

Engenharias, Ciência e Tecnologia 4

Luís Fernando Paulista Cotian
(Organizador)



Atena
Editora
Ano 2019

Luís Fernando Paulista Cotian

(Organizador)

Engenharias, Ciência e Tecnologia

4

Atena Editora

2019

2019 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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharias, ciência e tecnologia 4 [recurso eletrônico] / Organizador
Luís Fernando Paulista Cotian. – Ponta Grossa (PR): Atena
Editora, 2019. – (Engenharias, Ciência e Tecnologia; v. 4)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-85-7247-087-2

DOI 10.22533/at.ed.872193101

1. Ciência. 2. Engenharia. 3. Inovações tecnológicas.
4. Tecnologia. I. Cotian, Luís Fernando Paulista. II. Série.

CDD 658.5

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

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

2019

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

APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, Ciência e Tecnologia” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora. O volume IV apresenta, em seus 29 capítulos, conhecimentos relacionados a Modelagem, Análise e Simulação relacionadas à engenharia de produção nas áreas de Programação Matemática, Decisão Multicriterial e Teoria da Decisão e Teoria dos Jogos.

A área temática de Modelagem, Análise e Simulação trata de temas relevantes para a mecanismos que auxiliam na tomada de decisão, desde a modelagem e simulação até a análise dos resultados envolvendo assuntos relacionados a engenharia. As análises e aplicações de novos estudos proporciona que estudantes utilizem conhecimentos tanto teóricos quanto tácitos na área acadêmica ou no desempenho da função em alguma empresa.

Para atender os requisitos do mercado as organizações precisam levar em consideração a área de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, sejam eles do mercado ou do próprio ambiente interno, tornando-a mais competitiva e seguindo a legislação vigente.

Aos autores dos capítulos, ficam registrados os agradecimentos do Organizador e da Atena Editora, pela dedicação e empenho sem limites que tornaram realidade esta obra, que retrata os recentes avanços científicos do tema.

Por fim, espero que esta obra venha a corroborar no desenvolvimento de novos conhecimentos de Modelagem, Análise e Simulação e auxilie os estudantes e pesquisadores na imersão em novas reflexões acerca dos tópicos relevantes na área de engenharia de produção.

Boa leitura!

Luís Fernando Paulista Cotian

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
A UTILIZAÇÃO DE UM SOFTWARE PARA O DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA	
<i>Douglas Freitas Augusto dos Santos</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931011	
CAPÍTULO 2	11
ALGORITMOS EVOLUTIVOS APLICADOS A OTIMIZAÇÃO OFF-LINE DE UM MAPA COGNITIVO FUZZY DE UM MISTURADOR INDUSTRIAL	
<i>Márcio Mendonça</i>	
<i>Edson Hideki Koroishi</i>	
<i>Lillyane Rodrigues Cintra</i>	
<i>Lucas Botoni de Souza</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931012	
CAPÍTULO 3	19
APLICAÇÕES MATEMÁTICAS EM MEDIDAS AGRÁRIAS: UM CONHECIMENTO ETNOMATEMÁTICO DO HOMEM DO CAMPO CONTEXTUALIZADO COM O CONTEÚDO ESCOLAR	
<i>Deonísio Hul</i>	
<i>Silton José Dziadzio</i>	
<i>Clodogil Fabiano Ribeiro dos Santos</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931013	
CAPÍTULO 4	34
AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA CONEXÃO DE UMA UNIDADE GERADORA DISTRIBUÍDA A UM ALIMENTADOR DE 13,8 KV UTILIZANDO O ATP	
<i>Jaqueline Oliveira Rezende</i>	
<i>Larissa Marques Peres</i>	
<i>Geraldo Caixeta Guimarães</i>	
<i>Marcelo Lynce Ribeiro Chaves</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931014	
CAPÍTULO 5	46
CÁLCULO FRACIONÁRIO APLICADO À GENERALIZAÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE BAGAÇO DE UVA	
<i>Amanda Peruzzo da Motta</i>	
<i>Bruna de Souza Nascimento</i>	
<i>Fernanda Batista de Souza</i>	
<i>Douglas Junior Nicolin</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931015	
CAPÍTULO 6	57
CINÉTICA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO BAGAÇO DE CANA	
<i>Edvan Vinícius Gonçalves</i>	
<i>Wardleison Martins Moreira</i>	
<i>Emanuel Souza Barros</i>	
<i>Sérgio Inácio Gomes</i>	
<i>Marcos de Souza</i>	
<i>Luiz Mario de Matos Jorge</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931016	

CAPÍTULO 7 67

CONTAGEM AUTOMÁTICA DE OVOS DO AEDES AEGYPTI EM PALHETAS DE OVITAMPAS: UM SISTEMA PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Carlos Diego Franco da Rocha
Ayla Márcia Cordeiro Bizerra
Demétrios Araújo Magalhães Coutinho
Luiz Fernando Virginio da Silva
Michel Santana de Deus
Phablo Márcio de Paiva Souto

DOI 10.22533/at.ed.8721931017

CAPÍTULO 8 75

CONTROLADOR FUZZY MAMDANI APLICADO À NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA EM AMBIENTE DESCONHECIDO VARIANTE NO TEMPO

Eduardo Vilela Pierangeli
Jordann Alessander Rosa Almeida
Marcelo Vilela Pierangeli

DOI 10.22533/at.ed.8721931018

CAPÍTULO 9 82

CONTROLE ROBUSTO APLICADO EM UMA VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO VISANDO ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES

Camila Albertin Xavier da Silva
Daniel Almeida Colombo
Edson Hideki Koroishi
Albert Willian Faria

DOI 10.22533/at.ed.8721931019

CAPÍTULO 10 96

ESTRATÉGIAS HEURÍSTICAS PARA POSICIONAMENTO DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL

Marcio André Ribeiro Guimaraens
Julio Cesar Stacchini de Souza
Milton Brown Do Coutto Filho
Breno Crespo Zeba

