâmetro interno  $D$ , de comprimento  $L$  e de área de seção transversal  $A$ . No escoamento anular, Fig. 2, o gás escoar no centro do tubo com velocidade  $U_G$ , muito superior à velocidade do líquido  $U_L$ , na forma de filme de espessura  $H_L$ . Este filme de líquido escoar na periferia do tubo, exercendo uma tensão de cisalhamento na parede  $\tau_L$ , e em contato com o gás exercendo uma tensão interfacial  $\tau_p$  que pode ser definida em termos de um fator de atrito interfacial  $C_{f,p}$  de forma análoga a tensão de cisalhamento na parede.  $\phi_L$  e  $\phi_D$  representam as frações de líquido na forma de filme e de gotículas de líquido no gás e  $E_D$  corresponde à fração de arraste de gotículas (*entrainment fraction*) pelo núcleo gasoso.  $S_L$  é o perímetro do tubo molhado pelo filme de líquido e  $S_I$  é o perímetro da interface gás-líquido, que depende da espessura de filme de líquido  $H_L$ , assim como as áreas ocupadas pelo gás  $A_G$  e pelo líquido na forma de filme  $A_L$ .

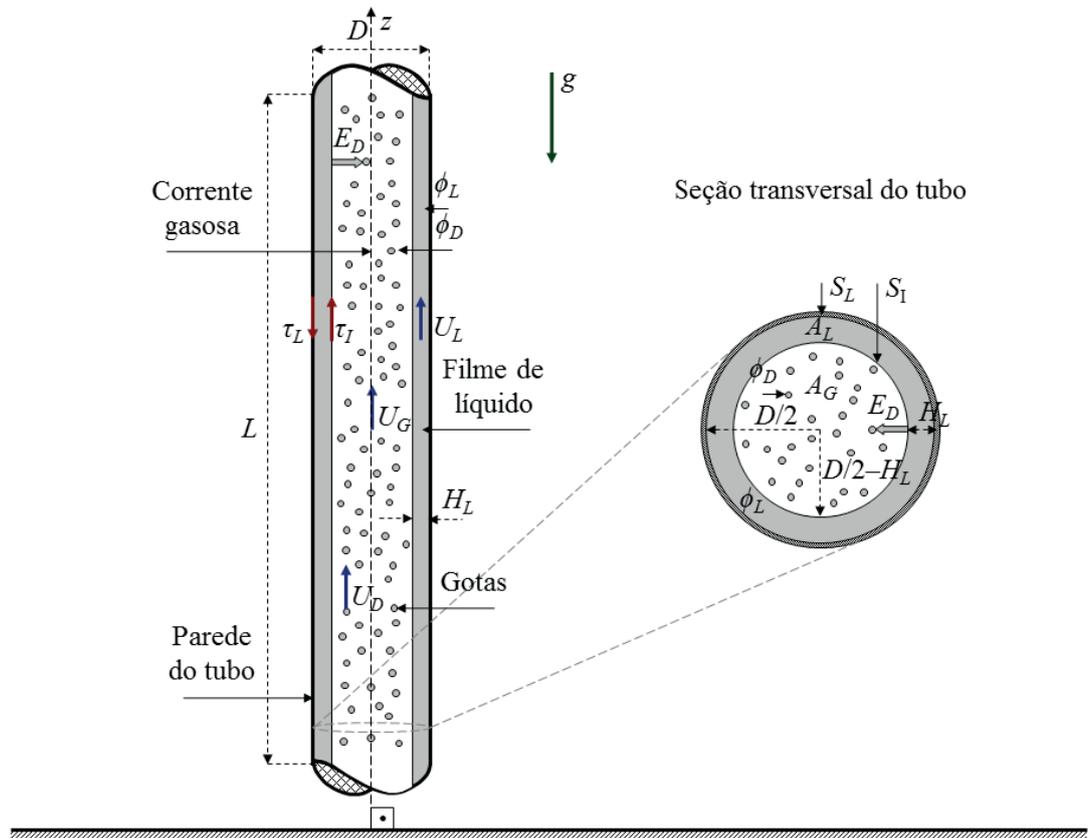


Figura 2. Representação esquemática do escoamento gás-líquido no padrão anular e suas variáveis num tubo vertical.

Fonte: Adaptada de Lima (2011).

