

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

LAIRA PINTO BORGES

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS DE INTERAÇÃO E
APLICAÇÃO NA SIMULAÇÃO CFD-DEM DE LEITO DE JORRO**

SÃO CARLOS – SP

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

LAIRA PINTO BORGES

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS DE INTERAÇÃO E
APLICAÇÃO NA SIMULAÇÃO CFD-DEM DE LEITO DE JORRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

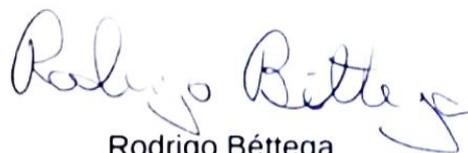
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Béttega

SÃO CARLOS – SP

2020

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE LAIRA PINTO BORGES APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 19 DE FEVEREIRO DE 2020.

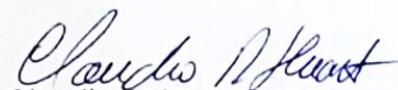
BANCA EXAMINADORA:



Rodrigo Béttega
Orientador, UFSCar



Gabriela Cantarelli Lopes
UFSCar



Claudio Roberto Duarte
UFU

À minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e por me guiar até aqui. À Nossa Senhora Aparecida, pela proteção e conforto nos momentos difíceis.

Aos meus pais, José Carlos e Sônia, por todo o esforço e amor dedicados na minha criação. Vocês sempre me apoiaram na busca pelos meus sonhos, mesmo quando eles estavam longe casa, e jamais esquecerei disso.

Ao meu orientador, Prof. Rodrigo Béttega, pela confiança depositada em mim, por toda paciência, atenção e dedicação. A calma e segurança que você transmite foi fundamental em muitos momentos dessa caminhada.

Aos professores que contribuíram com o desenvolvimento do meu projeto, em especial ao Prof. José Teixeira Freire, à Prof. Maria do Carmo Ferreira. E técnicos Edilson, Oscar, Samuel e Amadeu, pelo suporte na realização dos experimentos deste trabalho.

Aos membros da banca, Prof. Gabriela Cantarelli Lopes e Prof. Claudio Roberto Duarte, por aceitarem o convite.

Aos colegas de trabalho do LabSEM e Centro de Secagem, pela amizade, companheirismo, contribuições e pelos “cafés”. Em especial, à Júnia Mendes, por toda paciência e dedicação ao compartilhar comigo seu conhecimento e me acalmar nos momentos de desespero.

Aos amigos que fiz nessa jornada do mestrado, em especial à turma de 2018, com quem compartilhei momentos de alegria, ansiedade, angústia e emoção. A parceria de vocês fez esses momentos valerm a pena. Em especial, à Karla Melo e Raíssa Andrade, que em tão pouco tempo ganharam minha eterna amizade e admiração, pela cumplicidade, carinho e apoio.

Aos amigos Luiz Ribeiro e Fabricio Menezes pelas risadas compartilhadas e pelos abraços nos momentos difíceis. À minha querida amiga Carolina Gonçalves, pelas orações e pela força mesmo a tantos quilômetros de distância.

Aos familiares e amigos, que não estão citados aqui, mas que me acompanharam em mais essa jornada. Pela compreensão nas minhas ausências, pelas energias positivas e por todo amor que sempre tiveram comigo.

E, finalmente, ao CNPq e à Capes pelo suporte financeiro.

“A diferença entre ganhar e perder é muitas vezes... não desistir”

(Walt Disney)

RESUMO

Leitos de jorro apresentam como característica a intensa mistura de sólidos, o que favorece os mecanismos de transferência de calor e massa. A compreensão desses fenômenos está, muitas vezes, associada à difícil obtenção de detalhes da fluidodinâmica por via experimental, pois as medidas podem ser intrusivas, provocando alterações nas leituras. A fluidodinâmica computacional (CFD) mostrou-se capaz de auxiliar nesse aspecto, difundindo-se no estudo de leitos de jorro. Com o avanço na capacidade de processamento dos computadores, observa-se a expansão no uso do acoplamento entre CFD e Método dos Elementos Discretos (DEM), conhecido por CFD-DEM. O CFD-DEM é uma ferramenta com elevado potencial de aplicação, uma vez que permite estudar os fenômenos na escala das partículas. Entretanto, sua utilização depende da inclusão de parâmetros de interação (coeficiente de restituição, coeficiente de atrito de rolamento, coeficiente de atrito estático) ao modelo, cuja correta definição está diretamente ligada com a qualidade da resposta simulada. Assim, o objetivo deste trabalho foi obter os parâmetros de interação entre esferas de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), e destas com acrílico, através de medição direta, e aplicação em simulações CFD-DEM de um leito de jorro cônico 3D. Para validação das simulações, foram obtidas curvas fluidodinâmicas experimentais para três massas de ABS: 400 g, 300 g e 200 g, em leito de jorro construído em acrílico, com diâmetro do cilindro de 142 mm. Posteriormente, foram realizadas simulações utilizando Modelo dos Dois Fluidos (TFM) para comparação entre as abordagens Lagrangeana e Euleriana para descrição da fase sólida. As curvas fluidodinâmicas experimentais obtidas foram condizentes com a literatura, com velocidades de mínimo jorro de 14,8, 13,2, e 11,8 m/s para as massas de 400 g, 300 g e 200 g respectivamente. As curvas obtidas com CFD-DEM apresentaram comportamento próximo ao experimental, indicando a confiabilidade dos parâmetros de interação obtidos experimentalmente. As velocidades de mínimo jorro foram de 14,7, 12,3 e 9,1 m/s para as massas de 400, 300 e 200 g de sólidos, respectivamente. O maior desvio foi obtido para a massa de 200 g, sendo de aproximadamente 20,5 %. As curvas obtidas a partir do TFM não apresentam o mesmo comportamento experimental, com velocidades de mínimo jorro de 7,1 e 6,2 m/s para as massas de 400 e 300 g respectivamente. Assim, as simulações CFD-DEM melhor representaram o sistema estudado, indicando o potencial da ferramenta para aplicação na simulação computacional de leitos de jorro.

ABSTRACT

Spouted beds feature the intense mixture of solids, which favors the mechanisms of heat and mass transfer. The understanding of these phenomena is associated with the difficulty to obtain details of fluid dynamics by the experimental route, as the measurements can be intrusive, causing changes in the results. Computational fluid dynamics (CFD) proved to be able to assist in this aspect, spreading in the study of spouted beds. With the advance in the processing capacity of computers, there is an expansion in the use of the coupling between CFD and the Discrete Element Method (DEM), known as CFD-DEM. The CFD-DEM is a tool with a high application potential, since it allows to study the phenomena in the particle scale. However, its use depends on the interaction parameters (restitution coefficient, rolling friction coefficient, static friction coefficient) to the model, whose correct definition is directly linked to the quality of the simulated response. Thus, the objective of this work was to obtain the interaction parameters between acrylonitrile butadiene styrene (ABS) spheres, and these with acrylic spheres, through direct measurement, and application in CFD-DEM simulations of a 3D conical spout bed. To validate the simulations, experimental fluid-dynamic curves of three ABS masses were obtained: 400 g, 300 g and 200 g, in a spout bed constructed of acrylic, with a cylinder diameter of 142 mm. Subsequently, simulations were performed using the Two Fluids Model (TFM) to compare the Lagrangean and Eulerian approaches for describing the solid phase. The experimental fluid dynamic curves are consistent with the literature, with minimum spouting velocity 14.8, 13.2, and 11.8 m / s for the masses of 400 g, 300 g and 200 g respectively. Subsequently, simulations were performed using the Two Fluids Model (TFM) to compare the Lagrangean and Eulerian approaches for describing the solid phase. The experimental fluid-dynamic curves are consistent with the literature, with minimum spouting velocities of 14.8, 13.2, and 11.8 m / s for the masses of 400 g, 300 g and 200 g respectively. The curves obtained with CFD-DEM showed a behavior close to the experimental one, indicating the reliability of the interaction parameters obtained experimentally. The minimum spouting velocities were 14.7, 12.3 and 9.1 m / s for the masses of 400, 300 and 200 g of solids, respectively. The largest deviation was obtained for the 200 g mass, being approximately 20.5%. The curves obtained from the TFM do not show the same experimental behavior, with minimum spouting velocity of 7.1 and 6.2 m / s for the masses of 400 and 300 g respectively. Thus, the CFD-DEM simulations best represented the studied system, indicating the potential of the tool for application in the computational simulation of spouted beds.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. Objetivo geral	2
2.2. Objetivos específicos	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. Leito de jorro	3
3.2. Fluidodinâmica computacional aplicada à escoamentos multifásicos	6
3.3. Abordagens matemáticas de sistemas multifásicos	7
3.3.1. Abordagem Euleriana-Euleriana	7
3.3.2. Abordagem Euleriana-Lagrangeana	9
3.3.3. Comparação entre as abordagens TFM e CFD-DEM	13
3.4. Parâmetros de interação	14
3.4.1. Coeficiente de restituição	14
3.4.2. Coeficiente de atrito estático	17
3.4.3. Coeficiente de atrito de rolamento	18
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	22
4.1. Unidade experimental	22
4.2. Caracterização do material	24
4.3. Curvas fluidodinâmicas	25
4.4. Parâmetros de interação	26
4.4.1. Coeficiente de restituição	27

4.4.2.	Coeficiente de atrito estático	28
4.4.3.	Coeficiente de atrito de rolamento	29
5.	MODELAGEM MATEMÁTICA	31
5.1.	Equacionamento TFM	31
5.2.	Força de arraste	32
5.3.	Modelo de turbulência	33
5.4.	Equacionamento CFD-DEM	34
5.5.	Forças de contato	37
6.	PROCEDIMENTO NUMÉRICO	40
6.1.	Infraestrutura computacional e ferramentas	40
6.2.	Domínio computacional	40
6.3.	Solução numérica: TFM	42
6.4.	Solução numérica: CFD-DEM	44
6.5.	Curvas fluidodinâmicas	48
7.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	49
7.1.	Caracterização do material	49
7.2.	Parâmetros de interação	49
7.3.	Curvas fluidodinâmicas	52
8.	RESULTADOS: SIMULAÇÕES TFM	54
8.1.	Teste de malhas	54
8.2.	Curvas fluidodinâmicas e contornos	55
9.	RESULTADOS: SIMULAÇÕES CFD-DEM	60
9.1.	Teste de malhas	60
9.2.	Curvas fluidodinâmicas e contornos	61
9.2.1.	Massa de sólidos: 400 g	61
9.2.2.	Massa de sólidos: 300 g	64
9.2.3.	Massa de sólidos: 200 g	65

10. CONCLUSÕES	73
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
REFERÊNCIAS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de um leito de jorro cônico-cilíndrico.	4
Figura 2. Curva característica de leito de jorro.	5
Figura 3. Colisão entre uma esfera e uma superfície plana em repouso.	15
Figura 4. Descrição do princípio do plano inclinado.....	17
Figura 5. Representação do aparato experimental para obtenção do coeficiente de atrito de rolamento.....	19
Figura 6. (a) Dimensões do leito de jorro (b) Dimensões do distribuidor Venturi.....	23
Figura 7. Representação esquemática da unidade experimental.	23
Figura 8. Unidade experimental.	24
Figura 9. Disposição das partículas de ABS para análise de imagem.	25
Figura 10. Superfícies de interação partícula-partícula: a) Placa recoberta com esferas de ABS, b) Placa de ABS, c) Placa de acrílico.	26
Figura 11. Esquema do aparato experimental para obtenção do coeficiente de restituição.	27
Figura 12. Aparato experimental utilizado na obtenção do coeficiente de restituição.....	27
Figura 13. Plano inclinado para obtenção dos coeficientes de atrito.....	28
Figura 14. Conjunto de partículas coladas para obtenção de coeficiente de atrito estático.	29
Figura 15. Aparato experimental para obtenção de coeficiente de atrito de rolamento (a) rampa de lançamento, (b) aparato de interação partícula-partícula.....	29
Figura 16. Modelo de forças de contato spring-dashpot (mola-amortecedor).	37
Figura 17. Domínio computacional empregado nas simulações.	41
Figura 18. Detalhes da construção das malhas. (a) Vista superior, (b) Corte vertical.	42
Figura 19. Malhas testadas para as simulações TFM.	43
Figura 20. Malhas testadas para simulações CFD-DEM.....	45
Figura 21. Exemplo de injeção de partículas no sistema de camadas.	46
Figura 22. Acoplamento das equações de quantidade de movimento através do CFD-DEM..	47
Figura 23. Curvas fluidodinâmicas experimentais para as massas: a) 400 g, b) 300 g e c) 200 g.	52
Figura 24. Malha utilizada nas simulações TFM-2.	55
Figura 25. Curvas fluidodinâmicas experimentais e simulada por TFM para massa de 400 g.	56
Figura 26. Contornos de fração volumétrica de sólidos para massa de 400g por TFM.	57
Figura 27. Curvas fluidodinâmicas experimentais e simulada por TFM para massa de 300g.	58