DOI 10.22533/at.ed.87219310110

CAPÍTULO 11 109

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DA URBANIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SOUSA-PB NO PERÍODO DE 1984 A 2016

Márcia de Lacerda Santos
Thayse Bezerra da Silva
Maria Raiana Almeida Silva
Danielle Leal Barros Gomes

DOI 10.22533/at.ed.87219310111

CAPÍTULO 12 116

FLAMBAGEM LINEAR E NÃO-LINEAR UTILIZANDO UMA ANÁLISE NUMÉRICA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Rodrigo Villaca Santos
Leticia Barizon Col Debella

DOI 10.22533/at.ed.87219310112

CAPÍTULO 13..... 121

GEOLOGIA DA SERRA DO CARAÇA: PERFIS REAIS

Carolina Cristiano Barbosa
Ariadne Duarte Libutti Nuñez
Adriane Abreu Cadar
Alexandre Motta Tunes
Bárbara Alves Oliveira
Ulisses Cyrino Penha

DOI 10.22533/at.ed.87219310113

CAPÍTULO 14..... 132

GERENCIAMENTO DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO: PREVISÃO DE COMPORTAMENTO ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Josué Domingos da Silva Neto
Débora Cristina Almeida de Assis
Nayra Vicente Sousa da Silva
Zenilda Vieira Batista

DOI 10.22533/at.ed.87219310114

CAPÍTULO 15..... 143

INFLUÊNCIA DA INÉRCIA A TORÇÃO NO MOMENTO FLETOR DE PLACAS MACIÇAS DE CONCRETO

Leticia Barizon Col Debella
Rodrigo Villaca Santos

DOI 10.22533/at.ed.87219310115

CAPÍTULO 16..... 149

METODOLOGIA DE CONTROLE PREVENTIVO BASEADA EM ÁRVORE DE DECISÃO PARA A MELHORIA DA SEGURANÇA ESTÁTICA E DINÂMICA DO SISTEMA INTERLIGADO DA ELETRONORTE

Ubiratan Holanda Bezerra
João Paulo Abreu Vieira
Werboston Douglas de Oliveira
Daniel Augusto Martins
Dione José Abreu Vieira
Bernard Carvalho Bernardes
Benedito das Graças Duarte Rodrigues
Vilson Castro

DOI 10.22533/at.ed.87219310116

CAPÍTULO 17 166

O WATSON DA IBM

Eduardo Bruno de Almeida Donato
Amanda Moura Camilo

DOI 10.22533/at.ed.87219310117

CAPÍTULO 18..... 173

PROTÓTIPO DE UM PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE A PARTIR DA LEI DE DARCY

Guilherme Medina Cameu
Victor Araujo Figueredo Fischer
Wataru Iwamoto
Rômulo Henrique Batista de Farias

DOI 10.22533/at.ed.87219310118

CAPÍTULO 19 178

SIMULADOS ELETRÔNICOS DO PROCESSO SELETIVO DO IFPR: INSTRUMENTO DE DIVULGAÇÃO E DEMOCRATIZAÇÃO DO ENSINO

João Henrique Berssanette
Antonio Carlos de Francisco
Fabiane Ferreira
Maria Fernanda Müller Pereira da Silva

DOI 10.22533/at.ed.87219310119

CAPÍTULO 20 188

SOLARIZAÇÃO DO SOLO E BIOFUMIGAÇÃO NA VIABILIDADE DE SCLEROTIUM ROLFSSII

João Luiz Lopes Monteiro Neto
Roberto Tadashi Sakazaki
Raphael Henrique da Silva Siqueira
Carlos Abanto-Rodríguez
Sonicley da Silva Maia
Rannyonara Oliveira Rodrigues
Lucas Aristeu Anghinoni dos Santos
Beatriz Sayuri Campaner Sakazaki

DOI 10.22533/at.ed.87219310120

CAPÍTULO 21 194

SYNOPTERO: RECONSTRUINDO O MUNDO TRIDIMENSIONAL A PARTIR DO BIDIMENSIONAL

Lucas Maquedano da Silva
Marcos Cesar Danhoni Neves
Fernanda Tiemi Karia
Gabriel Francischini de Oliveira
Leandro Moraes Azevedo

DOI 10.22533/at.ed.87219310121

CAPÍTULO 22 202

TENDÊNCIAS CLIMATOLÓGICAS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS, BRASIL

Lucas Rosa de Almeida
Marcelo Vieira-Filho
Sílvia Yanagi
Marcelo Ribeiro Viola

DOI 10.22533/at.ed.87219310122

CAPÍTULO 23 217

TEORIA NA PRÁTICA: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS PRINCIPAIS PARTIDAS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Murilo Miceno Frigo
Paulo Irineu Koltermann

DOI 10.22533/at.ed.87219310123

CAPÍTULO 24 229

UM ALGORITMO ITERATED LOCAL SEARCH PARA O STABLE MATCHING PROBLEM APLICADO AO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE ALUNOS NAS ESCOLAS DA REDE PÚBLICA DE ENSINO

Robson Vieira de Oliveira
Matheus Correia Teixeira
Marco Antonio Bonelli Junior

DOI 10.22533/at.ed.87219310124

CAPÍTULO 25 242

USO DE IMAGENS SENTINEL - 2A E O ALGORITMO SVM PARA MONITORAR AS APP DE NASCENTES E CURSOS D'AGUA DO RIBEIRÃO MARANHÃO, LAVRAS, MG

Ester Afonso
Katyanne Conceição
Beatriz Campos
Franklin Inácio
Margarete Volpato
Helena Alves

DOI 10.22533/at.ed.87219310125

CAPÍTULO 26 249

UTILIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO DIFERENCIAL EM PROBLEMAS INVERSOS PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE UMA VIGA EULER-BERNOULLI