A aplicação de balanços de força para o núcleo gasoso e para o filme de líquido resulta em:

$$-A_G \left( \frac{dp}{dz} \right) - \tau_I S_I - A_G \rho_G g = 0 \quad (1)$$

$$-A_L \left( \frac{dp}{dz} \right) + \tau_I S_I - \tau_L S_L - A_L \rho_L g = 0 \quad (2)$$

sendo  $\rho_G$  e  $\rho_L$  as massas específicas de gás e de líquido e  $g$  a aceleração gravitacional. Taitel e Dukler (1976) propuseram que o gradiente de pressão ( $dp/dz$ ) é igual para as duas fases, tal que a combinação das Eqs. (1) e (2) resulta em uma equação de *momentum* para o padrão de escoamento anular, cuja solução (implícita) depende da determinação da espessura de filme de líquido  $H_L$ :

$$\tau_L \frac{S_L}{A_L} - \tau_I S_I \left( \frac{1}{A_L} + \frac{1}{A_G} \right) + \rho_L - \rho_G g = 0 \quad (3)$$

A tensão de cisalhamento do filme de líquido na parede,  $\tau_L$ , é definida em termos de um fator de atrito de Fanning  $C_{f,L}$  de acordo com a expressão:

$$\tau_L = \frac{1}{2} C_{f,L} \rho_L U_L |U_L| \quad (4)$$

A tensão interfacial,  $\tau_p$ , pode ser também definida de forma análoga à expressão apresentada na Eq. (4), utilizando a massa específica da fase gasosa  $\rho_G$ , a velocidade relativa ( $U_G - U_L$ ) e o fator de atrito interfacial  $C_{f,p}$ .

## 2.2 Correlações para o Fator de Atrito Interfacial

Foram encontrados vários trabalhos na literatura que apresentam correlações para o fator de atrito interfacial,  $C_{f,p}$ . A maioria destas correlações tende a apresentar estimativas relativamente precisas para  $C_{f,p}$ , desde que sejam aplicadas em condições apropriadas e dentro das limitações das mesmas. Naji (2011) realizou uma análise comparativa entre algumas correlações da literatura, incluindo a desenvolvida pelo próprio. Neste trabalho é realizada uma análise comparativa considerando 10 correlações para  $C_{f,p}$ , conforme apresentado na Tab. 1, incluindo algumas das utilizadas na análise realizada por Naji (2011).

Autor	$C_{f,i}$	Referência
Taitel e Dukler (1976)	$C_{f,G}$	C1
Cheremisinoff e Davis (1979)	$0,008 + 2 \times 10^{-5} \text{Re}_{J,L}$	C2
Hewitt (1981)	$C_{f,G} \left[ 1 + 24\delta_L \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{1/3} \right]$	C3
Bharathan e Wallis (1983)	$0,005 + 406\delta_L^{2,04}$	C4
Crowley, Wallis e Rothe (1986)	$C_{f,G}(1 + 75\delta_L)$	C5
Hamersma e Hart (1987)	$\frac{1}{4} \left[ \log \left( \frac{\varepsilon_H}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re}_{U,G}^{0,9}} \right) \right]^{-2}$	C6
Baker, Nielsen e Gabb (1988)	$\frac{1}{4} \left[ \log \left( \frac{\varepsilon_B}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re}_{U,G}^{0,9}} \right) \right]^{-2}$	C7
Xiao, Shoham e Brill (1990)	$0,053 N_D^{-0,46} N_{\mu,L}^{0,076} N_{U,G}^{0,23} N_{U,L}^{0,202}$	C8
Pedras (1993)	$-7,8 \times 10^{-3} + 52 \left( 1 - \sqrt{\phi_G} \right) \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \text{Re}_{V,G}^{2/5}$	C9
Fukano e Furukawa (1998)	$0,425(12)^{-1,33} (1 + 12\delta_L)^8$	C10

Tabela 1. Correlações para o fator de atrito interfacial,  $C_{f,p}$  aplicadas em escoamentos gás-líquido no padrão separado.

Fonte: Autoria própria.

O fator de atrito (Fanning) da fase gasosa na parede,  $C_{f,G}$ , adotado nas correlações C1, C3 e C5, é definido de acordo com as correlações clássicas desenvolvidas para tubos lisos:

$$C_{f,k} = A \text{Re}_{U,k}^{-B}, \text{ sendo } \begin{cases} A = 16 \text{ e } B = 1; & \text{se laminar} \\ A = 0,046 \text{ e } B = 0,2; & \text{se turbulento} \end{cases} \quad (5)$$

sendo  $k$  um subíndice utilizado para representar uma fase ( $G$  para gás ou  $L$  para líquido) e  $\text{Re}_{U,k}$  o número de Reynolds da fase, adotado também nas correlações C2, C6, C7 e C9, cuja definição é dada por:

$$\text{Re}_{U,k} = \frac{U_k D_k}{\nu_k} \quad (6)$$

sendo  $U_k$ ,  $D_k$  e  $\nu_k$  a velocidade, o diâmetro hidráulico e a viscosidade cinemática da fase.