Figura 28. Contornos de fração volumétrica de sólidos para massa de 300g por TFM.	59
Figura 29. Malha utilizada nas simulações CFD-DEM.....	61
Figura 30. Curvas fluidodinâmicas com massa de 400g para comparação de coeficientes de interação.....	62
Figura 31. Ilustração do corte realizado. (a) Imagem completa, (b) Corte.....	63
Figura 32. Fração volumétrica de sólidos para massa de 400g por CFD-DEM.....	63
Figura 33. Curvas fluidodinâmicas experimentais e simulada por CFD-DEM para 300g.....	64
Figura 34. Fração volumétrica de sólidos para massa de 300g por CFD-DEM.....	65
Figura 35. Curvas fluidodinâmicas experimentais e simulada por CFD-DEM para 200g.....	66
Figura 36. Fração volumétrica de sólidos para massa de 200g por CFD-DEM.....	66
Figura 37. Curvas fluidodinâmicas para diferentes parâmetros de interação. a) Obtidos por Xiao et al. 2017, b) Modelo friction-dshf, c) Obtidos experimentalmente.	68
Figura 38. Comparação dos contornos de fração volumétrica de sólidos dos modelos avaliados com o experimento: (a) TFM, (b) Experimento e (c) CFD-DEM.	70
Figura 39. Perfil radial da fração volumétrica de sólidos ao longo do eixo vertical superior ao leito de sólidos: a) TFM e b) CFD-DEM.	71
Figura 40. Perfil longitudinal da componente vertical da velocidade das partículas no centro do equipamento.....	71
Figura 41. Perfil radial da velocidade dos sólidos ao longo do eixo vertical superior ao leito de sólidos: a) TFM e b) CFD-DEM.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Trabalhos que utilizaram CFD-DEM aplicados a leitos móveis.	21
Tabela 2. Infraestrutura computacional.	40
Tabela 3. Configuração das malhas testadas para as simulações TFM.	42
Tabela 4. Principais modelos e parâmetros de entrada adotados nas simulações TFM.	44
Tabela 5. Configuração das malhas testadas para as simulações CFD-DEM.	45
Tabela 6. Número de partículas injetadas para cada massa simulada.	46
Tabela 7. Principais modelos e parâmetros de entrada adotados nas simulações CFD-DEM.	46
Tabela 8. Características físicas da esfera de ABS.	49
Tabela 9. Parâmetros físicos das esferas de ABS obtidos experimentalmente.	49
Tabela 10. Coeficiente de restituição experimental (η)	50
Tabela 11. Coeficiente de atrito estático experimental (μ_s).	50
Tabela 12. Coeficiente de atrito de rolamento experimental (μ_r).	50
Tabela 13. Coeficientes de restituição obtidos na literatura.	51
Tabela 14. Coeficientes de atrito estático obtidos na literatura.	51
Tabela 15. Coeficientes de atrito de rolamento obtidos na literatura.	51
Tabela 16. Principais parâmetros fluidodinâmicos experimentais.	53
Tabela 17. Resultados de queda de pressão e valores obtidos a partir do teste GCI para malhas TFM.	54
Tabela 18. Resultados de queda de pressão e valores obtidos a partir do teste GCI para malhas CFD-DEM.	60
Tabela 19. Velocidades de mínimo jorro experimental e simulada por CFD-DEM.	67
Tabela 20. Velocidades de mínimo jorro experimental e simuladas com diferentes coeficientes de interação para massa de 400 g.	69
Tabela 21. Velocidades de mínimo jorro experimental e simuladas.	69

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{f}_i^{f-p}	Força de interação entre partícula i e fluido
\vec{f}_i^g	Força da gravidade sobre a partícula i
\vec{f}_{ij}^{p-p}	Força de interação entre partículas
\vec{M}_{ij}^r	Torque por rotação
\vec{M}_{ij}^t	Torque devido a colisão entre as partículas
\vec{e}_{12}	Vetor unitário
\vec{F}_1, \vec{F}_2	Força de contato
\vec{F}_{atrito}	Força de atrito
\vec{f}_i^{f-p}	Força de interação entre fluido e partícula
\vec{F}^n	Componente normal da força de contato
\vec{F}^t	Componente tangencial da força de contato
\vec{P}_x	Componente da força peso na coordenada x
\vec{P}_y	Componente da força peso na coordenada y
\vec{u}_i	Velocidade da partícula i
\vec{v}_{12}	Velocidade relativa entre partículas 1 e 2
\vec{f}_{ij}^c	Força de contato entre as partículas i e j
\vec{n}_{ij}	Retor unitário da partícula i para a partícula j
C_1, C_2	Coefficientes do modelo de turbulência
d_s	Diâmetro da fase sólida
\vec{F}	Força de interação entre fases
F_{friction}	Força de atrito
F_R	Força de resistência ao rolamento
$G_{k,f}$	Geração de energia cinética turbulenta
h_1	Altura inicial de queda
h_2	Altura atingida após rebote
m_{12}	Massa reduzida
m_i	Massa da partícula i
\vec{P}	Força peso
r_i	Raio da partícula i
t_{coll}	Tempo de colisão

\vec{u}	Velocidade
u_{mj}	Velocidade de mínimo jorro
V_{cel}	Volume das células que compõem a malha
v_{n2}	Velocidade da partícula antes da colisão
v'_{n2}	Velocidade da partícula após a colisão
x_i	Posição da partícula i
R_i	Raio da partícula i
ΔP_{jm}	Queda de pressão de jorro estável
$\Delta P_{máx}$	Queda de pressão máxima
Δt_f	Tempo de integração do fluido
Δt_p	Tempo de integração da equação do movimento para partícula
ΔP	Queda de pressão
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
A	Convergência assintótica
C_D	Coefficiente de arraste
d	Distância percorrida pela partícula
D_g	Diâmetro da garganta do Venturi
D_i	Diâmetro de entrada
D_o	Diâmetro da região cilíndrica do leito de jorro
d_p	Diâmetro da partícula
f^{exact}	Resposta assintótica
g	Aceleração da gravidade
h	Altura da rampa de lançamento
H_c	Altura da região cônica
H_{conv}	Altura da região convergente do Venturi
H_{div}	Altura da região divergente do Venturi
H_g	Altura da garganta do Venturi
H_t	Altura total do leito de jorro
k	Energia cinética turbulente
m	Massa da partícula
p	Pressão
Re	Reynolds
u	Velocidade

$\mu_{f,t}$	Viscosidade turbulenta da fase fluida
μ_r	Coefficiente de atrito de rolamento
μ_s	Coefficiente de atrito estático
$\Pi_{K,f}, \Pi_{\varepsilon,f}$	Influência da fase particulada na fase contínua
σ_i	Fração volumétrica de sólidos na célula
$\bar{\tau}$	Tensor tensão de Reynolds
a	Aceleração da partícula
K	Constante da mola
α	Fração volumétrica de fase
β	Coefficiente de troca de quantidade de movimento
γ	Coefficiente de amortecimento
δ	Deformação
ε	Porosidade
ε	Taxa de dissipação
η	Coefficiente de restituição
θ	Ângulo de inclinação
μ	Viscosidade
ρ	Densidade

Subscrito

f	Fase fluida
pp	Interação partícula-partícula
pw	Interação partícula-parede
q	
s	Fase sólida

Abreviaturas e Siglas

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
CFD	<i>Computational fluid dynamics</i>
DEM	<i>Discrete Element Method</i>
EDP	Equações diferenciais parciais
GCI	<i>Grid Convergence Index</i>
PVC	Policloreto de vinila
TFM	<i>Two Fluid Model</i>

1. INTRODUÇÃO

Leitos de jorro foram desenvolvidos, inicialmente, para secagem de grãos de trigo e tornaram-se populares por promover o movimento cíclico das partículas no seu interior, favorecendo as transferências de calor e massa.

Mesmo após décadas de pesquisas, a obtenção de informações detalhadas sobre a fluidodinâmica por via experimental ainda é uma tarefa restrita. Além disso, o leito de jorro apresenta limitações quanto à sua aplicação industrial, como a ampliação de escala. Logo, o uso de simulação numérica é uma estratégia para obter informações sobre a fluidodinâmica sem interferir no escoamento, e assim avançar no estudo das limitações do leito. Uma das técnicas de simulação utilizada é a fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*).

Existem basicamente duas abordagens para modelar leitos de jorro: Euler-Euler e Euler-Lagrange. A principal diferença entre as abordagens está no tratamento da fase sólida: enquanto a abordagem Euler-Euler considera a fase sólida como um pseudo-fluido, a abordagem Euler-Lagrange representa a fase sólida como discreta. Ao representar as partículas na sua forma discreta, é possível obter informações a respeito da trajetória individual das mesmas

Uma técnica utilizada na modelagem de fase discreta é o Método dos Elementos Discretos (DEM – *Discrete Element Method*). O DEM contabiliza as interações entre as partículas e entre partículas e paredes do equipamento num processo dinâmico. A associação entre CFD e DEM tem se tornado recorrente na literatura recente para o estudo de sistemas gás-sólido, incluindo leitos de jorro. Simulações envolvendo o acoplamento CFD-DEM têm apresentado bons resultados e acredita-se que isso esteja associado aos parâmetros de entrada das simulações, dentre eles os parâmetros de interação: coeficiente de restituição, coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito de rolamento.

Apesar do elevado potencial do CFD-DEM, o mapeamento discreto de todas as partículas do domínio pode representar um custo computacional alto para as simulações em sistemas com alta concentração de partículas, quando comparados com abordagens Euler-Euler. Na literatura são encontrados poucos trabalhos que fazem a comparação direta entre as duas abordagens, podendo haver dúvidas no momento da escolha da melhor. Diante disso, os objetivos desse trabalho foram formulados, e são apresentados na próxima seção.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a fluidodinâmica de um leito de jorro de escala laboratorial utilizando duas diferentes abordagens numéricas.

2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Projeto e construção de um leito de jorro de escala laboratorial e ensaios experimentais de fluidodinâmica;
- Obtenção dos coeficientes de restituição, de atrito estático e atrito cinético para as interações ABS-ABS e ABS-acrílico por medição direta, à serem utilizados como parâmetros de entrada nas simulações CFD-DEM;
- Análise da velocidade de mínimo jorro por simulação computacional com acoplamento CFD-DEM e Modelo dos Dois Fluidos (TFM), considerando geometria tridimensional em ambos os casos;
- Verificação dos modelos e procedimentos numéricos a partir da comparação das simulações fluidodinâmicas com dados experimentais;
- Comparação entre os resultados obtidos numericamente via CFD-DEM e por Modelo dos Dois Fluidos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Leito de jorro

O leito de jorro foi desenvolvido inicialmente para secagem de trigo, por Gishler e Mathur, no Canadá, em 1954. O equipamento apresentou como vantagem a possibilidade de aplicação de uma quantidade de ar quente maior que a utilizada nas técnicas da época, sem comprometer o produto final. Os autores concluíram que os fenômenos observados nos leitos de jorro são substancialmente diferentes dos observados em leitos fluidizados, e desde então o equipamento tem sido estudado (Béttega, 2009).

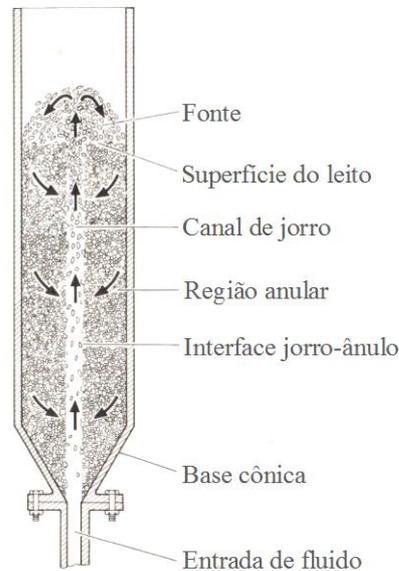
O leito de jorro convencional é formado por uma coluna cilíndrica acoplada a uma base cônica. O fluido quente entra no leito de jorro através de um único orifício central localizado na base do equipamento. Após o estabelecimento do regime de jorro estável, verifica-se a formação de três regiões distintas: o canal de jorro, a região anular e a fonte. O canal de jorro é a região no interior do leito de sólidos por onde o fluido passa, carregando consigo a fase sólida. O anel de sólidos entre a parede do equipamento e o canal de jorro compõe a região anular, onde a fase sólida inicia o movimento descendente até atingir o canal de jorro e ser lançada pelo fluido. A fonte consiste na fase sólida localizada acima da superfície do leito de sólidos, arrastada pelo fluido. Ao perder velocidade, a fase sólida inicia o movimento descendente, retornando para a região anular. Estabelece-se assim um padrão cíclico de movimento das partículas, favorecendo o contato entre as partículas e, conseqüentemente, os fenômenos de transferência (quantidade de movimento, energia e massa) (Mathur e Epstein, 1974). Na Figura 1 é representado um esquema do leito de jorro e a direção de movimento dos sólidos, bem como as regiões características do equipamento.

As principais aplicações do equipamento envolvem processos de secagem (Mathur e Gishler, 1955; Mathur e Epstein, 1974; Brito *et al.*, 2017; Souza, Nascimento, Freire e Freire, 2013), recobrimento de partículas (Pietsch *et al.*, 2018) e granulação (Borini, Andrade e Freitas, 2009). Com os avanços nos estudos do equipamento, hoje também é aplicado em processos de pirólise (Alvarez *et al.*, 2016; Arregi *et al.*, 2017; Amutio *et al.*, 2012), gaseificação (Bove *et al.*, 2019; Adegoroye *et al.*, 2004; Erkiaga *et al.*, 2013) e combustão (Albina, 2006; San José *et al.*, 2014; Rasul, 2001).

O movimento cíclico das partículas é uma das principais vantagens do leito de jorro, produzindo uma intensa mistura da fase sólida e elevado contato entre as fases, favorecendo a transferência de calor e massa no equipamento. Dentre as principais desvantagens do

equipamento pode-se a elevada queda de pressão para estabelecimento do jorro estável e a dificuldade de ampliação de escala para aplicações industriais (Freire and Sartori, 1992).

Figura 1. Esquema de um leito de jorro cônico-cilíndrico.

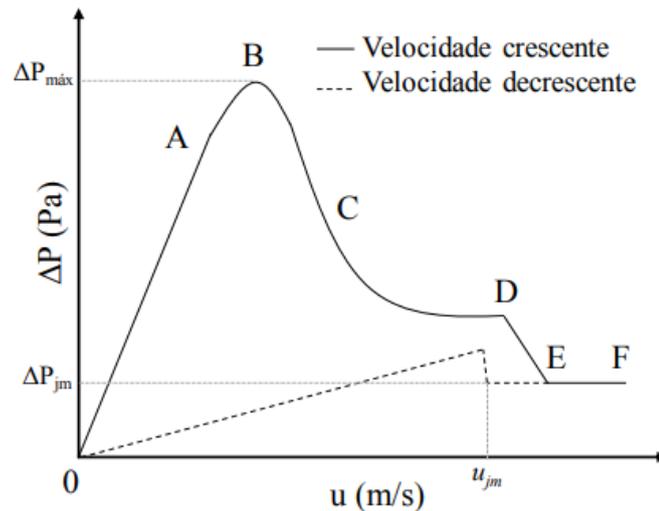


Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974).