Rennan Otavio Kanashiro
Edson Hideki Koroishi
Fabian Andres Lara-Molina

DOI 10.22533/at.ed.87219310126

CAPÍTULO 27 258

UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE PARTÍCULAS (PIV) PARA O ESTUDO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE PAINÉIS DE MADEIRA COMPENSADA

Eduardo Hélio de Novais Miranda
Rodrigo Allan Pereira
Francisco Carlos Gomes
Roberto Alves Braga Junior
Fernando Pujaico Rivera
Lucas Henrique Pedrozo Abreu

DOI 10.22533/at.ed.87219310127

CAPÍTULO 28 264

UTILIZAÇÃO DO SENSOR PT100 NO ARDUINO PARA CAPTAÇÃO DA TMR

Mariana Espíndola Vieira
Helena Dufau
Christian Muller
Anderson Ferrugem
Antonio Silva
Rafael Soares

DOI 10.22533/at.ed.87219310128

CAPÍTULO 29 269

DINÂMICA DE ESCOAMENTOS PARTICULADOS EM DUTOS VERTICAIS

Diego Nei Venturi
Francisco José De Souza

DOI 10.22533/at.ed.87219310129

SOBRE O ORGANIZADOR 280

DINÂMICA DE ESCOAMENTOS PARTICULADOS EM DUTOS VERTICAIS

Diego Nei Venturi

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade
de Engenharia Mecânica
Uberlândia – MG

Francisco José De Souza

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade
de Engenharia Mecânica
Uberlândia – MG

RESUMO: escoamentos gás-sólido têm sido objeto frequente de estudos utilizando simulações computacionais. No presente trabalho, um caso de escoamento ascendente em duto vertical é simulado utilizando-se a abordagem Euler-Lagrange, e comparado com dados de experimentos da literatura. Para o cálculo da velocidade linear das partículas, são consideradas as forças de arrasto, sustentação de Saffman, e de Magnus. Já para o cálculo da velocidade angular, o torque exercido pelo fluido é utilizado. Também são utilizados modelos para colisão com a parede, seja lisa ou rugosa, e um modelo estocástico de colisão entre as partículas. Mostra-se que a melhor previsão da velocidade depende de um acoplamento de duas ou quatro vias, no entanto acurácia suficiente também é atingida com acoplamento de uma via. Conclui-se também que, mesmo que as forças de sustentação sejam menores que a força de arrasto, estas são fundamentais para a

correta previsão do escoamento, uma vez que atuam na direção transversal do escoamento principal.

PALAVRAS-CHAVE: Escoamento. Partícula. Gás-sólido. Euler-Lagrange. Colisão.

ABSTRACT: Gas-solid flows have often been subject of studies using computational simulations. In the present work, a case of ascending flow in a vertical pipe is simulated using the Euler-Lagrange approach, and compared with experimental data from the literature. To calculate the particles linear velocity, the drag, Saffman lift, and Magnus lift forces were considered. Regarding the angular velocity, the fluid exerted torque is taken into account. Also, wall collision models are used, for both smooth and rough walls, and a stochastic model for particle-particle collision. It is shown that the best prediction for the velocity is tied to a two or four-way coupling, although the one-way coupling can give a reasonable accuracy as well. It is also concluded that, even though the lift forces are smaller than the drag force, they are important for the correct prediction of the flow, because they act on the transverse direction regarding the main flow.

KEYWORDS: Flow. Particle. Gas-solid. Euler-Lagrange. Collision.

1 | INTRODUÇÃO

Os escoamentos gás-sólido estão presentes em diversos setores da indústria, configurando muitas aplicações técnicas. A otimização desses processos requer profundo entendimento da fenomenologia envolvida, o que, por sua vez, requer grande quantidade de informações. Nesse sentido, técnicas de simulação computacional como a fluidodinâmica computacional, conhecida pela sigla CFD (*Computational Fluid Dynamics*), têm se mostrado indispensáveis.

Outra vantagem das simulações numéricas, que as faz ganhar importância, é o estudo de influência de forças. Não é possível avaliar o efeito de cada força em um experimento material, mas é possível com a modelagem utilizada neste trabalho, pois cada uma é calculada separadamente.

Um típico caso que apresenta disponibilidade de dados experimentais é o de escoamento gás-sólido em duto vertical. Estes dados serão utilizados neste trabalho para validar os modelos matemático e computacional utilizados. Especificamente, neste trabalho são utilizados os dados de Mathisen et al. (2008), simulado também por Mando e Yin (2012).

Mando e Yin (2012) simularam um dos casos de Mathisen et al. (2008), porém não atingiram uma concordância satisfatória entre os dados experimentais e de simulação. Na simulação, os autores utilizaram uma modelagem Euler-Lagrange com modelo k- ϵ padrão para fechamento da turbulência, uma via de acoplamento entre as fases, correção para a dispersão turbulenta, e consideraram apenas a força de arrasto e gravidade (negligenciando as forças transversais de sustentação). Os autores ainda estudam a influência da rugosidade da parede.

No presente trabalho, investiga-se como é possível melhorar a predição deste escoamento, seja pela melhora do acoplamento entre as fases, ou pela adição das forças transversais. O efeito da rugosidade da parede também é verificado.

2 | METODOLOGIA

As simulações apresentadas nesse trabalho foram realizadas utilizando o software próprio UNSCYFL3D. Esta seção apresenta sucintamente os modelos matemáticos utilizados. Para mais informações sobre os modelos e algoritmos utilizados, pode-se consultar outras publicações, como de Souza et al. (2014).