Na correlação C2, o número de Reynolds baseado da velocidade superficial do

líquido,  $Re_{J,L}$ , é definido pela Eq. (6) utilizando a velocidade superficial do líquido,  $J_L$ , e o diâmetro do tubo,  $D$ . Por definição, a velocidade superficial de uma fase,  $J_k$ , é definida como sendo a vazão volumétrica da fase,  $Q_k$ , dividida pela área de seção transversal do tubo,  $A$ . Na correlação C3, o fator de atrito na parede da fase gasosa,  $C_{f,G}$ , é definido pela Eq. (5) utilizando um número de Reynolds definido em termos da velocidade superficial de gás,  $J_G$ , e do diâmetro do tubo,  $D$ . Tem-se ainda  $\delta_L = H_L / D$  como sendo a espessura de filme de líquido adimensional, também presente nas correlações C4, C5 e C10, e  $r_k$  que corresponde à massa específica da fase ( $k = G$  ou  $L$ ), também presente na correlação C9. Nas correlações C6 e C7, as rugosidades absolutas da interface gás-líquido são definidas por  $\varepsilon_H = 2,3 H_F$  e  $\varepsilon_B = 34 \sigma / (r_G U_L^2)$ , respectivamente, sendo  $\sigma$  a tensão superficial gás-líquido.

Na correlação C8, os parâmetros adimensionais adotados são definidos por:

$$N_D = D \sqrt{\frac{g \rho_L}{\sigma}}, \quad N_{\mu,L} = \mu_L^4 \sqrt{\frac{g}{\rho_L \sigma^3}} \quad \text{e} \quad N_{U,k} = U_k^4 \sqrt{\frac{\rho_k}{g \sigma}}, \quad k = G \text{ ou } L \quad (7)$$

Na correlação C9,  $\phi_G$  é a fração de gás e  $Re_{V,G}$  é um número de Reynolds da fase gasosa baseado na velocidade de deslizamento média do gás  $V_{G,J}$ . As definições para  $\phi_G$  e  $V_{G,J}$  propostas por Pedras (1993) são apresentadas nas Eqs. (8) e (9), respectivamente:

$$\frac{\phi_G}{1 - \phi_G} = 1,225 \times 10^{-3} \text{Re}_{J,L}^{0,56} \left| \frac{J_G}{J_L} \right| \quad (8)$$

$$V_{G,J} = \left( \frac{1}{1,225 \times 10^{-3} \text{Re}_{J,L}^{0,56}} - 1 \right) J_L \quad (9)$$

As correlações para  $C_{f,l}$  apresentadas na Tab. 1 foram desenvolvidas por seus respectivos autores a partir de dados obtidos em diversas configurações de escoamento. Estas diversas configurações podem, em alguns casos, se apresentar como uma limitação na precisão das correlações e, portanto, torna-se necessário conhecê-las. Na Tabela 2 são apresentadas algumas informações a respeito das configurações adotadas na definição das correlações para  $C_{f,l}$  apresentadas na Tab. 1.

Correlação	Fluidos	Padrão	Inclinação	Parâmetros
C1	Ar-água	Anular; estratificado	0° a 90°	$C_{f,G}$
C2	Ar-água	Anular	90°	$Re_{J,L}$
C3	Ar-água	Anular; estratificado	0° a 45°	$\delta_L; r_k$
C4	Ar-água	Anular; estratificado	0° a 45°	$\delta_L$
C5	Gás-líquido	Anular	-	$\delta_L; C_{f,G}$
C6	Ar-água	Anular	90°	$\varepsilon_{H'}; Re_{U,G}$
C7	Gás-líquido	Anular; estratificado	-	$\varepsilon_B; Re_{U,G}$
C8	Gás-líquido	Anular; estratificado	0° a 45°	$N_D; N_{.L}; N_{U,k}$
C9	Ar-água	Anular	90°	$\rho_k; \phi_G; Re_{V,G}$
C10	Gás-líquido	Anular	90°	$\delta_L$

Tabela 2. Configurações de escoamento assumidas nas definições para as correlações de fator de atrito interfacial,  $C_{f,p}$  aplicadas em escoamentos gás-líquido no padrão separado.