O regime de escoamento do leito pode ser identificado por meio da curva característica, caracterizada por queda de pressão em função da velocidade ou vazão de ar injetado no leito, conforme apresentado na Figura 2. A linha sólida é obtida realizando o aumento da velocidade do ar, e representa a quebra da superfície do leito e formação do jorro. Já a linha tracejada, representa a operação inversa, ou seja, a redução de velocidade do ar. A histerese observada na curva é porque não é necessária energia mecânica para romper o leito, como no processo inverso (Bacelos 2006). Os trechos da curva entre a transição de leito estático e leito de jorro (linha sólida) podem ser descritos como (Mathur and Epstein, 1974):

- O trecho OA representa o regime de leito fixo e é caracterizado pelo aumento praticamente linear da queda de pressão (ΔP) com a velocidade do ar injetado (u). Durante esse regime o ar apenas passa pelas partículas sem causar distúrbios.
- Quando atinge uma certa velocidade, o jato de ar passa a ser suficiente para arrastar as partículas da vizinhança da entrada do fluido, formando uma cavidade sobre essa entrada. As partículas ao redor da cavidade são comprimidas contra o material acima, formando um arco compactado que oferece maior resistência para fluir. Assim, mesmo diante da existência da cavidade a queda de pressão do leito continua a aumentar.

Figura 2. Curva característica de leito de jorro.



Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974).

- Com uma velocidade maior do jato, a cavidade se alonga para um jorro interno. O arco compacto de sólidos se mantém sobre esse jorro interno enquanto a queda de pressão continua a subir, até atingir um valor máximo (ponto B - $\Delta P_{máx}$).
- O aumento da velocidade do fluido de entrada após o ponto B alonga ainda mais o jorro interno, de forma que sua altura ultrapassa a altura dos sólidos empacotados, e a queda de pressão diminui (trecho BC).
- Com a aproximação ao ponto C, uma quantidade suficiente de sólidos foi deslocada da região central, provocando a expansão do leito e conseqüente redução da queda de pressão.
- Um pequeno aumento da velocidade do ponto C leva ao ponto de jorro incipiente. O jorro interno é rompido e a concentração de sólidos na região acima do jorro interno reduz abruptamente, reduzindo de forma considerável a queda de pressão (trecho CD). No ponto D o leito passa a ser móvel e em estado de jorro.
- Caso a velocidade do gás continue aumentando, o gás adicional apenas passa pela região do jorro, que se encontra estável como caminho de menor resistência. A fonte sofre elevação, porém sem afetar significativamente a queda de pressão e mantendo-se constante.

A partir da curva característica do leito de jorro pode-se obter velocidade de mínimo jorro (u_{jm}), queda de pressão de jorro estável (ΔP_{jm}) e queda de pressão máxima ($\Delta P_{máx}$).

Tratam-se de parâmetros importantes para o estudo da fluidodinâmica do equipamento e dependem de variáveis como características do material, geometria do equipamento e condições operacionais empregadas.

Embora existam inúmeras pesquisas envolvendo aplicações do leito de jorro em escala laboratorial, e mais recentemente, em plantas piloto, ainda faltam informações técnicas sobre a ampliação de escala desse equipamento. Nesse contexto, as simulações numéricas podem desempenhar o papel importante na obtenção de informações nos estágios de projeto e ampliação. Quando bem desenvolvidas, são capazes de descrever detalhes dos fenômenos envolvidos, tanto de forma geral, quanto específica (Moliner *et al.*, 2017a).

3.2. Fluidodinâmica computacional aplicada à escoamentos multifásicos

O comportamento dos fluidos é estudado há muitos séculos, inicialmente de forma experimental e depois de forma matemática. As equações de Euler foram as primeiras a representarem o movimento dos fluidos e posteriormente, no século XIX, surgiram as leis de conservação (quantidade de movimento, massa e energia) e a equação da continuidade, amplamente utilizadas nos dias atuais. Inicialmente era difícil encontrar soluções analíticas para essas equações, visto que são equações diferenciais parciais (EDPs) não-lineares. Logo, era possível utilizar apenas duas ferramentas: os métodos analíticos e a experimentação em laboratório. Os métodos analíticos tratam de fenômenos simplificados, tornando as equações menos complexas e possíveis de serem resolvidas analiticamente, porém destoam do fenômeno real. A experimentação em laboratório permite tratar com o fenômeno real, porém apresenta limitações de reprodução do fenômeno em estudo, tanto financeiras quanto de segurança, e em algumas situações não é uma opção disponível (Fortuna, 2000; Maliska, 2004).

Com o desenvolvimento dos computadores, uma terceira ferramenta passou a ser aplicada: os métodos numéricos. Por meio de técnicas computacionais é possível obter soluções numéricas para as equações da continuidade e balanços de quantidade de movimento, energia e massa e assim chegar no perfil de velocidade do escoamento em estudo. É comum as três ferramentas se complementarem em projetos e estudos de modelos teóricos para representação de fenômenos (Fortuna, 2000; Maliska, 2004).

A fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) é a área da computação que estuda métodos computacionais para representar fenômenos que envolvam fluidos com ou sem transferência de calor e massa. Com o avanço da tecnologia, a CFD passou a ser uma ferramenta de projeto, simulação e otimização de vários processos utilizada tanto por

engenheiros quanto por pesquisadores. Entretanto, é importante ressaltar que o intuito da CFD é reduzir o número de experimentos e explorar fenômenos que não poderiam ser estudados de forma prática e não substituir as outras duas ferramentas (Fortuna, 2000; Norouzi *et al.*, 2016).

Comparar a solução numérica com resultados experimentais é fundamental para validar o modelo utilizado. É importante que o modelo matemático seja capaz de resolver corretamente as equações diferenciais e que o modelo matemático represente bem o fenômeno estudado (Maliska, 2004).

3.3. Abordagens matemáticas de sistemas multifásicos

Com os avanços dos métodos computacionais, o uso do CFD para modelagem de problemas multifásicos vem crescendo. Além disso, esta tem se mostrado uma ferramenta eficiente em simulações envolvendo gás-sólidos, especialmente em equipamentos como leitos fluidizados e leitos de jorro (Hosseini, Ahmadi e Olazar, 2013).

Para modelar matematicamente e simular o comportamento de sistemas multifásicos há basicamente duas abordagens: a abordagem Euler-Euler e a abordagem Euler-Lagrange, cuja diferença se baseia no tratamento da fase sólida.

3.3.1. Abordagem Euleriana-Euleriana

A abordagem Euler-Euler considera a fase sólida como um pseudo-fluido e ambas as fases são tratadas como contínuo, sendo cada uma representada pelas equações da quantidade e balanço de quantidade de movimento. Além disso, as fases são consideradas interpenetrantes, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outras, surgindo, então, o conceito de fração volumétrica das fases. Um exemplo dessa abordagem é o Modelo dos Dois Fluidos (TFM – *Two-Fluid Model*), cuja obtenção das propriedades da fase sólida tem como princípio a Teoria Cinética Granular desenvolvida por Lun *et al.* (1984), baseada na Teoria Cinética dos Gases (Kafui, Thornton e Adams 2002).

Na sequência são apresentados trabalhos envolvendo simulações de leito de jorro utilizando o modelo TFM. Os trabalhos envolvem, basicamente, análises da fluidodinâmica dos leitos de jorro e a influência de parâmetros geométricas nesses resultados. A comparação com dados experimentais é fundamental para validação dos modelos.

Du *et al.* (2006) estudaram a influência dos modelos de arraste sobre a fluidodinâmica de leitos de jorro. Os resultados das simulações foram comparados com resultados

experimentais quanto à porosidade e velocidade das partículas em várias posições do leito. Quantitativamente, os resultados mostraram que o modelo de arraste altera, de forma significativa, o comportamento da fase sólida nas simulações. Os autores concluíram que o modelo de arraste de Gidaspow, Bezburuah e Ding (1992) apresentou melhor concordância com os dados experimentais tanto quantitativa quanto qualitativamente.

Béttega, Corrêa e Freire (2010) compararam as fluidodinâmicas de um leito de jorro semicilíndrico e um leito de jorro cilíndrico convencional. Os resultados das simulações foram comparados com dados experimentais. Os autores observaram que a adição da parede do centro do equipamento leva à redução da velocidade das partículas na região do canal de jorro, contudo, não altera significativamente a porosidade do leito nas posições próximas às paredes do leito. Foi ressaltado que a altura da fonte de um leito cilíndrico convencional não deve ser estimada pelo leito semicilíndrico pois a fricção entre as partículas e parede reduz o valor desse parâmetro.

Hosseini, Ahmadi e Olazar (2014) simularam a fluidodinâmica de um leito de jorro operando com tubo *draft*. Foram avaliados parâmetros geométricos, como diâmetro e altura do tubo, e vazões de gás e em todos os casos, as simulações apresentaram boa concordância com os dados experimentais.

Liu *et al.* (2014) avaliaram o efeito da geometria da seção cônica no escoamento gás-sólido de um leito de jorro cônico cilíndrico, utilizando geometria tridimensional. Foram utilizados sete ângulos entre 30° e 180° e mantendo a velocidade de ar constante. Os autores verificaram jorro instável para o ângulo de 30° e determinaram o ângulo de 105° como o limite para o comportamento fluidodinâmica de jorro. Para a região com ângulos menores que 105°, o aumento do ângulo levou à diminuição da altura de fonte, velocidade das partículas e porosidade, enquanto que tendências inversas foram obtidas para ângulos superior à 105°.

Batista, Brito e Béttega (2018) estudaram a influência de distribuidores de ar na entrada do leito de jorro por meio de simulações. Foram avaliados dois distribuidores: tubo reto e Venturi. Os resultados mostraram que o bocal tipo Venturi distribuiu uniformemente o ar na entrada do leito e o jorro foi considerado mais estável quando comparado ao tubo reto. Contudo, a queda de pressão no leito é maior.

Dentre os trabalhos apresentados, a característica comum a todos é a comparação das simulações com dados experimentais. Embora as simulações possam funcionar como ferramentas de projeto, não é possível deixar de realizar alguns experimentos. Isso justifica a importância da realização dos experimentos nesta pesquisa.

3.3.2. Abordagem Euleriana-Lagrangeana

Na abordagem Euler-Lagrange a fase fluida continua sendo considerada como contínua e equacionada pela equação da continuidade e balanço de quantidade de movimento. Quanto à fase sólida, é modelada como discreta, com equacionamento baseado na 2ª Lei de Newton. Nesta abordagem, são calculadas a trajetória e velocidade de cada partícula dentro do sistema, bem como as forças de colisão entre as partículas (Thornton, 2015; Pietsch *et al.*, 2017; Q. Zhang *et al.*, 2019)

A colisão entre as partículas pode ser modelada pelo método *soft-sphere* (esfera macia) ou pelo *hard-sphere* (esfera rígida). Na formulação de *hard-sphere*, as interações das partículas são tratadas como colisões binárias instantâneas. Assim, não há a deformação das partículas e suas propriedades antes e após o choque são relacionadas. Na formulação *soft-sphere* as partículas podem se sobrepor ou penetrar nas paredes, e dependendo da profundidade da deformação ocorre a ação de uma força de contato que altera o movimento das partículas. O Método dos Elementos Discretos (DEM – *Discrete Element Method*) é o responsável por modelar essas colisões e calcular as forças de contato. Devido ao elevado número de partículas e, conseqüentemente, elevado número de choque entre elas, o modelo que melhor representa o leito de jorro é o *soft-sphere* (Norouzi *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2019).

Quando comparado aos modelos de abordagem Euler-Euler, sua principal vantagem está na possibilidade de rastreamento individual das partículas. Isso permite a análise da dinâmica do equipamento na escala das partículas, sendo possível obter informações de difícil acesso nos experimentos, como por exemplo a velocidade de cada partícula. Um aspecto desfavorável da abordagem é que devido ao grande número de equações a serem resolvidas para cada partícula individualmente, o custo computacional envolvido nesses modelos é maior, frente ao necessário em simulações Euler-Euler (Pietsch *et al.*, 2017; Moliner *et al.*, 2017b) com elevado número de partículas.. A combinação entre fluidodinâmica computacional (CFD) e Método dos Elementos Discretos (DEM) é o exemplo mais usual da abordagem Euler-Lagrange.

- **Acoplamento CFD-DEM**

A abordagem DEM foi proposta inicialmente por Cundall e Strack (1979) e propõe que a fase sólida é constituída por partículas discretas, monitoradas individualmente por meio das equações do movimento de Newton. Essa técnica de simulação é recomendada para sistemas

onde as interações entre as partículas são modeladas como um processo dinâmico, enquanto novas posições e velocidades das partículas são obtidas (Thornton, 2015).

A combinação da fluidodinâmica computacional (CFD) e método dos elementos discretos (DEM) é uma abordagem computacional em escala meso (fluido) – micro (partícula). Enquanto o acoplamento pressão-velocidade do CFD é utilizado na fase fluida, as interações entre as partículas são calculadas a partir do DEM. A malha deve ser composta por células com tamanho maior que o tamanho das partículas e os efeitos do movimento das partículas no fluido são considerados por meio da fração volumétrica de cada fase e pela troca de momento através da força de arraste (Thornton, 2015; Norouzi *et al.*, 2016).

Na sequência são apresentados trabalhos onde o acoplamento CFD-DEM foi utilizado para avaliar a influência das alterações de parâmetros físicos e modelos de arraste na fluidodinâmica de leitos de jorro. Os trabalhos apresentados são uma pequena parcela dos estudos envolvendo leito de jorro e CFD-DEM. Os enfoques contemplam desde o aperfeiçoamento dos modelos até o projeto de novos equipamentos, passando pelo estudo da fluidodinâmica dos leitos de jorro.