2.1 Modelagem da fase contínua

A fase contínua é resolvida sob uma abordagem euleriana com tratamento do tipo URANS (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations*) para a turbulência. Utilizando-se uma formulação de fluido incompressível, escreve-se as equações de balanço de massa e de quantidade de movimento linear como:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i + \frac{S_p}{\rho} \quad (2)$$

onde t é a coordenada de tempo, x_i são as coordenadas espaciais, U_i é o vetor velocidade após a média/filtro de Reynolds, ρ é a massa específica do fluido, P é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, μ_t é a viscosidade turbulenta, g_i é o vetor gravidade, e S_p é o termo de troca de quantidade de movimento entre as fases euleriana e lagrangiana (vide próxima seção).

A solução das equações é feita através do método dos volumes finitos utilizando malhas estruturadas ou não, em arranjo co-localizado. O algoritmo SIMPLE é usado para o resolver segregadamente o acoplamento existente entre as equações. O esquema de interpolação *upwind* de segunda ordem foi utilizado para os termos advectivos e o de diferenças centradas para os termos difusivos.

Para o fechamento da turbulência utilizou-se o modelo $k-\varepsilon$ de duas camadas (Chen e Patel, 1988). Neste modelo, o $k-\varepsilon$ padrão é utilizado no seio da fase, enquanto que nas regiões parietais é aplicado um modelo de uma equação. Esta modelagem implica a necessidade da condição $y^+ \leq 1$ para a malha adjacente à parede.

2.2 Modelagem da fase dispersa

A fase dispersa é simulada utilizando-se a abordagem lagrangiana, na qual parcelas (conjunto de partículas sólidas reais) são acompanhadas com base nas equações do movimento de Newton. As equações de trajetória, quantidade de movimento linear e quantidade de movimento angular são escritas como:

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi} \quad (3)$$

$$m_p \frac{du_{pi}}{dt} = m_p \frac{3\rho C_D}{4\rho_p d_p} |u_i - u_{pi}| (u_i - u_{pi}) + F_{si} + F_{ri} + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) m_p g_i \quad (4)$$

$$I_p \frac{d\omega_{pi}}{dt} = T_i \quad (5)$$

onde x_{pi} é o vetor posição espacial da partícula, u_{pi} é o vetor velocidade da partícula, ω_{pi} é o vetor velocidade angular da partícula, m_p é a massa de uma partícula, ρ_p é a massa específica da partícula, d_p é o diâmetro da partícula, e I_p é o momento de inércia da partícula.

Nas equações anteriores, $u_i = U_i + u_i'$ são as componentes instantâneas da velocidade do fluido. A velocidade média U_i é interpolada do campo euleriano, mas a componente de flutuação u_i' é calculada por um modelo de dispersão turbulenta dado

por Sommerfeld (2001).

Força de arrasto: A correlação empírica de Schiller e Naumann (1935) é usada para o coeficiente de arrasto C_D (válida para $Re_p \leq 1000$):

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0,15 Re_p^{0,687}) \quad (6)$$

Sustentação (Saffman): O cálculo da força de sustentação por cisalhamento é baseado nos resultados analíticos de Saffman (1965, 1968), com extensão para maiores Re_p feita por Mei (1992):

$$F_{si} = 1,615 d_p^2 \sqrt{\mu \rho |\omega_i|}^{-1} C_{ls} [(u_i - u_{pi}) \times \omega_i] \quad (7)$$

onde ω_i é a vorticidade do fluido e C_{ls} é dado por Mei (1992).

Sustentação (Magnus): A força de sustentação por rotação (força de Magnus) é calculada usando-se a relação dada por Rubinow e Keller (1961), estendida para levar em conta o movimento relativo entre a partícula e o fluido:

$$F_{ri} = \frac{\pi}{8} \rho d_p^3 C_{lr} [\Omega_i \times (u_i - u_{pi})] \quad (8)$$

onde $\Omega_i = 0,5 \nabla \times (u_i - u_{pi})$ e o coeficiente C_{lr} é dado por Lun e Liu (1997).

Torque: A expressão para o cálculo do torque exercido pelo fluido sobre a partícula é dado por Rubinow e Keller (1961):

$$T_i = C_r \frac{\rho d_p^5}{64} |\Omega_i| \Omega_i \quad (9)$$

onde o coeficiente C_r é dado por Dennis et al. (1980).

Colisão partícula-parede: As colisões das partículas com a parede são tratadas de acordo com as equações da mecânica clássica, avaliando-se a ocorrência de deslizamento ou não em função de parâmetros de restituição e fricção. Experimentos mostram que a influência da rugosidade da parede também é importante no tratamento da colisão, assim o modelo de Sommerfeld e Huber (1999) é utilizado. Nesse modelo, uma correção é aplicada no ângulo de incidência da partícula, tomando como base uma distribuição gaussiana com média zero e desvio padrão dependente da rugosidade da parede e do diâmetro da partícula.

Colisão partícula-partícula: As colisões entre partículas são avaliadas por um modelo clássico de esfera rígida. No entanto, as colisões não são verificadas entre as parcelas vizinhas, mas usa-se um modelo estocástico (Sommerfeld, 2001). Para cada parcela computacional, um parceiro de colisão fictício é gerado, e a probabilidade de colisão é calculada com base na teoria cinética dos gases (a qual leva em conta a concentração de partículas na célula computacional). Distribuições gaussianas de velocidade e diâmetro são amostradas em cada célula, a partir das partículas reais, para gerar o parceiro fictício.

2.3 Acoplamento das Fases

Há, essencialmente, três formas de se realizar o acoplamento entre as fases contínua e dispersa: uma, duas ou quatro vias. No acoplamento de uma via, simula-se apenas a influência do fluido sobre as partículas. A influência inversa é simulada apenas quando se escolhe o acoplamento de duas vias – fluido sobre partícula, e partícula sobre o fluido. O acoplamento mais completo é o de quatro vias, onde além das duas vias anteriores, leva-se em conta também a colisão entre as próprias partículas.