Fonte: Autoria própria.

### 2.3 Método para a Análise das Correlações

A análise da precisão das correlações para o fator de atrito interfacial,  $C_{f,p}$ , apresentadas na Tab. 1, baseia-se na determinação do desvio relativo,  $\varepsilon_{rel}$ , entre o valor calculado com cada correlação e o valor medido experimentalmente (PEDRAS, 1993), cuja definição é dada pela Eq. (10). Para uma melhor comparação dos resultados é utilizada a raiz do valor quadrático médio (RMS, do inglês *Root Mean Square*), dos desvios relativos para os  $N$  pontos experimentais realizados por Pedras (1993), cuja definição é dada pela Eq. (11):

$$\varepsilon_{rel} = \frac{(C_{f,I})_{calculado} - (C_{f,I})_{medido}}{(C_{f,I})_{medido}} \quad (10)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_{rel}^2}{N}} \quad (11)$$

Os dados experimentais, utilizados para análise comparativa das correlações apresentadas na Tab. 1, são obtidos do trabalho de Pedras (1993), que realizou 49 testes utilizando um tubo vertical de 27,1 mm de diâmetro interno e ar e água como fluidos, permitindo a ocorrência do padrão anular. As faixas de operação das variáveis obtidas nestes testes podem ser observadas na Tab. 3: velocidades superficiais das fases,  $J_k$ ; pressão,  $p$ ; temperatura,  $T$ ; gradiente de pressão,  $(dp/dz)$ ; espessura de filme de líquido,  $H_f$ ; fator de atrito interfacial,  $C_{f,I}$

Variável	$J_L$	$J_G$	$\rho$	$T$	$(dp/dz)$	$H_F$	$\phi_G$	$C_{f,l}$
Unidade	[m/s]	[m/s]	[Pa]	[°C]	[Pa/m]	[mm]	[-]	[-]
Valor mínimo	0,02333	13,24	96166,9	21	(-722,4)	0,17	0,942	0,01724
Valor máximo	0,07065	35,51	98014,1	26	(-2248,0)	0,40	0,988	0,08399

Tabela 3. Faixas de valores das variáveis obtidas nos 49 testes experimentais realizados por Pedras (1993) para casos de escoamento anular de ar e água num tubo vertical.

Fonte: Autoria própria.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise dos resultados obtidos para o fator de atrito interfacial,  $C_{f,l}$ , a partir das correlações apresentadas na Tab. 1, são mostrados dois gráficos na Fig. 3. Nestes gráficos, a abscissa apresenta os valores de  $C_{f,l}$  obtidos a partir das medidas experimentais realizadas por Pedras (1993), para os 49 testes de escoamento anular vertical, e a ordenada apresenta os valores de  $C_{f,l}$  calculados a partir de cada uma das correlações analisadas neste trabalho. O primeiro gráfico (esquerda) apresenta os resultados para as correlações C1 a C5 e o segundo gráfico (direita) apresenta os resultados para as correlações C6 a C10. Em cada um dos gráficos foram adicionadas faixas equivalentes a  $\pm 30\%$  de desvio relativo entre os valores calculados e medidos.