Ren *et al.* (2013) avaliaram o comportamento de mistura para sistemas multicomponentes e binários em leito de jorro cônico-cilíndrico. Foram utilizadas duas formas de partículas: esferas (6,6 mm e 4 mm com esfericidade 1) e milho (6,6 mm e esfericidade 0,98), construído a partir de 4 elementos esféricos. A qualidade da mistura foi sensível à forma das partículas e as esferas se misturaram mais rápido e de forma mais homogênea que o milho. Para o sistema binário, o efeito do tamanho da partícula foi mais forte que o efeito do formato da partícula. Forma, tamanho e densidade influenciaram na trajetória na região da fonte, anular e canal de jorro.

Ren *et al.* (2014) estudaram o comportamento fluidodinâmico de partículas cilíndricas em leito de jorro cônico-cilíndrico. O diâmetro interno do leito era de 200 mm e a altura de 1500 mm, com ângulo de 60° e orifício de entrada de 20 mm e os cilindros apresentaram o mesmo diâmetro (4 mm) alterando apenas a comprimento (10 mm, 20 mm e 30 mm). O comportamento da queda de pressão foi o mesmo observado para partículas esféricas e aumenta com o aumento da altura do leito estático. Para uma maior profundidade do leito, o jorro apresentou-se semelhante ao de esferas. A altura da fonte aumentou com o aumento da altura do leito estático e velocidade do gás e a largura da fonte aumentou com o aumento da velocidade do gás.

Liu *et al.* (2015) analisaram a influência da densidade da partícula na fluidodinâmica do leito de jorro pseudo 2D com seção transversal superior de 150 mm x 15 mm. Foram utilizadas

partículas com diâmetro de 2 mm e as densidades foram 2,60 kg/m³, 5,60 kg/m³, 7,80 kg/m³ e 10,80 kg/m³. A velocidade de mínimo jorro e queda de pressão aumentam com o aumento da densidade das partículas. Entretanto, o padrão do fluxo das partículas se mantém constante com a variação da densidade.

Salikov *et al.* (2015) modelou um leito prismático 3D com o intuito de investigar a influência da vazão de gás na dinâmica do leito e estabilidade do jorro. O leito consistia em um retângulo de 250 mm x 100 mm, com altura da região piramidal de 195 mm e as partículas tinham 1,8 mm de diâmetro. O comportamento apresentado pela simulação coincidiu com o comportamento típico de *slot-retangular beds*. Os dados de vazão de partículas, expansão do leito e a dinâmica das flutuações da pressão característica do gás foram comparados com dados experimentais e houve uma boa coerência entre ambos.

Mahmoodi *et al.* (2017) estudaram a influência de um tubo *open-sided draft* em um leito de jorro cônico-cilíndrico. Foram modelados dois casos de leito 3D: no primeiro, a altura do tubo era igual à metade da altura do cone (0,25 m) e no segundo, a altura do tubo equivalia à altura do cone (0,5 m). Os diâmetros das partículas para os casos 1 e 2 foram, respectivamente, 0,6 mm e 0,415 mm. Foi observado que o comportamento das partículas em leitos com essa configuração é complexo, com a formação de aglomerados de partículas no tubo, tornando as regiões de fonte e jorro instáveis. Além disso, para cada caso foi observado um resultado diferente com relação à velocidade axial dos sólidos e fração volumétrica ao longo do eixo axial. Os autores concluíram que mais investigações a respeito dessa configuração de leito se fazem necessárias.

Golshan *et al.* (2017) estudaram o efeito de uma base parabólica e bases cônicas com diferentes angulações (20° - 70°) na dinâmica de leitos de jorro retangulares. Com o aumento da angulação do cone, a velocidade das partículas e fluxo de sólidos aumentou na região central do jorro. O diâmetro da região do jorro geralmente aumenta com o aumento da angulação. A melhor circulação de sólidos foi observada para leitos parabólicos, enquanto que nos leitos cônicos, a circulação melhora com o aumento da angulação.

Marchelli *et al.* (2017) analisaram a influência de propriedades físicas das partículas (diâmetro, densidade e esfericidade) na velocidade de mínimo jorro. Foi modelado um leito de jorro pseudo 2D, com dimensões de 200 mm x 25 mm na região superior e entrada de 25 mm x 25 mm. O diâmetro utilizado variou entre 0,5 mm a 4 mm, a densidade variou entre 1300 kg/m³ e 2900 kg/m³ e a esfericidade variou entre 0,6 e 1. O modelo foi validado com dados experimentais, e as velocidades obtidas foram comparadas com correlações. Maiores valores das propriedades físicas das partículas resultaram no aumento da velocidade de mínimo jorro:

para a densidade o comportamento entre o modelo e as correlações foi coincidente; já para o diâmetro e esfericidade, embora a tendência de aumento tenha se mantido, o comportamento do modelo e das correlações variou.

Xu *et al.* (2017) estudaram o comportamento de partículas coesas em leito de jorro pseudo 2D, com seção transversal de 134 mm x 32 mm e altura de 600 mm. Houve a comparação entre dados de leito com partículas coesas e leito com partículas não coesas. Considerar as forças coesivas dificultou o início do jorro, uma vez que as partículas passaram a se aglomerar no leito. Essa aglomeração também reduziu a circulação das partículas quando comparada à leitos com partículas não coesas.

Pietsch *et al.* (2017) avaliaram a influência de modelos de arraste na fluidodinâmica de um leito de jorro prismático tridimensional com duas entradas horizontais de gás. Foram aplicados diferentes modelos de arraste a fim de determinar qual reproduz os resultados experimentais, chegando ao modelo de Beetstra, Van Der Hoef e Kuipers (2007). Os autores também avaliaram a influência de placas *draft* no fluxo das partículas e na estabilidade do jorro, concluindo que as placas são ferramentas promissoras na distribuição homogênea de processos com injeção de líquido.

Breuninger *et al.* (2018) avaliou o comportamento do jorro com partículas finas coesas, em um leito cônico-cilíndrico com um tubo Wurster. Foram simuladas partículas esféricas de ZrO₂ com diâmetro de 100 micrometros, e o leito tinha 55 mm de diâmetro, 60 mm de leito estático e o cone 500 mm. Para reproduzir as interações coesivas entre as partículas, foi usado o modelo de contato Hertz-Tsuji, para reproduzir as forças de adesão. Os resultados obtidos via simulação foram comparados com dados experimentais e o modelo proposto apresentou uma boa concordância.

Pietsch *et al.* (2018) avaliaram a estabilidade do jorro de um leito prismático com injeção de líquido e a influência da estabilidade do fluxo na qualidade de recobrimento de partículas. O processo de recobrimento é mais lento no regime estável e no sistema estabilizado quando comparado ao regime instável. Isso porque a frequência de circulação é menor em regime estável, resultando em um movimento mais lento e transferência menor na região de pulverização. Embora o processo seja mais lento, o recobrimento se dá de forma mais homogênea e o risco de aglomeração pode ser considerado insignificante diante do teor baixo de água nas partículas.

Mahmoodi *et al.* (2018) estudaram o comportamento de um leito de jorro pseudo 2D com partículas de 6 mm, consideradas sólidos grossos. O leito possuía largura de 210 mm, altura do cilindro de 1200 mm, angulação de 45 e espessura de 36 mm. Os dados de queda de

pressão, perfil de velocidade axial nas direções axial e radial e o padrão de fluxo das partículas no leito foram comparados com dados experimentais. Além disso, o fluxo padrão das partículas grossas foi consistente com o de partículas finas.

Os trabalhos utilizando abordagem CFD-DEM para simulação de leitos de jorro têm

3.3.3. Comparação entre as abordagens TFM e CFD-DEM

Vantagens e desvantagens são encontradas nas duas abordagens, podendo surgir o questionamento sobre qual utilizar. A comparação direta entre o resultado das duas simulações pode ser a solução para essa questão, entretanto, são poucos os trabalhos na literatura que fazem essa comparação. Na sequência são apresentados alguns desses trabalhos cujo foco é o leito de jorro.

Almohammed *et al.* (2014) aplicaram diferentes abordagens na modelagem de um leito de jorro fluidizado 3D de escala laboratorial. Como fase sólida foram utilizadas esferas de vidro com diâmetro médio de 2,5 mm e densidade de 2500 kg/m³. Os resultados de fluidodinâmica obtidos pelo TFM e acoplamento CFD-DEM são comparados, a fim de avaliar os efeitos da taxa de fluxo mássico de gás nas técnicas de simulação. Ambas as técnicas foram capazes de prever o regime de fluidização e as tendências nos tamanhos das bolhas. Entretanto, para o leito estudado, o acoplamento CFD-DEM apresentou resultados de formação de bolhas e expansão de leito mais próximos ao experimental para vazão mássica de gás de 0,005 kg/s.

Golshan, Esgandari e Zarghami (2017) compararam simulações de um leito de jorro retangular com fendas empregando Modelo dos Dois Fluidos (TFM) e acoplamento CFD-DEM, avaliando os limites, desvantagens e benefícios de cada modelo. Os autores analisaram distribuições axiais da velocidade axial das partículas e retenção de sólidos para quatro alturas diferentes ao longo do equipamento. Para isso, foram consideradas esferas de vidro, de densidade 2380 kg/m³ e 1 mm de diâmetro. Os resultados mostraram que as simulações com o CFD-DEM apresentaram resultados mais precisos quando comparados aos resultados obtidos via TFM.

Moliner *et al.* (2018) compararam simulações de um leito de jorro piramidal pseudo-2D, empregando Modelo dos Dois Fluidos (TFM) e acoplamento CFD-DEM. Os autores utilizaram esferas de vidro, na fase sólida, com diâmetro de 2,03 mm e densidade de 2380 kg/m³. As duas modelagens foram capazes de prever a dinâmica do leito, entretanto, houve discrepâncias de fração volumétrica de sólidos e perfil de velocidade. O acoplamento CFD-DEM reproduziu com precisão o comportamento do leito experimental e o custo computacional

foi similar, uma vez que o número de partículas era pequeno. Embora o CFD-DEM seja adequado para descrever o leito estudado, os autores alertam que para sistemas grandes e complexos o TFM possa ser mais conveniente.

Pode-se observar que os trabalhos envolvendo a comparação entre as abordagens utilizam majoritariamente leitos de jorro com geometria retangular ou geometria pseudo-2D, caracterizada por uma das dimensões do domínio muito menor que as outras. Os resultados do trabalho envolvendo a comparação utilizando geometria 3D indicam que o potencial das simulações CFD-DEM de leitos de escala laboratorial, como o utilizado neste trabalho.

3.4. Parâmetros de interação

Para o equacionamento das colisões usando o DEM é necessário conhecer os parâmetros característicos das interações entre as partículas e entre partículas e parede do equipamento. São eles: coeficiente de restituição, coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito de rolamento. Esses parâmetros são responsáveis por descrever o comportamento dos materiais diante do contato. Tratam-se de parâmetros de difícil obtenção, porém importantes, uma vez que são dados de entrada das simulações. A literatura reporta duas formas de obtê-los: por meio de Calibração *Bulk* (Asaf, Rubinstein e Shmulevich, 2007; Combarros *et al.*, 2014; Li, Feng e Zou, 2013) e por Medição Direta (Chen *et al.* 2015; Hastie 2013; Wang *et al.*, 2015), cada qual apresentando vantagens e desvantagens (Coetzee, 2017).

A principal desvantagem dos métodos de calibração é que um valor microscópico ajustado pode depender do código numérico usado no processo de calibração, ou seja, é condicionado pelas suposições feitas durante o cálculo ou por seus eventuais erros. Isso pode invalidar alguns dos valores assim obtidos para uso em outros códigos e aplicativos (González-Montellano *et al.*, 2012). Medidas diretas são difíceis de serem obtidas e não são capazes de aferir os efeitos *bulk* que os sistemas costumam ter, sendo uma das desvantagens desse método. Contudo, a determinação direta é considerada por González-Montellano *et al.* (2012) a melhor abordagem a ser adotada.

3.4.1. Coeficiente de restituição

Processos dinâmicos envolvendo sólidos encontram-se presentes em muitos setores e uma característica desses processos é interação das partículas com elas mesmas e com as paredes dos equipamentos. Na modelagem da dinâmica dessas partículas é fundamental

conhecer as perdas de energia ocasionada por esses choques. Uma forma de descrever isso é por meio do coeficiente de restituição (η), que consiste na medida de elasticidade de colisões, refletindo na energia cinética da partícula após o choque. Seu valor é dado pela relação entre a energia cinética das partículas antes e após a colisão (Hastie, 2013). Esse coeficiente pode sofrer influência de parâmetros do processo como velocidade de impacto, diâmetro, forma e propriedades das partículas (Yurata, Piumsomboon e Chalermssinsuwan, 2020; Taghizadeh *et al.*, 2018; Crüger *et al.*, 2016; Hastie, 2013; González-Montellano *et al.*, 2012).

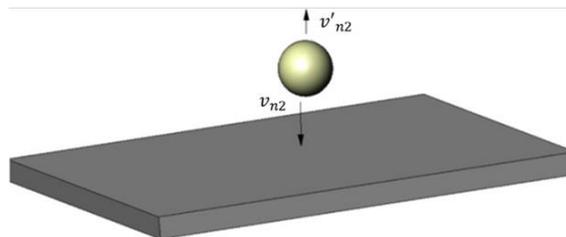
Há, basicamente, duas formas de obter esse coeficiente através de experimentos: teste de queda livre a partir de uma altura especificada (Hastie, 2013; Locurto *et al.*, 1997) e teste com pêndulos (González-Montellano *et al.*, 2012). Para obter uma medida precisa, são utilizadas câmeras de alta velocidade e *softwares* de análise de imagem durante os experimentos.