2.4 Configuração das Simulações

Os dados do experimento de Mathisen et al. (2008) são utilizados como fonte de comparação neste trabalho. O caso simulado tem as seguintes características: o fluido de trabalho é ar em condições atmosféricas, operando com velocidade de entrada de 6 m/s; as partículas têm massa específica de 2500 kg/m³ e diâmetro médio de 518 µm; a carga mássica é de 3,13 kg_{partícula}/kg_{ar}.

A unidade experimental é um duto circular de diâmetro interno de 42 mm com 4 m de comprimento. No entanto, a medição é feita apenas nos dois primeiros metros, que são de material transparente. Assim, a geometria simulada é apenas dos dois primeiros metros também.

A malha numérica foi gerada utilizando-se elementos totalmente hexaédricos, vide Figura 1 para detalhes. Um refinamento gradual é empregado próximo à parede onde os gradientes de velocidade são maiores e há a presença da camada limite – é também um requerimento do modelo de turbulência. A malha possui ao total 220 mil células, o que é suficiente para produzir independência dos resultados.

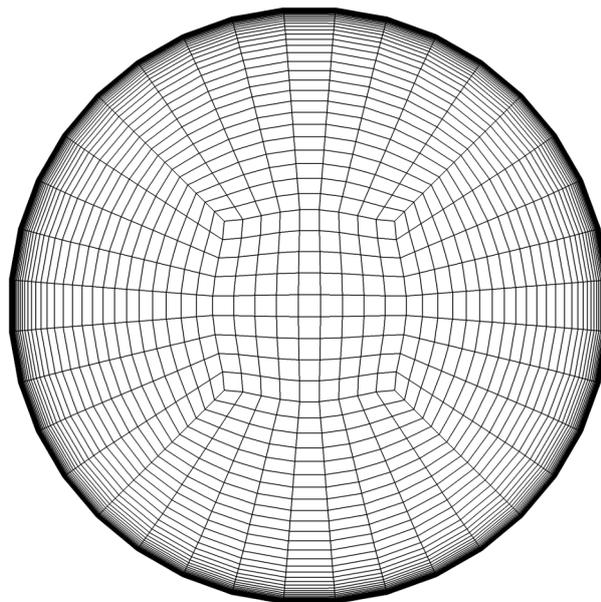


Figura 1: Detalhe frontal da malha numérica.

O código computacional UNSCYFL3D usa passos de tempo diferentes para as fases, assim a fase contínua é resolvida com um passo de tempo de 1×10^{-4} s e a fase

dispersa com 1×10^{-5} s.

Na primeira etapa deste trabalho é avaliada a influência do acoplamento nas simulações. Na segunda etapa é feita uma avaliação de influência da composição das forças atuantes nas partículas. Note-se que para a maioria dos casos é utilizado um modelo de parede lisa, pois assim é o material utilizado nos experimentos. No entanto, na última simulação avalia-se como seriam os perfis de um escoamento submetido a uma parede rugosa.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

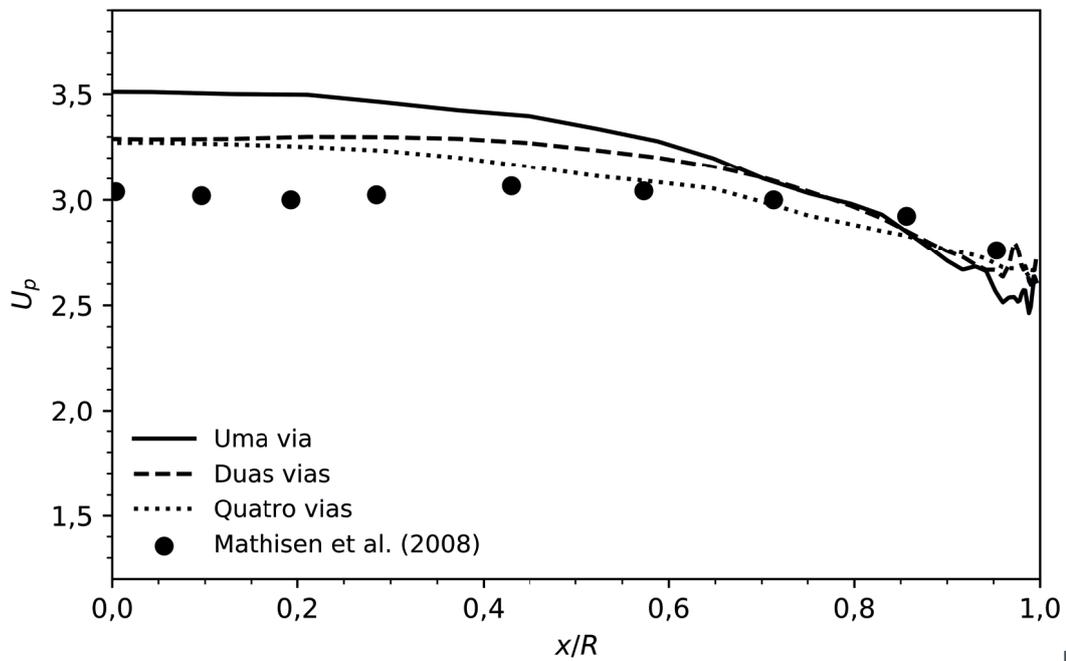
3.5 Efeito do Acoplamento

Nesta primeira seção são apresentadas as comparações dos perfis de velocidade de ambas as fases, e da concentração de partículas, em função do acoplamento entre fases.

A Figura 2 mostra que o acoplamento de quatro vias tem a melhor predição do perfil de velocidade em todas as regiões. No entanto, os acoplamentos de uma e duas vias também apresentam boa concordância com o experimento. O maior erro é de 15% para o acoplamento de uma via na região central.