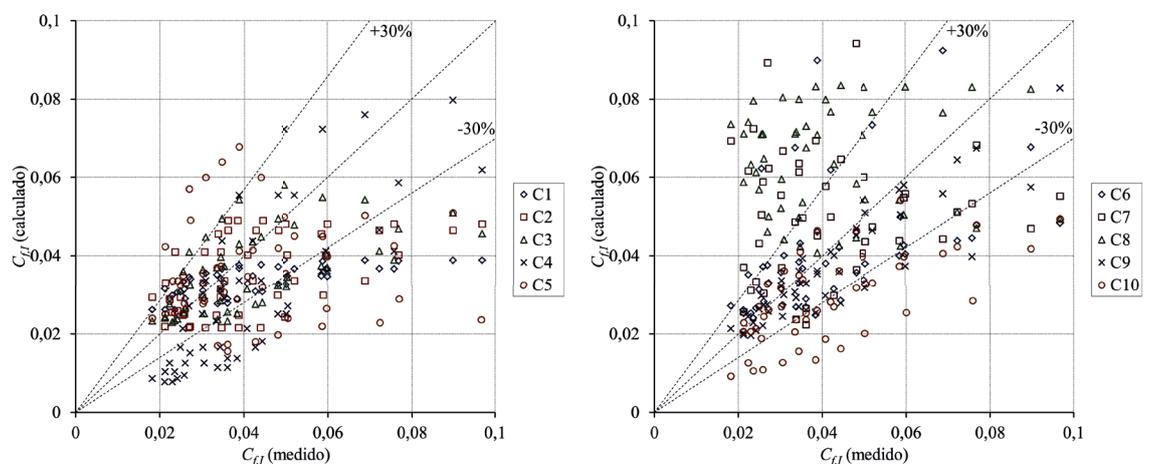


Figura 3. Análise comparativa dos desvios relativos,  $\epsilon_{rel}$ , apresentados pelas correlações de fator de atrito interfacial,  $C_{f,l}$ , aplicadas em casos de escoamento de ar-água num tubo vertical no padrão anular.

Fonte: Autoria própria.

No gráfico da esquerda na Fig. 3, é possível observar que a correlação C1 demonstra uma melhor precisão dos resultados nas condições de escoamento nas quais  $C_{f,l}$  não ultrapassa o valor de 0,05, de forma semelhante para as correlações C2, C3 e C5. Por outro lado, a correlação C4 apresenta resultados melhores somente para valores de  $C_{f,l}$  acima de 0,04, mas apesar disto, uma quantidade significativa de pontos se encontra fora das faixas de desvio relativo de  $\pm 30\%$ .

No gráfico da direita na Fig. 3, as correlações C6 e C9 são as que demonstram

uma maior proximidade com os valores de  $C_{f,i}$  medidos experimentalmente. É possível verificar também que os maiores desvios relativos são observados nos resultados das correlações C7 e C8, nas quais a maior parte de seus pontos se encontram acima da faixa de +30% de desvio relativo. Por sua vez, a correlação C10 apresenta uma parcela dos seus pontos abaixo da faixa de -30% de desvio relativo.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados para o RMS do desvio relativo entre os valores calculados e medidos para o fator de atrito interfacial,  $C_{f,r}$ . Os valores obtidos para o RMS estão entre 1,4% e 10,6%.

Correlação	RMS / [%]
C1	6,1
C2	4,9
C3	4,2
C4	8,2
C5	6,4
C6	3,9
C7	10,6
C8	9,3
C9	1,4
C10	5,8

Tabela 4. RMS dos desvios relativos das correlações para o fator de atrito interfacial,  $C_{f,r}$ , em relação aos valores obtidos experimentalmente por Pedras (1993).

Fonte: Autoria própria.

A correlação C1, apesar de ser aplicável para escoamentos estratificado e anular, com inclinação variando de horizontal a vertical, apresentou resultados satisfatórios para o RMS, do mesmo modo que a correlação C2, visto que está foi desenvolvida em condições operacionais similares aos dados experimentais utilizados nesta análise. A correlação C3 também apresentou resultados satisfatórios, apesar de ser aplicável para escoamentos horizontais, assim como a correlação C4, que juntamente com as correlações C7 e C8, apresentam o pior desempenho dentre as correlações analisadas. Apesar de ter sido desenvolvida para escoamento gás-óleo, a correlação C5 também apresentou bons resultados, porém a correlação C10, que é uma correlação específica para escoamento anular vertical, se mostrou melhor. Por fim, as correlações C6 e C9 foram as que apresentaram os menores valores para o RMS, a primeira por estar baseada em conceitos físicos relacionados ao modelo de rugosidade aparente (ARM) e a segunda por estar mais bem ajustada às condições experimentais obtidas pelo seu referido autor e cujos dados experimentais foram utilizados nesta análise.

## 4 | CONCLUSÕES

Este trabalho foi realizado com a finalidade de se fazer um levantamento prévio de algumas correlações para a determinação do fator de atrito interfacial em casos

de escoamento anular gás-líquido. A partir deste levantamento foram realizadas comparações de algumas das correlações obtidas na literatura contra dados experimentais, a fim de verificar a precisão destas correlações.

É de grande importância se ter um conhecimento prévio de quais correlações para o fator de atrito interfacial apresentam melhores resultados para uma determinada configuração de escoamento, tendo em vista que a tensão de cisalhamento interfacial e, por consequência, o gradiente de pressão dependem disto. Isto pode ser utilizado na melhoria dos resultados obtidos por modelos de escoamentos bifásicos utilizados em simuladores, por exemplo.