Considerando uma partícula em queda livre, que parte do repouso e colide com uma superfície, sem movimento de rotação, a equação do coeficiente de restituição (η) é expressa por:

$$\eta = -\frac{v'_{n2}}{v_{n2}} \quad (1)$$

onde v_{n2} e v'_{n2} são as velocidades da partícula antes e após a colisão, respectivamente, como apresentado na Figura 3.

Figura 3. Colisão entre uma esfera e uma superfície plana em repouso.



Fonte: Adaptado de Aryaei, Hashemnia e Jafarpur (2010)

Considerando que a queda se inicie a uma altura h_1 , desprezando a resistência do ar e considerando apenas o movimento retilíneo vertical, obtém-se:

$$v_{n2} = \sqrt{2gh_1} \quad (2)$$

e sendo h_2 a altura atingida após o rebote:

$$v'_{n2} = -\sqrt{2gh_2} \quad (3)$$

Substituindo as equações (2) e (3) na equação (1), obtém-se a equação para o coeficiente de restituição:

$$\eta = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (4)$$

Devido à sua importância nas simulações CFD-DEM, encontram-se na literatura muitos trabalhos envolvendo o coeficiente de restituição, dentre eles, os apresentados na sequência.

Horabik *et al.* (2017) determinaram os coeficientes de restituição de sementes de ervilha, soja e colza, com diâmetros de 6,96, 5,89 e 1,86 mm respectivamente, e para três valores de umidade. Além da umidade, foi investigada a influência da velocidade de impacto, dentro do intervalo de 0,17 e 8,8 m/s. Os coeficientes foram obtidos pelo teste de queda livre, utilizando câmera de alta velocidade. Foram considerados apenas os testes cuja trajetória vertical tivesse desvio inferior à 15° e sem rotação de partícula, sendo obtidas 10 medidas. Os resultados indicaram a diminuição do coeficiente de restituição de ambas sementes tanto com o aumento da velocidade de impacto quanto com o aumento do teor de umidade.

González-Montellano *et al.* (2012) obtiveram os valores de coeficiente de restituição para esferas de vidro, grão de milho e azeitonas. Na obtenção do coeficiente de restituição partícula-parede utilizaram o teste de queda livre com diferentes alturas iniciais, empregando superfícies de aço e acrílico. Para medir os coeficientes de restituição partícula-partícula, os autores utilizaram o método do duplo pêndulo, que permite a colisão direta entre duas partículas. Maiores valores de coeficiente de restituição foram obtidos para as esferas de vidro, enquanto que os menores valores pertencem às azeitonas.

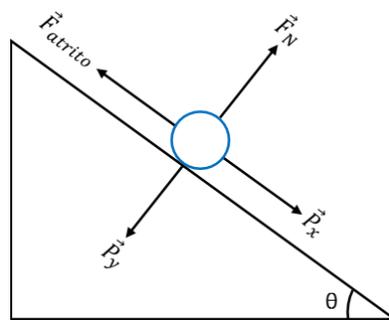
Aryaei, Hashemnia e Jafarpur (2010) determinaram os coeficientes de restituição partícula-parede e a porcentagem de energia perdida durante as colisões a partir de esferas de aço e alumínio com diâmetros entre 6 e 12 mm. Foi utilizado o teste de queda livre, tendo como superfícies chapas de aço e alumínio. Os autores observaram a diminuição do valor dos coeficientes de restituição com o aumento do diâmetro das esferas. Esse efeito é mais significativo para as interações de materiais distintos. Contudo, os autores destacam que é necessária mais investigação para suporte dessa afirmação.

3.4.2. Coeficiente de atrito estático

O coeficiente de atrito estático refere-se à resistência entre dois corpos de deslizar um sobre o outro, estando relacionado à força de atrito. O método direto mais empregado para obtenção desse parâmetro é baseado no princípio do plano inclinado, apresentado na

Figura 4, onde observa-se a iminência do movimento de um corpo sobre o plano (González-Montellano *et al.*, 2012).

Figura 4. Descrição do princípio do plano inclinado.



Fonte: Acervo pessoal.

Sabe-se que a força de atrito é proporcional à força normal atuando sobre a partícula, conforme equação:

$$\vec{F}_{\text{atrito}} = \mu_s |\vec{F}_N| \quad (5)$$

onde \vec{F}_N é a força normal e μ_s o coeficiente de atrito estático.

A partir do plano inclinado apresentado na Figura 4 estabelecem-se as equações:

$$\vec{F}_N = \vec{P}_y = \vec{P} \cos\theta \quad (6)$$

$$\vec{F}_{\text{atrito}} = \vec{P}_x = \vec{P} \sin\theta \quad (7)$$

$$\mu_s \vec{P} \cos\theta = \vec{P} \sin\theta \quad (8)$$

onde \vec{P} é a força peso e θ o ângulo de inclinação do plano. Assim, o coeficiente de atrito estático é obtido por:

$$\mu_s = \text{tg}\theta \quad (9)$$

Embora sejam parâmetros tão importantes para as simulações CFD-DEM quanto o coeficiente de restituição, são poucos os trabalhos na literatura que tratam desse parâmetro. Abaixo estão dois trabalhos encontrados sobre o assunto.

González-Montellano *et al.* (2012) determinaram os coeficiente de atrito estático partícula-parede para esferas de vidro, grãos de milho e azeitonas. Trios de partículas foram colocados sobre a plataforma reclinável, onde encontrava-se a superfície de interesse (aço ou metacrilato) correspondente ao material do equipamento. Os autores observaram maiores valores de coeficiente para todas as partículas com o metacrilato. Os valores obtidos para o milho (aço – 0,165, metacrilato – 0,336) foram semelhantes aos obtidos para as esferas de vidro (aço – 0,179, metacrilato – 0,299) e valores superiores foram obtidos para as azeitonas (aço – 0,347, metacrilato – 0,683).

Wang *et al.* (2018) determinaram o coeficiente de atrito estático para grãos de milho utilizando um plano inclinado. Para a interação partícula-parede, foi utilizada uma placa de zinco sobre a superfície do plano reclinável, enquanto que para as interações partícula-partícula, foram colados grãos de milho sobre a superfície. Os maiores valores de coeficiente foram obtidos para as interações partícula-parede (0,44 – 0,47).

3.4.3. Coeficiente de atrito de rolamento

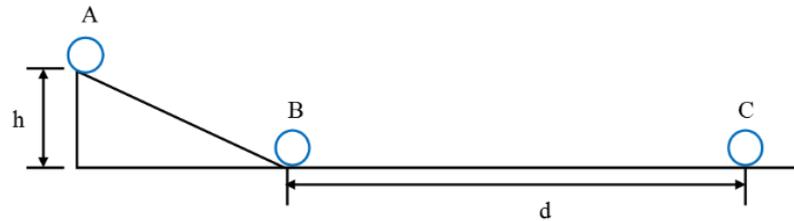
O coeficiente de atrito de rolamento é a relação entre a força que se opõe ao movimento de rolar e a força normal ao contato entre partícula e superfície de contato (partícula ou parede). Trata-se de um parâmetro de difícil obtenção e afetado por fatores como: rigidez, raio de curvatura, textura, e natureza da superfície de contato (Ketterhagen, Bharadwaj e Hancock, 2010). Experimentalmente, é obtido a partir de uma rampa de lançamento, onde é avaliada a distância percorrida sobre a superfície de interesse.

Para obtenção do coeficiente de atrito de rolamento utilizou-se uma rampa de lançamento disposta sobre a superfície de contato, seguindo o esquema apresentado na Figura 5. A medida de interesse é a distância retilínea percorrida pela partícula sobre a superfície, após sair da rampa.

A partir da lei de conservação de energia, estabelece-se que a desaceleração (a) da partícula devido à resistência ao rolamento é expressa por:

$$a = \frac{gh}{d} \quad (10)$$

Figura 5. Representação do aparato experimental para obtenção do coeficiente de atrito de rolamento.



Fonte: Adaptado de Ketterhagen, Bharadwaj e Hancock (2010).

Pela definição de força de resistência ao rolamento tem-se que:

$$F_R = ma = m \left(\frac{gh}{d} \right) \quad (11)$$

Logo, estabelece-se o coeficiente de atrito de rolamento como:

$$\mu_r = \frac{h}{d} \quad (12)$$

Mesmo sendo fundamentais no sucesso das simulações CFD-DEM, observa-se uma dificuldade na obtenção desses parâmetros, uma vez que são poucos os trabalhos da literatura que tratam sobre o assunto. Ketterhagen, Bharadwaj e Hancock (2010) obtiveram os coeficientes de atrito de rolamento para materiais padrões (esferas de aço, vidro e teflon e discos de acrílico), além de comprimidos de placebo, por medição direta, utilizando uma rampa de lançamento. Os valores obtidos para os materiais padrões estavam entre 0,002 e 0,010, enquanto que para os comprimidos de placebo, esses valores variaram entre 0,004 e 0,013. A variação dos coeficientes obtidos para os materiais padrões pode estar relacionada às diferentes áreas de contato, bem como a rugosidade de cada material.

3.4.4. Sensibilidade das simulações aos parâmetros de interação

Como já apresentado, os parâmetros de interação são característicos de cada contato, variando com as propriedades dos materiais. São de difícil obtenção e podem influenciar de forma significativa os resultados finais das simulações. Abaixo são apresentados trabalhos que avaliaram a influência desses parâmetros de entrada nos resultados das simulações utilizando acoplamento CFD-DEM.

Hu *et al.* (2019) avaliaram os efeitos dos parâmetros de interação na fluidodinâmica e transferência de calor de um leito de jorro retangular. Foram avaliadas as alterações de características macroscópicas, como altura da fonte, perfil de velocidade e energia cinética da fase sólida, diante de variações dos parâmetros de interação. Os resultados mostraram que as características são sensíveis às alterações, exceto às alterações envolvendo coeficiente de restituição partícula-parede. A transferência de calor também é afetada por alterações de coeficiente de atrito estático e atrito de rolamento, uma vez que interferem nas regiões de zona morta.

Marchelli *et al.* (2019) realizaram uma análise de sensibilidade em um modelo de leito de jorro pseudo-2D. Dentre os parâmetros variados estão: coeficiente de restituição, coeficiente de atrito estático, coeficiente de atrito de rolamento, modelo de arraste, modelo de turbulência, força de Magnus, força de Saffiman e modelo de rotação. Os resultados mostraram que o modelo de arraste, coeficiente de restituição, coeficiente de fricção e força de Magnus foram as alterações que influenciaram de forma significativa a trajetória das partículas.

A Tabela 1 traz outros trabalhos encontrados na literatura que envolvem simulações CFD-DEM de leitos móveis. Nas colunas “equipamento”, observa-se que o maior número dos trabalhos envolvendo leitos de jorro prismáticos com geometria pseudo-2D, cuja seção transversal é retangular e uma das dimensões é muito menor que as outras. Trata-se de uma estratégia para reduzir o número de partículas no interior do equipamento e, conseqüentemente, reduzir o custo computacional das simulações. Quanto ao material, a maior parte dos trabalhos utilizam inertes, em especial o vidro. Existem diversas análises que podem envolver grau de mistura dos sólidos, condições operacionais, geometria e etc. Alguns trabalhos envolvem a obtenção dos parâmetros de interação e comparação entre as abordagens TFM e CFD-DEM, contudo, há uma escassez de trabalhos com essa análise envolvendo leitos de jorro cônicos com geometria 3D. A fim de explorar essa lacuna da literatura e desenvolver os estudos envolvendo CFD-DEM no Centro de Secagem do DEQ-UFSCar, foram propostos os objetivos deste trabalho de mestrado, apresentados na seção 2.

Tabela 1. Trabalhos que utilizaram CFD-DEM aplicados a leitos móveis.

Referência	Equipamento				Material			Análise				
	LF	LJC-3D	LJP-3D	LJP-P2D	Inerte	Grãos e sementes	Partículas Úmidas	Modelos	Geometria	Parâmetros de interação	Grau de mistura	Condições operacionais
Yurata, Piumsomboon e Chalermssinsuwan (2020)			●		●					●		
Marchelli <i>et al.</i> (2019b)			●	●	●			●				●
Moliner <i>et al.</i> (2019)				●	●			●				●
Breuninger <i>et al.</i> (2018)		●			●							●
Moliner, Marchelli, Curti <i>et al.</i> (2018)			●		●						●	
Lee e Lim (2017)	●				●						●	
Marchelli <i>et al.</i> (2017)				●	●						●	●
Golshan, Zarghami e Mostoufi (2017)				●	●				●			
Zhang e Li (2017)				●	●		●			●		
Yang <i>et al.</i> (2014)			●		●							●
Ren <i>et al.</i> (2013)			●		●	●						●
Mahmoodi, Hosseini e Ahmadi (2018)				●	●							●
Marchelli <i>et al.</i> (2019a)			●		●					●		
Peng <i>et al.</i> (2016)	●				●							●

LF: Leito fluidizado

LJC-3D: Leito de jorro cônico 3D

LJP-3D: Leito de jorro prismático – 3D

LJP-P2D: Leito de jorro prismático – Pseudo 2D

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1. Unidade experimental

Um leito de jorro de pequena escala com geometria baseada em trabalhos da literatura foi construído para a obtenção de dados experimentais e posterior validação do modelo. Leitos de jorro são sensíveis às geometrias do equipamento em si e de parâmetros das partículas. Assim, as medidas do equipamento foram estabelecidas de forma a respeitarem três fatores geométricos importantes (Epstein e Grace, 2011; Mathur e Epstein, 1974):

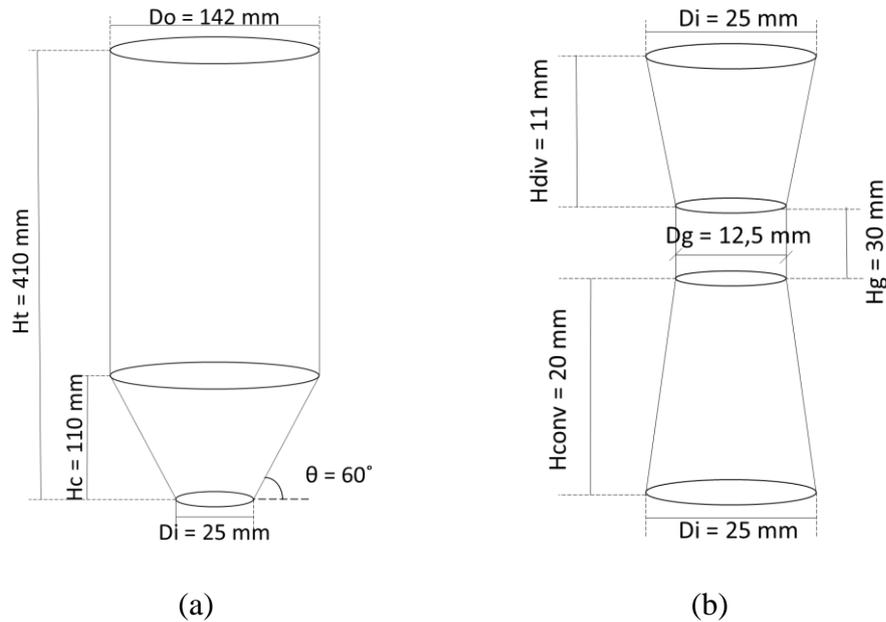
- Razão entre diâmetro de entrada (D_i) e diâmetro da região cilíndrica (D_o) entre 1/2 e 5/6, a fim de evitar a formação de zonas mortas na região próxima à entrada do equipamento e instabilidades;
- Ângulo do cone entre 28° e 60° , para evitar instabilidades e baixas taxas de circulação de sólidos;
- Razão entre diâmetro de entrada (D_i) e diâmetro da partícula (d_p) entre 2 e 60 para obter operação estável com configuração.