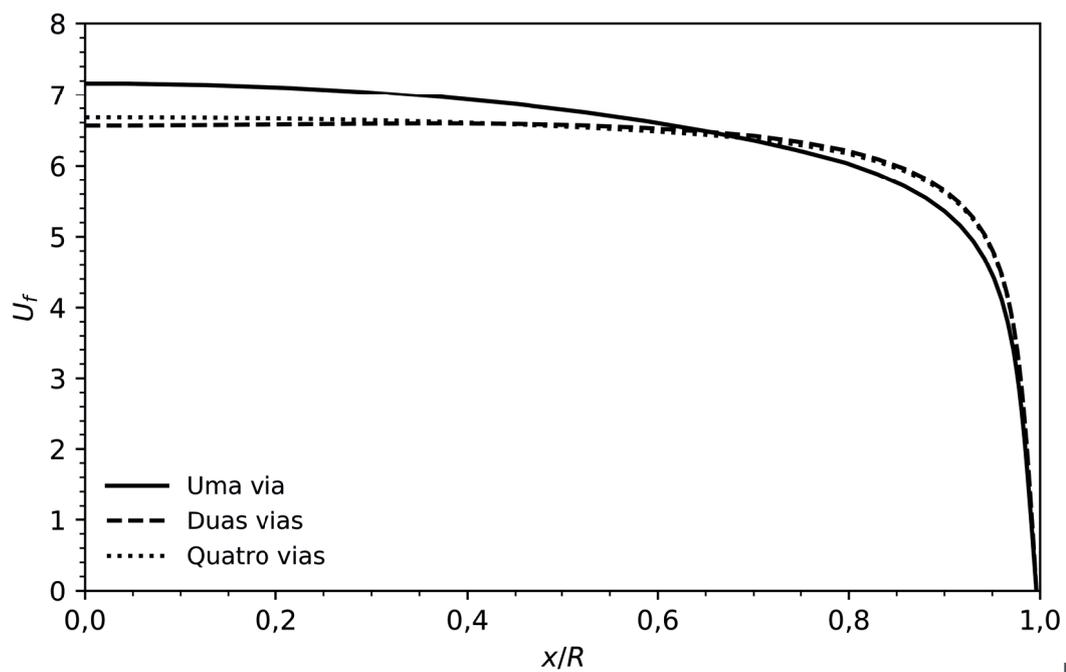
Este resultado indica que simulações de uma via para este caso podem trazer resultados satisfatórios em estudos exploratórios ou paramétricos, principalmente porque tem um custo computacional muito menor que os demais. Enquanto que, quando maior acurácia é necessário, como projetos de equipamentos e otimização de processos, o acoplamento mais físico (de quatro vias) é o melhor.

Na Figura 3 são apresentados os perfis de velocidade do fluido. Nota-se que há uma alteração da dinâmica da fase fluida quando se leva em conta a influência da fase particulada sobre ela. Não existe, no entanto, grande influência das colisões sobre o perfil, *i.e.* comparando-se duas e quatro vias de acoplamento.



Figura

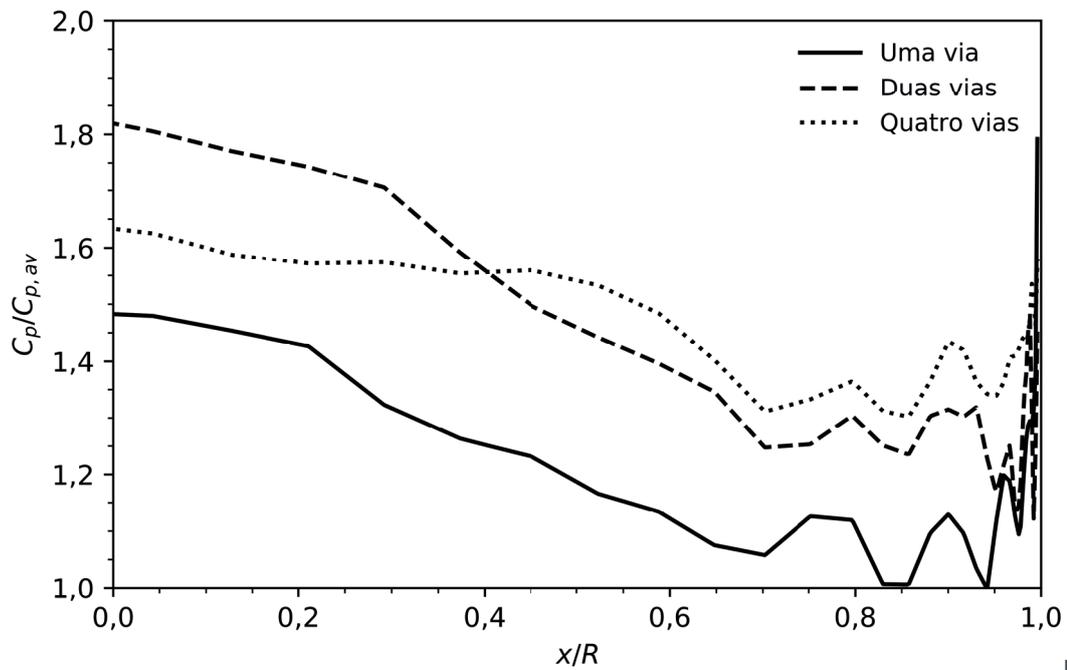
2: Perfil de velocidade da partícula, comparação de acoplamentos.



Figura

3: Perfil de velocidade do fluido, comparação de acoplamentos.

Já a concentração de sólidos é mais afetada pela escolha do acoplamento, vide Figura 4. No perfil referente a uma via de acoplamento, a concentração é maior na parede, enquanto que para duas vias há um redirecionamento das partículas mais para o centro. Com a ativação da colisão entre partículas, a concentração maior no centro acaba aumentando a probabilidade de colisões, o que homogeneiza o perfil espalhando as partículas do centro para as periferias.