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que as correlações para o fator de atrito interfacial analisadas, apesar das suas diferentes características, apresentam resultados satisfatórios. A correlação de Pedras (1993) apresentou os melhores resultados, possivelmente pelo fato de levar em conta parâmetros importantes do escoamento como a velocidade de deslizamento da fase gasosa e as características da fase líquida, mas também por ter sido ajustada com base nos dados experimentais obtidos pelo próprio autor.

Para uma melhor aplicação de correlações para o fator de atrito interfacial, torna-se necessário a realização de análises mais abrangentes envolvendo outras correlações disponíveis na literatura, bem como fazendo o uso de outros conjuntos de testes experimentais, em diferentes configurações. Além disto, devem ser propostas novas correlações para o fator de atrito interfacial, que levem em consideração todos os fenômenos envolvidos, bem como os parâmetros importantes que influenciam a dinâmica do escoamento.

## 5 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio recebido para a realização do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

BAKER, A.; NIELSEN, K.; GABB, A. Pressure loss, liquid holdup calculations developed. **Oil and Gas Journal**, v. 86, n. 11, p. 55-59, 1988.

BHARATHAN, D.; WALLIS, G. B. Air-water countercurrent annular flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 9, n. 4, p. 349-366, 1983.

BRATLAND, O. **Pipe Flow 2: Multi-phase Flow Assurance**. 1<sup>st</sup> ed. Dr. Ove Bratland's Flow Assurance Site, 2010. Disponível em: <<http://www.drbratland.com/>>.

CHEREMISINOFF, N. P.; DAVIS, E. J. Stratified turbulent-turbulent gas-liquid flow. **AIChE Journal**, v. 25, n. 1, p. 48-56, 1979.

COLEBROOK, C. F. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between

the smooth and rough pipe laws. **Journal of the Institution of Civil Engineers**, Thomas Telford, v. 11, n. 4, p. 133-156, 1939.

CROWLEY, C. J.; WALLIS, G. B.; ROTHE, P. H. **State of Art Report on Multiphase Methods for Gas and Oil Pipelines**. AGA Pipelines Research Committee, 1986. Report code PR-172-609.

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.

HAMERSMA, P. J.; HART, J. A pressure drop correlation for gas/liquid pipe flow with a small liquid holdup. **Chemical Engineering Science**, v. 42, n. 5, p. 1187-1196, 1987.

HEWITT, G. F. **Prediction of Pressure Drop in Annular Flow by Phenomenological Modeling**. In: Handbook of Multiphase Systems. Washington, USA: Hemisphere, 1981.

LIMA, L. E. M. **Análise do Modelo de Mistura Aplicado em Escoamentos Isotérmicos Gás-Líquido**. 2011. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264105>>.

NAJI, A. S. Interfacial friction factor in horizontal and inclined annular two-phase flow in pipes. **Journal of Babylon University**, Pure and Applied Sciences, v. 19, n. 2, p. 723-739, 2011.

PAUCHON, C.; DHULESIA, H.; LOPEZ, D.; FABRE, J. **Tacite: A Comprehensive Mechanistic Model for Two-Phase Flow**. In: Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Multiphase Production. Cannes, France: BHR Group, p. 29-50, 1993.

PEDRAS, M. H. J. **Atrito Interfacial em Escoamento Anular Transicional**. 1993. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, São Paulo, 1993. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264126>>.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A Model for predicting flow regimes transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, v. 22, n. 1, p. 47-55, 1976.

WALLIS, G. B. **One Dimensional Two-Phase Flow**. New York, USA: McGraw Hill, 1969.

XIAO, J. J.; SHOHAM, O.; BRILL, J. P. **A Comprehensive Mechanistic Model for Two-Phase Flow in Pipes**. In: Proceedings of the 65<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, USA: Society of Petroleum Engineers, p. 14, 1990. Paper code: SPE 20631.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**Franciele Bonatto** Professora assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação e mestrado em engenharia de produção pela UTFPR e doutorado em andamento em Engenharia de Produção pela mesma universidade. Trabalha com os temas: gestão da qualidade, planejamento e controle da produção e cadeia de suprimentos.

**Henrique Ajuz Holzmann** Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

**João Dallamuta** Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro de Telecomunicações pela UFPR. Especialista em Inteligência de Mercado pela FAE Business School. Mestre em Engenharia pela UEL. Trabalha com os temas: Inteligência de Mercado, Sistemas Eletrônicos e Gestão Institucional.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-77-2



9 788585 107772