Para melhorar o perfil de escoamento na entrada do leito, foi acoplado um distribuidor de ar tipo Venturi na base cônica do equipamento (Batista, Brito e Béttega, 2018; Rosa e Freire, 2009). O projeto do distribuidor foi realizado com base na norma NBR ISO 5167-1 (1994) e sua obtenção foi a partir de impressão 3D utilizando filamento de ABS. Na Figura 6 são apresentadas as dimensões do leito de jorro (a), construído em acrílico, e do distribuidor Venturi (b), obtido por impressão 3D em material “ABS”. Para reduzir o acúmulo da energia estática durante os experimentos, foram colocadas fitas adesivas de alumínio no interior do leito, conectadas à um sistema de aterramento.

A unidade experimental era composta por um soprador (0,36 HP – Siemens), responsável pela alimentação de ar; tubulação de PVC com 1 in de diâmetro nominal; válvulas principal e by-pass, para ajuste da velocidade de ar no sistema; distribuidor Venturi e leito de jorro com uma tela de retenção de partículas na entrada da base cônica e um microcontrolador (Mega 2560 R3, Arduino®) conectado a um computador. A conexão entre o programa de aquisição de dados e a planilha eletrônica de armazenamento foi feita pelo *add-in* Parallax® Data Acquisition tool (PLX-DAQ). A cada segundo eram obtidos 9 valores da variável monitorada que eram lidos por uma rotina desenvolvida no *software* Arduino IDE 1.8.5 e armazenados na planilha eletrônica como uma média desses valores. A Figura 7 mostra uma

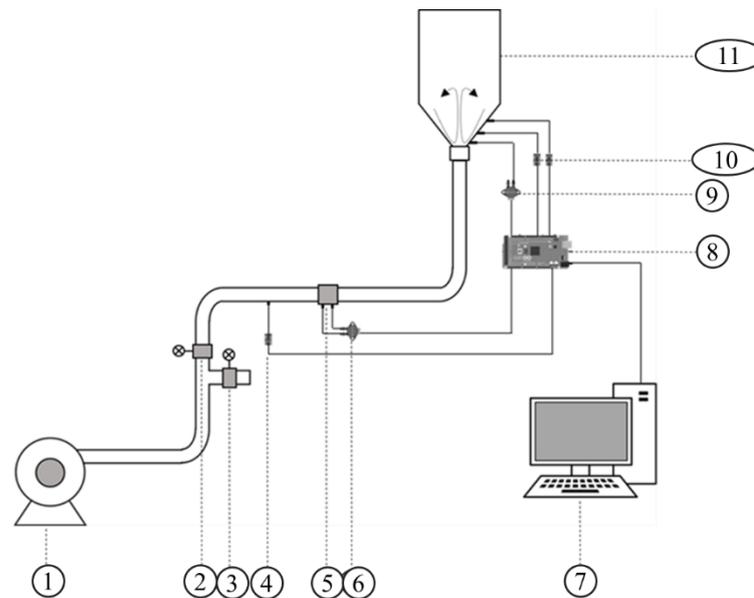
representação esquemática da unidade experimental, com os componentes da mesma e na Figura 8 é apresentada uma imagem do aparato experimental utilizado.

Figura 6. (a) Dimensões do leito de jorro (b) Dimensões do distribuidor Venturi.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 7. Representação esquemática da unidade experimental.



(1) soprador; (2) válvula principal; (3) válvula by-pass; (4) termopar tipo K; (5) placa de orifício; (6) sensor de pressão; (7) computador; (8) microcontrolador Arduino; (9) sensor de pressão; (10) termopar tipo K; (11) leito de jorro

Fonte: Acervo pessoal.

Figura 8. Unidade experimental.



Fonte: Acervo pessoal.

A velocidade do ar era estimada de forma indireta a partir da queda de pressão gerada em uma placa de orifícios associada à um sensor de pressão (MPX5010DP, NPX/Freescale®). A placa de orifícios e o sensor de pressão conectado a ela foram calibrados a partir de um tubo de Pitot conectado à um micromanômetro (530 ECO, Alnor). Pressão e velocidade foram relacionados à tensão elétrica do microcontrolador, sendo possível estabelecer uma relação entre as variáveis.

A pressão do leito foi aferida com o sensor de pressão (MPX5010DP, NPX/Freescale®) instalado após a tela de retenção do equipamento. Esse sensor foi calibrado com um manômetro de tubo em U de água. Termopares (tipo K) foram utilizados para monitoramento das temperaturas no interior do leito. Esses termopares foram calibrados utilizando um bloco de calibração (Block Calibrator DB-35L) e rampa de 5°C, em duplicata.

4.2. Caracterização do material

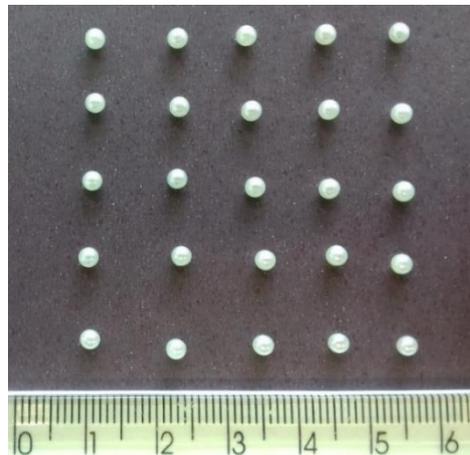
Como fase sólida foram utilizadas esferas de ABS encontradas no comércio, com aparência semelhante a pérolas. A determinação do diâmetro do material foi realizada por duas metodologias para comparação: medição direta e método de análise de imagem. Na medição direta, foi medido o diâmetro de 75 partículas utilizando paquímetro digital, com precisão de

$\pm 0,01$ mm. Quanto ao método de análise de imagens, os diâmetros foram obtidos empregando o *software Image Pró-Plus*[®]. As 75 partículas selecionadas foram divididas em três de grupos de 25, para facilitar a análise. Na Figura 9 é apresentada a disposição de 25 esferas que foram utilizadas nas análises.

A massa específica aparente foi obtida por picnometria líquida, utilizando água. Foi empregado um picnômetro de 25 ml e os testes foram realizados em triplicata.

A massa específica do leito, ou densidade *bulk*, foi determinada a partir de metodologia baseada no empacotamento do material em um recipiente graduado. Utilizou-se uma proveta de 250 ml (precisão de 2 ml) e amostras de aproximadamente 100 g de material, empacotadas com o auxílio de um funil mantido a altura fixa. A partir da medida do volume ocupado pela massa de material já conhecida, estabelece-se a massa específica do leito. As medidas foram realizadas em triplicata.

Figura 9. Disposição das partículas de ABS para análise de imagem.



Fonte: Acervo pessoal.

A porosidade do leito foi calculada com base na equação 13, onde ρ_{bulk} é a densidade *bulk* e ρ_s , a massa específica aparente do sólido.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_s} \quad (13)$$

4.3. Curvas fluidodinâmicas

A curva fluidodinâmica do leito é uma resposta experimental importante para a validação dos resultados simulados. O levantamento das curvas fluidodinâmicas foi realizado

de acordo com a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974). A pressão foi monitorada durante o aumento da vazão de ar - leito fixo até jorro estável – e, posteriormente, durante a redução da vazão de ar - jorro estável até leito fixo - em cada batelada.

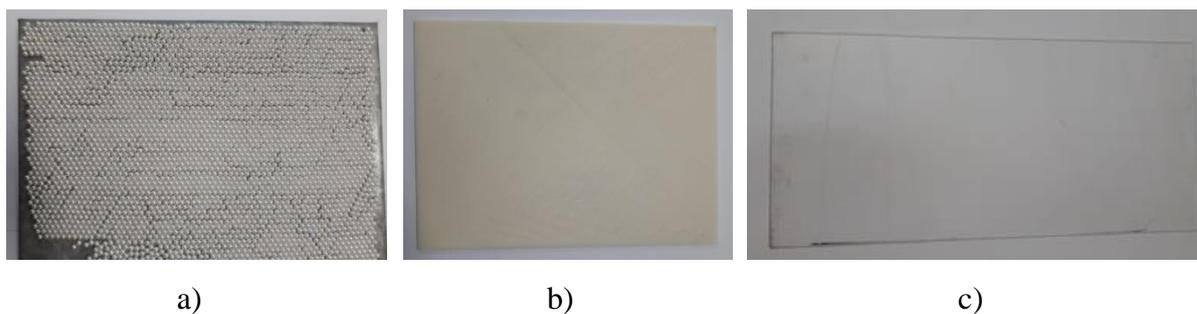
Utilizou-se três massas de esferas de ABS no levantamento das curvas fluidodinâmicas: 400 g, 300 g e 200 g. Para cada massa foram realizadas triplicatas das curvas. As massas foram estabelecidas com base nas dimensões do equipamento, a fim de manter a configuração do leito de jorro como cônico.

As medidas de pressão e velocidade correspondem a médias entre aproximadamente 50 medidas, e para cada medida calculou-se o desvio médio padrão. Os cálculos de média e desvio padrão foram feitos utilizando planilhas eletrônicas.

4.4. Parâmetros de interação

Os parâmetros de interação a serem utilizados nas simulações foram obtidos a partir de medição direta, a fim de obter valores compatíveis com os materiais utilizados nos experimentos. Para as interações partícula-superfície utilizou-se uma placa de acrílico com dimensões de 430x200x26 mm, uma vez que o leito de jorro foi confeccionado em acrílico. Para as interações partícula-partícula, as medidas foram feitas com duas superfícies: uma placa metálica de 200x40x30 mm, com esferas de ABS coladas, recobrando a superfície e uma placa de ABS, impressa a partir de impressora 3D, de 200x15x30 mm. O uso das placas é justificado pelo conceito de raio infinito, como empregado por Lima (2017). Na Figura 10 são apresentadas as superfícies utilizadas nas interações partícula-partícula e partícula-parede.

Figura 10. Superfícies de interação partícula-partícula: a) Placa recoberta com esferas de ABS, b) Placa de ABS, c) Placa de acrílico.

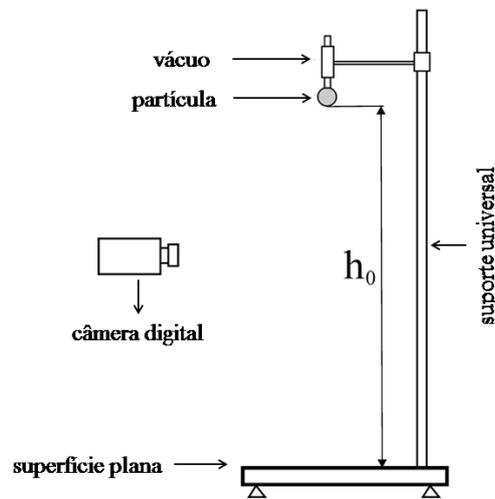


Fonte: Acervo pessoal.

4.4.1. Coeficiente de restituição

O coeficiente de restituição foi obtido utilizando o teste de queda livre. O aparato experimental utilizado contava com uma bomba de vácuo, utilizada para manter a altura inicial da partícula constante, câmera de alta resolução Redlake Imaging PCI 2000 S, com 8000 *frames* por segundo e *software* MotionScope 2.2.1 para captura da trajetória das partículas. Os parâmetros de interação partícula-partícula foram obtidos utilizando a placa lisa de ABS e os parâmetros de interação partícula-parede, com a placa de acrílico. Os testes não foram realizados com a placa recoberta com ABS devido à irregularidade da superfície, que dificultava a obtenção de trajetórias verticais retilíneas. A Figura 11 traz uma representação do aparato utilizado, enquanto que na Figura 12 são apresentadas imagens do aparato utilizado.

Figura 11. Esquema do aparato experimental para obtenção do coeficiente de restituição.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 12. Aparato experimental utilizado na obtenção do coeficiente de restituição.



Fonte: Acervo pessoal.

4.4.2. Coeficiente de atrito estático

Para obtenção do coeficiente de atrito estático utilizou-se um plano inclinado, como o apresentado na Figura 13, construído com base na Norma ASTM G115-10 (2018). A base fixa e superfície móvel são retângulos, com dimensões de 400x200 mm, e sobre a superfície móvel era fixada a superfície de contato de interesse. Para as interações partícula-partícula foram utilizadas a placa de ABS e a placa recoberta com esferas enquanto que para as interações partícula-parede, foi utilizada a placa de acrílico.