Figura

4: Perfil de concentração das partículas, comparação de acoplamentos.

3.6 Efeito da Modelagem

Adotando-se a partir daqui, unicamente a modelagem com acoplamento de uma via, por motivos de economia de tempo de simulação, pode-se estudar o efeito da composição das forças atuantes nas partículas sobre os perfis previamente avaliados.

Nas comparações a seguir, será utilizado o caso base como sendo a simulação de uma via da seção anterior, e os casos comparativos tratarão das seguintes alterações: remoção da força de Saffman; remoção da força de Saffman e Magnus; todas as forças presentes mas sem efeito da dispersão turbulenta; idem ao caso base mas com parede rugosa (em oposição a todos os casos anteriores, os quais utilizavam modelagem de parede lisa).

Na Figura 5 é apresentada a comparação de modelagem para o perfil de velocidade das partículas. Primeiramente, a remoção da força de Saffman faz com que a velocidade diminua na região da parede. A posterior remoção da força de Magnus aumenta levemente a velocidade na região mais próxima a parede a também na região central. Já a dispersão turbulenta não tem influência tão pronunciada como os outros casos. Por último, comparando-se parede lisa com rugosa, percebe-se que a maior rugosidade da parede tende a homogenizar o perfil, reduzindo a diferença de velocidade entre as regiões parietal e central do duto.

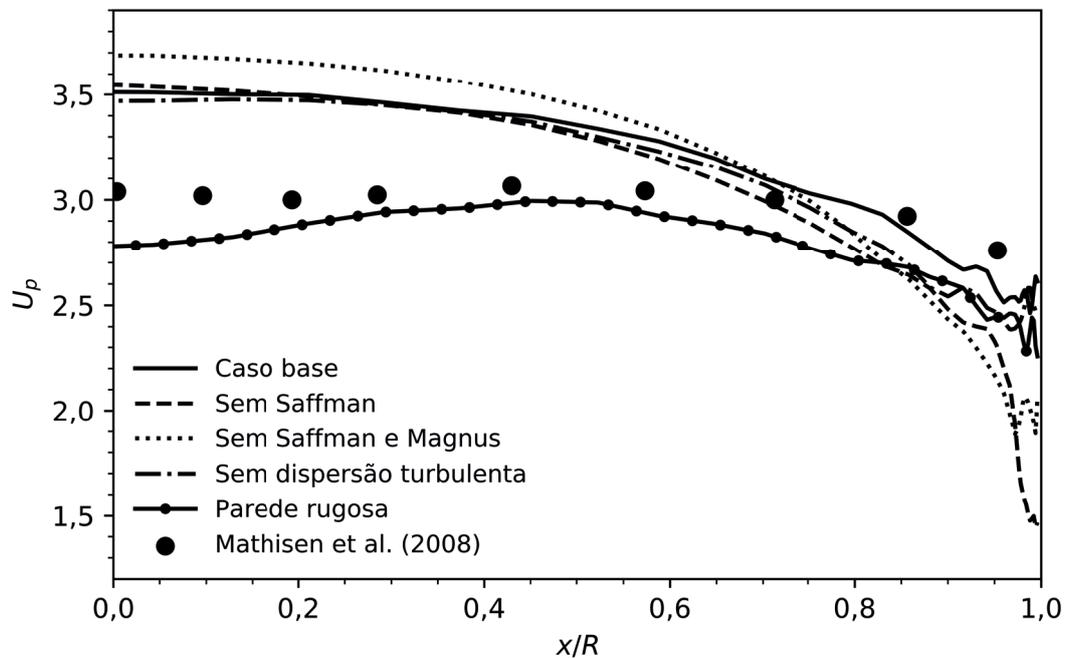


Figura 5: Perfil de velocidade da partícula, comparação de modelagem.

Os perfis de velocidade sem as forças transversais se assemelham aos perfis de simulação apresentados por Mando e Yin (2012) para parede lisa e rugosa, que também não utilizaram essas forças. Esse resultado mostra a importância de se considerar as forças de sustentação. No entanto, o perfil para parede rugosa apresentado no presente trabalho não se assemelha ao dos referidos autores, porque o presente somente utiliza a modelagem de parede rugosa com todas as forças ativas.

Grande parte das modificações avaliadas nos perfis de velocidade são decorrentes da mudança nos perfil de concentração da fase dispersa, como mostra-se na Figura 6. Primeiramente, a remoção do efeito da força de Saffman levou as partículas do centro para a região parietal, enquanto que a posterior remoção do efeito da força de Magnus teve efeito contrário, levando-as da parede para o centro. Já o efeito da remoção da correção das velocidades pela dispersão turbulenta é elevar a concentração em quase todas as regiões. O efeito da rugosidade da parede, como já reportado em vários estudos, é redispersar as partículas em direção ao centro, removendo-as das regiões parietais.