Figura 13. Plano inclinado para obtenção dos coeficientes de atrito.

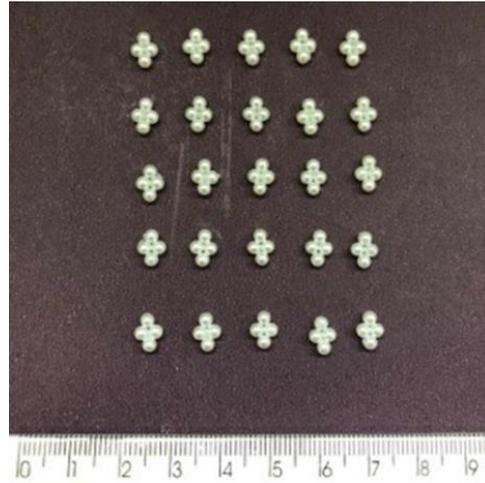


Fonte: Acervo pessoal.

A inclinação da superfície móvel foi variada manualmente e o ângulo de interesse correspondia ao momento em que os corpos iniciavam o deslizamento. A medida do ângulo era feita a partir de um transferidor instalado na extremidade fixa do aparato.

Os corpos utilizados consistiam em 4 esferas coladas, a fim de garantir que o movimento fosse de deslizamento e não rolamento. Esse procedimento foi adotado pois as esferas tendem a rolar sobre o plano inclinado ao invés de deslizarem (Chen *et al.*, 2015; Li, Xu e Thornton, 2005). Na Figura 14 são apresentados os conjuntos de partículas utilizados nos testes.

Figura 14. Conjunto de partículas coladas para obtenção de coeficiente de atrito estático.

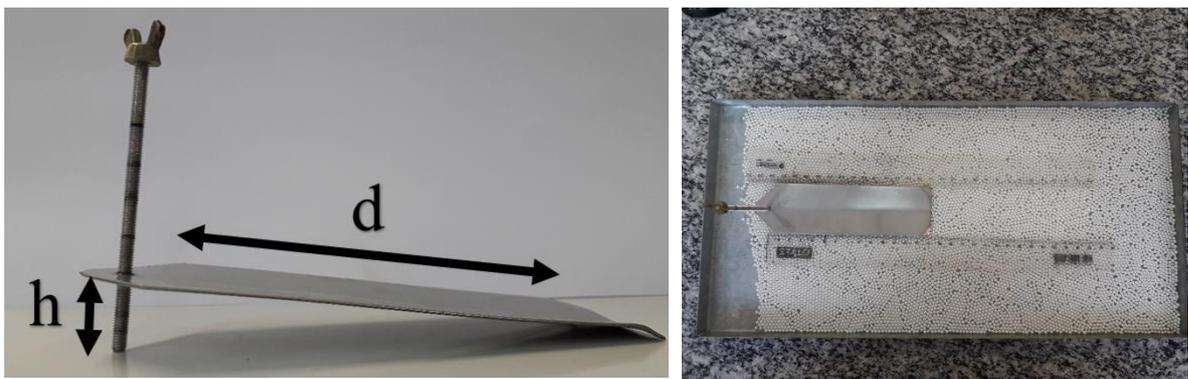


Fonte: Acervo pessoal.

4.4.3. Coeficiente de atrito de rolamento

Na obtenção dos coeficientes de atrito de rolamento utilizou-se uma rampa de lançamento como a apresentada na Figura 15. A rampa foi construída em alumínio, tem comprimento (l) de 14,5 cm e a altura (h) correspondente à inclinação é de 0,5 cm. A construção da rampa foi feita com base na Norma ATSM G194-08 (2013). Para as interações partícula-partícula utilizou-se a placa com esferas coladas e a placa lisa de ABS, enquanto que para as interações partícula-parede, utilizou-se a placa de acrílico. Foram consideradas apenas as medidas obtidas a partir de trajetórias retilíneas.

Figura 15. Aparato experimental para obtenção de coeficiente de atrito de rolamento (a) rampa de lançamento, (b) aparato de interação partícula-partícula.



(a)

(b)

Fonte: Acervo pessoal.

5. MODELAGEM MATEMÁTICA

Nesta seção são apresentados o equacionamento de cada abordagem e os modelos de arraste e turbulência utilizados. Tendo em vista que o intuito é simular utilizando a fluidodinâmica de leitos de jorro, as equações de transferência de massa e energia não foram incluídas, sendo consideradas apenas as equações da continuidade e de transferência de quantidade de movimento.

5.1. Equacionamento TFM

Como já foi descrito anteriormente, o equacionamento da modelagem TFM é composto por equação da continuidade e balanço de quantidade de movimento, com estrutura similar para ambas as fases. Assumindo que não há transferência de massa entre as fases, a equação da continuidade para as fases fluida (f) e sólida(s) são apresentadas por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{u}_f) = 0 \quad (\text{fase fluida}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{u}_s) = 0 \quad (\text{fase sólida}) \quad (15)$$

onde α_q , ρ_q e \vec{u}_q são, respectivamente, fração volumétrica de fase, densidade e velocidade da fase q . O conceito de fração volumétrica de fase é incorporado ao modelo pois as fases são consideradas contínuos interpenetrantes. O somatório das frações deve ser igual a 1:

$$\alpha_f + \alpha_s = 1 \quad (16)$$

O balanço geral de quantidade de movimento para fase fluida e sólida são expressos pelas equações (17) e (18), respectivamente. Neste trabalho, apenas a força da gravidade é considerada como força de campo atuante.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \vec{u}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{u}_f \vec{u}_f) \\ = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + \beta(\vec{u}_f - \vec{u}_s) \quad (\text{fase fluida}) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{u}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{u}_s \vec{u}_s) \\ = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} - \beta(\vec{u}_f - \vec{u}_s) \quad (\text{fase sólida}) \end{aligned} \quad (18)$$

onde p é a pressão compartilhada pelas fases, p_s é a pressão de sólidos $\bar{\tau}_q$ é o tensor das tensões de Reynolds da fase q , \vec{g} é a aceleração da gravidade e β é o coeficiente de troca de quantidade de movimento entre fases.

Como complemento dos balanços é necessário um conjunto de equações referente à troca de quantidade de movimento sólido-sólido, que representa as forças interfaciais, tensão entre sólidos e turbulência das fases. As propriedades da fase sólida de pressão e viscosidades cisalhante e *bulk* são obtidas a partir da Teoria Cinética Granular, desenvolvida por Lun *et al.* (1984), baseada na Teoria Cinética dos Gases.

Um segundo conjunto de equações é necessário, esse referente à troca de quantidade de movimento gás-sólidos, que define a força de arraste exercida sobre as partículas em sistemas fluido-sólido. O efeito da turbulência também é incluído nas simulações, para isso utiliza-se um modelo de turbulência. Modelo de arraste e de turbulência são apresentados na sequência.

5.2. Força de arraste

A força de arraste surge do contato das partículas com o fluido, onde as velocidades diferem. Esse fenômeno provoca a troca de quantidade de movimento, interferindo no gradiente de velocidade. Modelos de arraste para sistemas densos são, normalmente, baseados em observações empíricas, devido à sua complexidade. Para leitos de jorro são encontrados na literatura alguns modelos, e dentre esses: Beetstra; Syamlal-O'Brien, Wen-Yu, Gidaspow. Não existe, ainda, um consenso sobre qual modelo pode reproduzir mais precisamente o comportamento das partículas no leito de jorro. Contudo, o modelo mais empregado é o de Gidaspow, Bezburuah e Ding (1992), por isso sua escolha para este trabalho ((Moliner *et al.* 2017a). O modelo é combinação da equação de Ergun (1952) para a fase densa e Wen and Yu (1966) para a região de fase diluída, apresentadas nas equações a seguir:

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\vec{u}_s - \vec{u}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2,65}, \quad \alpha_f > 0,8 \quad (19)$$

$$\beta = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_f) \mu_f}{\alpha_f d_s^2} + 1,75 \frac{\alpha_s \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s}, \quad \alpha_f \leq 0,8 \quad (20)$$

em que d_s é o diâmetro da partícula e C_D é o coeficiente de arraste, calculado a partir da equação 2, baseada no número de Reynolds relativo, obtido pela equação 21.

$$C_D = \frac{24}{\alpha_f Re_s} \left[1 + 0,15(\alpha_f Re_s)^{0,687} \right] \quad (21)$$

em que,

$$Re_s = \frac{\rho_f d_s |\vec{u}_s - \vec{u}_f|}{\mu_f} \quad (22)$$

5.3. Modelo de turbulência

Segundo Moliner *et al.* (2017a), o papel da turbulência na modelagem de leitos de jorro não foi discutido ao ponto de determinar o melhor modelo. Na maior parte dos casos, é utilizado o modelo $k - \varepsilon$ (Alobaid, 2015; Golshan, Zarghami e Mostoufi, 2017; Liu *et al.*, 2015a; Yang *et al.*, 2013). O modelo foi proposto por Launder e Spalding (1974) e é composto por duas equações de transporte: uma para a energia cinética turbulenta (k) e outra para a taxa de dissipação (ε). Contudo, muitos casos desconsideram a turbulência (Golshan, Esgandari e Zarghami, 2017; Ren *et al.*, 2014; Ebrahimi *et al.*, 2017).

No Fluent são encontrados dentre os modelos de turbulência o modelo $k - \varepsilon$, o modelo $k - \omega$ e o Reynolds Stress. O modelo utilizado neste trabalho será o $k - \varepsilon$ disperso, indicado para baixas concentrações da fase secundária, como ocorre no canal de jorro, onde o escoamento apresenta maior turbulência. Na equação 23 é apresentado o tensor das tensões de Reynolds, aplicado nas equações da conservação de quantidade de movimento para a fase fluida:

$$\bar{\tau}_f = -\frac{2}{3} (\alpha_f \rho_f \kappa_f + \alpha_f \rho_f \mu_{f,t} \nabla \cdot \vec{u}_f) \bar{I} + \alpha_f \rho_f \mu_{f,t} (\nabla \vec{u}_f + \nabla \vec{u}_f^T) \quad (23)$$

onde $\mu_{f,t}$ corresponde à viscosidade turbulenta. Essa viscosidade é função da energia cinética turbulenta da fase fluida e é obtida no modelo $k - \omega$ por:

$$\mu_{f,t} = \rho_f C_\mu \frac{\kappa_f^2}{\varepsilon_f} \quad (24)$$

onde C_μ é o parâmetro de turbulência, cujo valor é 0,09.

As equações de transporte do modelo são apresentadas em 25 e 26:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f K_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{u}_f K_f) \quad (25)$$

$$= \nabla \cdot \left(\alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_k} \nabla K_f \right) + \alpha_f G_{k,f} - \alpha_f \rho_f \varepsilon_f + \alpha_f \rho_f \prod_{K,f}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \varepsilon_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{u}_f \varepsilon_f) \quad (26)$$

$$= \nabla \cdot \left(\alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_k} \nabla \varepsilon_f \right) + \alpha_f \frac{\varepsilon_f}{k_f} (C_1 G_{k,f} - C_2 \rho_f \varepsilon_f) + \alpha_f \rho_f \prod_{\varepsilon,f}$$

onde $\prod_{K,f}$ representa a influência da fase dispersa na propriedade K da fase fluida; $\prod_{\varepsilon,f}$ é a influência da fase dispersa na propriedade ε da fase fluida e $G_{k,f}$ é o termo de geração de energia cinética turbulenta.

A turbulência para a fase dispersa não é obtida a partir das equações de transporte, como para o fluido. São utilizadas escalas de tempo e comprimento para avaliar os coeficientes de dispersão, as funções de correlação e a energia cinética turbulenta de cada fase dispersa (ANSYS 2018).

5.4. Equacionamento CFD-DEM

Nesta abordagem, o equacionamento da fase fluida continua sendo similar à modelagem TFM. A equação da continuidade e balanço de quantidade de movimento da fase fluida (f) são expressos por (6) e (7), respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{u}_f) = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \vec{u}) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{u} \vec{u}) = -\alpha_f \nabla p - \alpha_f \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_f - \vec{F} + \alpha_f \rho_f \vec{g} \quad (28)$$

onde α_f é a fração volumétrica da fase- f , ρ_f é a massa específica da fase f , \vec{u}_f é a velocidade da fase f , ∇p é o gradiente de pressão, \vec{g} a aceleração da gravidade e $\bar{\bar{\tau}}_f$ o tensor de tensão viscosa.

A fração volumétrica do fluido (α_f) é definida como a fração de fluido em cada célula com volume V_{cel} . É chamada também de porosidade ou fração de vazios e pode ser estimada por meio da equação 29 (Hoomans *et al.* 1996):

$$\alpha_f = 1 - \frac{1}{V_{cel}} \sum_{i=1}^{k_v} \sigma_i V_i \quad (29)$$

onde k_v é o número de partículas localizadas em cada célula de volume (V_{cel}) e $\sigma_i \in [0, 1]$ denota a fração volumétrica de partículas na célula.

A média da força de interação entre as fases pela unidade de volume (\vec{F}) agindo nas partículas devido ao movimento da fase fluida em cada célula é expressa pela equação (30), onde \vec{f}_i^{f-p} é a força de interação entre o fluido e a partícula.

$$\vec{F} = \frac{1}{V_{cel}} \sum_{i=1}^{k_v} \vec{f}_i^{f-p} \quad (30)$$

Uma vez que a fase sólida é tratada como discreta, o equacionamento passa a ser feito utilizando as equações do movimento de Newton aplicadas à cada partícula i com massa m_i . O movimento translacional é expresso pela equação 31 e o movimento rotacional, pela equação 32.

$$m_i \frac{d\vec{u}_i}{dt} = \sum_{j \in CLi} \vec{f}_{ij}^{p-p} + \vec{f}_i^{f-p} + \vec{f}_i^g \quad (31)$$

$$I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \sum_{j \in CLi} (\vec{M}_{ij}^t + \vec{M}_{ij}^r) \quad (32)$$

O termo $\sum_{j \in CLi} \vec{f}_{ij}^{p-p}$ representa a soma das forças de interação entre a partícula i e as demais, \vec{f}_i^{f-p} são as forças de interação entre partícula i e fluido, \vec{f}_i^g a ação da gravidade sobre a partícula i , I_i é a inércia rotacional da partícula i , $\vec{\omega}_i$ é a velocidade angular da partícula $\vec{\omega}_i$, \vec{M}_{ij}^t é o torque devido à colisão entre as partículas e \vec{M}_{ij}^r o torque por rotação.