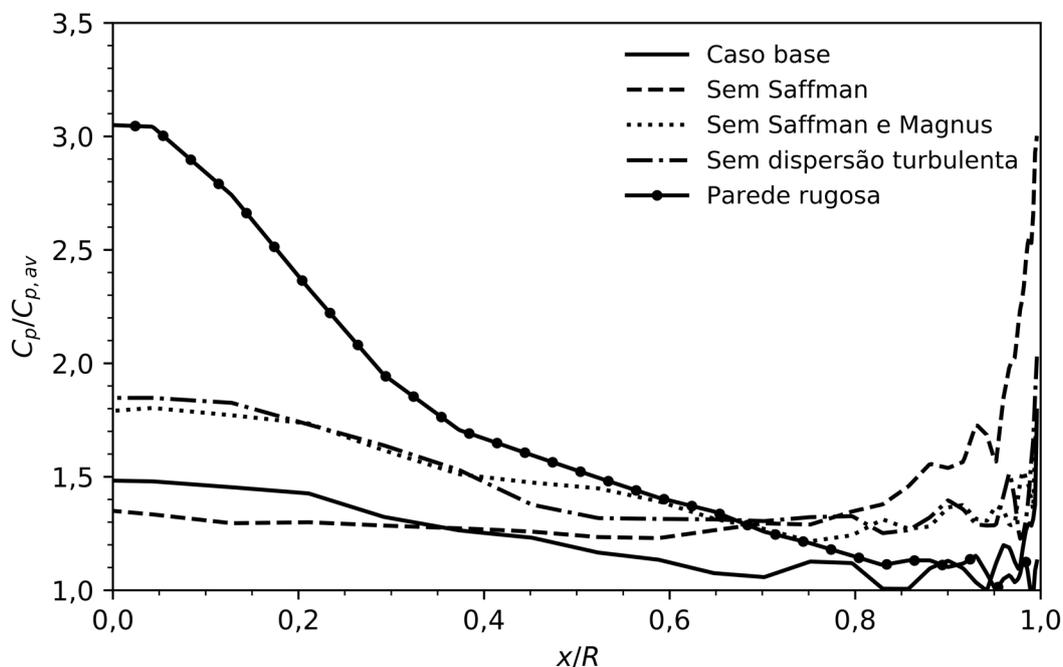


Figura 6: Perfil de concentração das partículas, comparação de modelagem.

Os resultados da influência do tratamento da rugosidade da parede nos perfis de velocidade e concentração da fase dispersa para são similares aos apresentados por de Souza et al. (2014). Em seu estudo, esses autores estudaram a influência da rugosidade em um escoamento ascendente em um difusor, e também verificaram a redispersão das partículas da parede para o centro em função da maior rugosidade.

4 | CONCLUSÕES

O primeiro estudo em relação ao efeito dos acoplamentos entre as fases mostrou que, mesmo simulações de uma via em uma carga mássica não muito baixa, pode gerar predição razoável do perfil de velocidade em escoamentos verticais. No entanto, acoplamentos de duas e quatro vias melhoram significativamente esta predição.

Já quando analisamos o efeito de cada força nesse mesmo escoamento, percebe-se que a força de Saffman tem efeito de levar as partículas da parede para o centro, enquanto que a força de Magnus tem o efeito contrário, em diferente intensidade. Mesmo que essas forças sejam muitas vezes menores que o arrasto, mostra-se que elas são importantes em escoamentos gás-sólido pelo fato de atuarem na direção transversal à direção principal do escoamento. Também a dispersão turbulenta se mostrou importante, impactando significativamente na predição dos perfis de concentração e velocidade da fase dispersa.

Por fim, a correta modelagem de fenômenos parietais se mostrou também importante. Parâmetros como a rugosidade da parede se mostraram bastante influenciadores nas predições do escoamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

CHEN, H. C.; PATEL, V. C. (1988), "Near-wall turbulence models for complex flows including separation", **AIAA Journal**, v. 26, n. 6, p. 641-648.

DE SOUZA, F. J.; SILVA, A. L.; UTZIG, J. (2014), "Four-way coupled simulations of the gas-particle flow in a diffuser", **Powder Technology**, v. 253, p. 496-508.

DENNIS, S. C. R.; SINGH, S. N.; INGHAM, D. B. (1980), "The steady flow due to a rotating sphere at low and moderate Reynolds numbers", **Journal of Fluid Mechanics**, v. 101, n. 2, p. 257-279.

LUN, C. K. K.; LIU, H. S. (1997), "Numerical simulation of dilute turbulent gas-solid flows in horizontal channels", **International Journal of Multiphase Flow**, v. 23, n. 3, p. 575-605.

MANDO, M.; YIN, C. (2012), "Euler-Lagrange simulation of gas-solid pipe flow with smooth and rough wall boundary conditions", **Powder Technology**, v. 225, p. 32-42.

MATHISEN, A.; HALVORSEN, B.; MELAAEN, M. C. (2008), "Experimental studies of dilute vertical pneumatic transport", **Particulate Science and Technology**, v. 26, p. 235-246.

MEI, R. (1992), "An approximate expression for the shear lift force on a spherical particle at finite Reynolds number", **International Journal of Multiphase Flow**, v. 18, p. 145-147.

SAFFMAN, P. G. (1965), "The lift on a small sphere in a slow shear", **Journal of Fluid Mechanics**, v. 22, n. 2, p. 385-400.

SAFFMAN, P. G. (1968), "Corrigendum to 'The lift on a small sphere in a slow shear', **Journal of Fluid Mechanics**, v. 31, p. 624.

SCHILLER, L.; NAUMANN, A. (1935), "A drag coefficient correlation", **Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure**, v. 77, p. 318-320.

SOMMERFELD, M. (2001), "Validation of a stochastic Lagrangian modelling approach for inter-particle collisions in homogeneous isotropic turbulence", **International Journal of Multiphase Flow**, v. 27, n. 10, p. 1829-1858.

SOMMERFELD, M.; HUBER, N. (1999), "Experimental analysis and modelling of particle-wall collisions", **International Journal of Multiphase Flow**, v. 25, n. 6-7, p. 1457-1489.

RUBINOW, S. I.; KELLER, J. B. (1961), "The transverse force on a spinning sphere moving in a viscous fluids", **Journal of Fluid Mechanics**, v. 11, n. 3, p. 447-459.

SOBRE O ORGANIZADOR

Luís Fernando Paulista Cotian, atualmente é professor magistério superior substituto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR câmpus Guarapuava. Formado em Engenharia de Produção pela Universidade de Franca – SP. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Ponta Grossa, linha de pesquisa Engenharia Organizacional e Redes de Empresas - EORE. Doutorando em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Ponta Grossa, linha de pesquisa Otimização e Tomada de Decisão, com previsão de conclusão 2021.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-087-2