A força da gravidade (\vec{f}_i^g) é calculada por:

$$\vec{f}_i^g = m_i g \quad (33)$$

A força de interação fluido-partícula (\vec{f}_i^{f-p}) é equivalente à força de arraste estacionária \vec{f}_i^d , descrito por:

$$\vec{f}_i^{f-p} = \vec{f}_i^d \quad (34)$$

e a força de arraste é obtida a partir de:

$$\vec{f}_i^d = \frac{V_p \beta}{1 - \alpha_f} (\vec{u}_f - \vec{u}_i) \quad (35)$$

onde β é o coeficiente de troca de quantidade de movimento entre as fases, calculado a partir do modelo de arraste de Gidaspow, apresentado na seção 5.2.

As forças de contato (\vec{f}_{ij}^{p-p}) são obtidas a partir de uma lei de deslocamento de forças. As propriedades da colisão são calculadas em função de sobreposições normais e tangenciais, propriedades físicas e histórico de colisões das partículas. Estas são detalhadas na seção 5.5.

O torque rotacional (\vec{M}_{ij}^t) é causado pelo contato na direção tangencial entre as partículas e é responsável por fazer com que elas girem. É definido como:

$$\vec{M}_{ij}^t = R_i \vec{n}_{ij} \times \vec{f}_{ij}^c \quad (36)$$

em que R_i corresponde ao raio da partícula i , \vec{n}_{ij} é o vetor unitário da partícula i para a partícula j e \vec{f}_{ij}^c a força de contato entre as partículas i e j .

Quanto ao torque de resistência ao rolamento, ele decorre da irregularidade da distribuição da pressão de contato na área onde ocorre o contato. Esse torque atua como uma resistência à rotação das partículas. Existem diferentes modelos de torque de resistência ao rolamento na literatura, que podem ser classificados em quatro categorias ((Ai *et al.*, 2011):

- Modelos Tipo A: Modelos de torque constante direcional;
- Modelos Tipo B: Modelos viscosos;
- Modelos Tipo C: Modelos elástico-plásticos *spring-dashpot*;
- Modelos Tipo D: Modelos de contato independente.

Segundo Norouzi *et al.*, (2016), os Modelos Tipo C oferece uma visão mais realística do torque de resistência ao rolamento que os demais modelos e é geralmente utilizado em fluxos *quasi* estáticos e granulares dinâmicos.

Modelos Tipo C consideram o torque de resistência ao rolamento como o somatório do torque mecânico da mola (\vec{M}_{el}^r) e do torque de amortecimento viscoso (\vec{M}_{diss}^r), conforme equação:

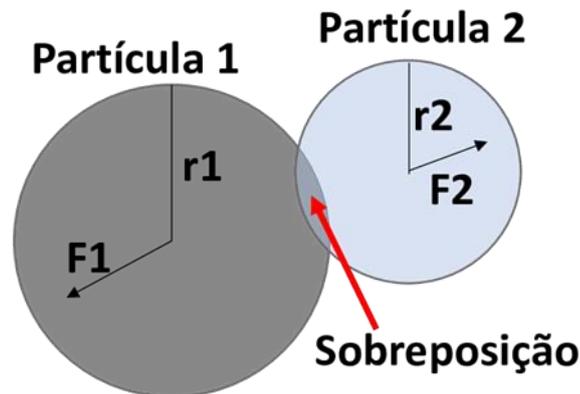
$$\vec{M}_{ij}^r = \vec{M}_{el}^r + \vec{M}_{diss}^r \quad (37)$$

O torque da mole é calculado com base no procedimento experimental semelhante ao descrito em modelos histeréticos. Enquanto que o torque de amortecimento viscoso depende da taxa de variação na rotação relativa entre duas partículas em contato.

5.5. Forças de contato

As colisões entre as partículas são descritas pelo modelo *soft-sphere* no DEM, como já citado anteriormente. As forças de colisão das partículas são obtidas a partir da deformação das mesmas. Na literatura existem alguns modelos utilizados para modelar as colisões, entre eles: modelo linear *spring* (modelo linear mola), modelo linear *spring-dashpot* (modelo linear mola-amortecedor) e o Modelo de Hertz-Mindlin. Di Renzo e Di Maio (2004) constataram que o modelo linear *spring-dashpot* é o mais eficiente para prever as forças de contato entre as partículas em simulações de fluxo granular. A Figura 16 ilustra a colisão entre duas partículas segundo o modelo *spring-dashpot*.

Figura 16. Modelo de forças de contato spring-dashpot (mola-amortecedor).



Fonte: Tavares, Almeida e Santos (2015)

A força sobre a partícula 1 (F_1), corresponde à força de contato entre as partículas 1 e 2 (f_{12}^{p-p}), e pode ser decomposta em força de contato normal e força de contato tangencial:

$$\vec{f}_{12}^{p-p} = \vec{F}^n + \vec{F}^t \quad (38)$$

A força normal da colisão (\vec{F}^n), pode ser calculada por:

$$\vec{F}^n = [K\delta + \gamma(\vec{v}_{12} \cdot \vec{e}_{12})]\vec{e}_{12} \quad (39)$$

onde K é a constante *spring* (constante da mola), δ é a deformação, γ é o coeficiente de amortecimento, \vec{v}_{12} é a velocidade relativa entre as partículas 1 e 2, e \vec{e}_{12} o vetor unitário. De acordo com a terceira lei de Newton, a força exercida sobre a partícula 2 (\vec{F}_2) é descrita por:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \quad (40)$$

Para a colisão linear elástica, o vetor unitário (\vec{e}_{12}), referente à distância entre a partícula 1 para a partícula 2, é definido pela equação 39, enquanto a deformação, pela equação 40.

$$\vec{e}_{12} = \frac{(x_2 - x_1)}{\|x_2 - x_1\|} \quad (41)$$

$$\delta = \|x_2 - x_1\| - (r_1 + r_2) \quad (42)$$

onde x_1 and x_2 representam a posição da partícula 1 e 2, e r_1 e r_2 representam o raio da partícula 1 e 2, respectivamente.

O coeficiente de amortecimento e a velocidade relativa são dados, respectivamente, por:

$$\gamma = -2 \frac{m_{12} \ln \eta}{t_{coll}} \quad (43)$$

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 \quad (44)$$

onde m_{12} é chamada de “massa reduzida”, calculada pela equação 43; η é o coeficiente de restituição; t_{coll} é o tempo de colisão, calculado pela equação 44; \vec{v}_1 e \vec{v}_2 a velocidade das partículas 1 e 2, respectivamente.

$$m_{12} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (45)$$

$$t_{coll} = f_{loss} \sqrt{\frac{m_{12}}{K}} \quad (46)$$

$$f_{loss} = \sqrt{\pi^2 + \ln^2 \eta} \quad (47)$$

A força tangencial entre as partículas é baseada na lei do atrito de Coulomb, descrita por:

$$\vec{F}^t = (\mu_s + \mu_r) \vec{F}^n \quad (48)$$

onde μ_s é o coeficiente de atrito estático, μ_r é o coeficiente de atrito de rolamento e \vec{F}^n é a força normal de contato com a superfície.

Os coeficientes de restituição (η), de atrito estático (μ_s) e de atrito estático (μ_r) são os parâmetros de entrada das simulações, obtidos experimentalmente por medição direta no caso deste trabalho.

É importante destacar que não há garantias de que, os valores individuais dos parâmetros de interação, medidos experimentalmente, representem corretamente os choques dentro do leito de jorro, uma vez que as partículas estão sob efeito de todo o leito de sólidos (*bulk*). Contudo, a combinação dos parâmetros tende a minimizar essa sensibilidade.

6. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

6.1. Infraestrutura computacional e ferramentas

As simulações foram conduzidas em computadores instalados no Laboratório de Simulação de Escoamentos Multifásicos (LabSEM) vinculado ao Centro de Secagem de Pastas e Sementes do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. Na Tabela 2 são apresentadas as configurações dos *hardwares* utilizados.

Tabela 2. Infraestrutura computacional.

Etapa de trabalho	Plataforma	Núcleos	Características Principais
Aprendizado do <i>Software</i> e Simulações TFM	Windows 64 bits	2	Intel Xeon X5482 3,2 GHz e 3,19 GHz, 16 GB RAM, placa de vídeo NVIDIA Quadro FX1700
Simulações TFM	Windows 64 bits	8	Intel Core i5 3450 3,1 GHz, 8 GB RAM, placa de vídeo AMD Radeon HD 7500 Series
Simulações CFD-DEM	Windows 64 bits	8	Intel Core i7 6700K 4GHz, 16GB RAM, placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 750 Ti

Fonte: Acervo pessoal.

A construção das geometrias foi feita através da ferramenta *Desing Modeler*. As malhas foram geradas utilizando o *software Meshing* e as simulações, conduzidas no Fluent[®], pertencentes ao pacote ANSYS[®] Student 19.1.

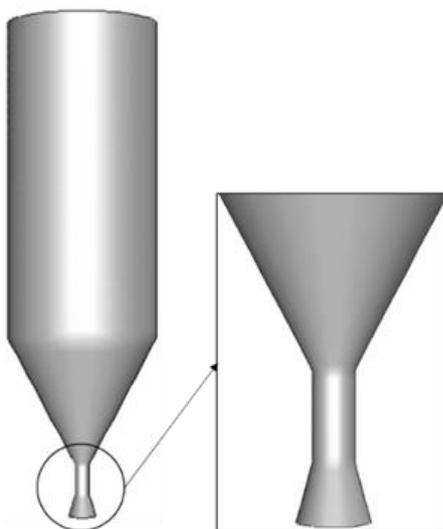
6.2. Domínio computacional

O domínio computacional é composto pelo leito jorro e distribuidor tipo Venturi, com geometria tridimensional e dimensões iguais as utilizadas nos experimentos. Na Figura 17 é apresentado o domínio computacional obtido a partir da ferramenta *Design Modeler*.

A malha computacional pode influenciar de forma significativa o resultado final de simulações numéricas. A combinação entre o tamanho da célula de fluido e o passo de tempo utilizado é fundamental para a convergência da simulação. Contudo, sabe-se que nas simulações

CFD-DEM, o tamanho de cada célula deve ser maior que o tamanho da maior partícula do sistema (LIU 2013), enquanto que nas simulações TFM, não há restrições.

Figura 17. Domínio computacional empregado nas simulações.



Fonte: Acervo pessoal.

As malhas construídas foram baseadas no estudo de Kieckhefen *et al.* (2018), que simularam um leito jorro utilizando abordagem CFD-DEM. Neste trabalho, as malhas foram construídas com refinamentos diferentes de acordo com a região do equipamento. Na entrada, o tamanho das células era de aproximadamente 1,7 vezes o diâmetro da partícula. Na região cônica e região do cilindro, onde havia movimentação de partículas, as células tinham tamanho de cerca de 3,5 vezes o diâmetro da partícula. Quanto à região superior, o espaçamento era de aproximadamente 7 vezes o diâmetro da partícula.

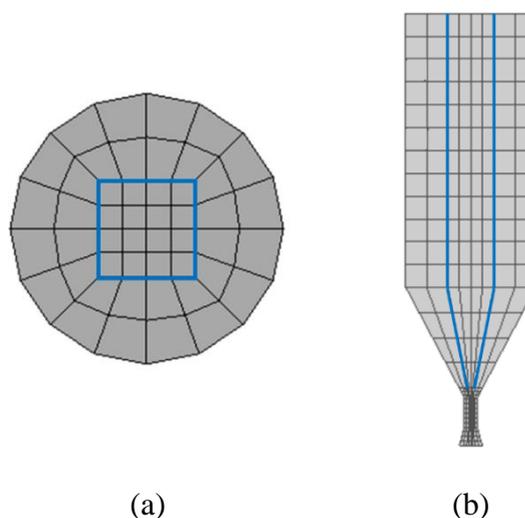
As malhas foram construídas com duas regiões com refinamento diferente: quadrilátero na região central do equipamento, definida como região central, onde ocorre a formação do canal de jorro e a região entre o centro e a parede do equipamento, correspondente à região anular, como apresentado na

Figura 18. Em simulações CFD-DEM recomenda-se, também, que as malhas sejam estruturadas, assim, empregou-se uma estrutura de blocos com células hexaédricas na construção das malhas.

Para cada abordagem foram construídas três malhas com refinamentos diferentes, apresentadas nas próximas seções, e na escolha da malha, utilizou-se o teste de independência de malha GCI (Grid Convergence Index). O método GCI foi desenvolvido por Roache (1994) e baseia-se na extrapolação de Richardson. O procedimento de cálculo é descrito por Elsayed

and Lacor (2011) e a escolha da malha é feita a partir da resposta de menor desvio frente ao valor extrapolado. A variável resposta analisada foi a pressão (P) na seção de entrada do leito e as simulações consistiram em bateladas de 5 segundos, com velocidade do ar de entrada de 18 m/s, em regime laminar e sem a presença de fase sólida.

Figura 18. Detalhes da construção das malhas. (a) Vista superior, (b) Corte vertical.



Fonte: Acervo pessoal.

6.3. Solução numérica: TFM

Na Tabela 3 são apresentados os espaçamentos entre nós das seções transversais do cilindro e da entrada do leito e o número de células das malhas testadas para as simulações TFM. Quanto às malhas, essas são apresentadas na Figura 19. O espaçamento entre nós vertical do distribuidor foi mantido constante nas três malhas, devido às suas dimensões muito menores que a do leito.

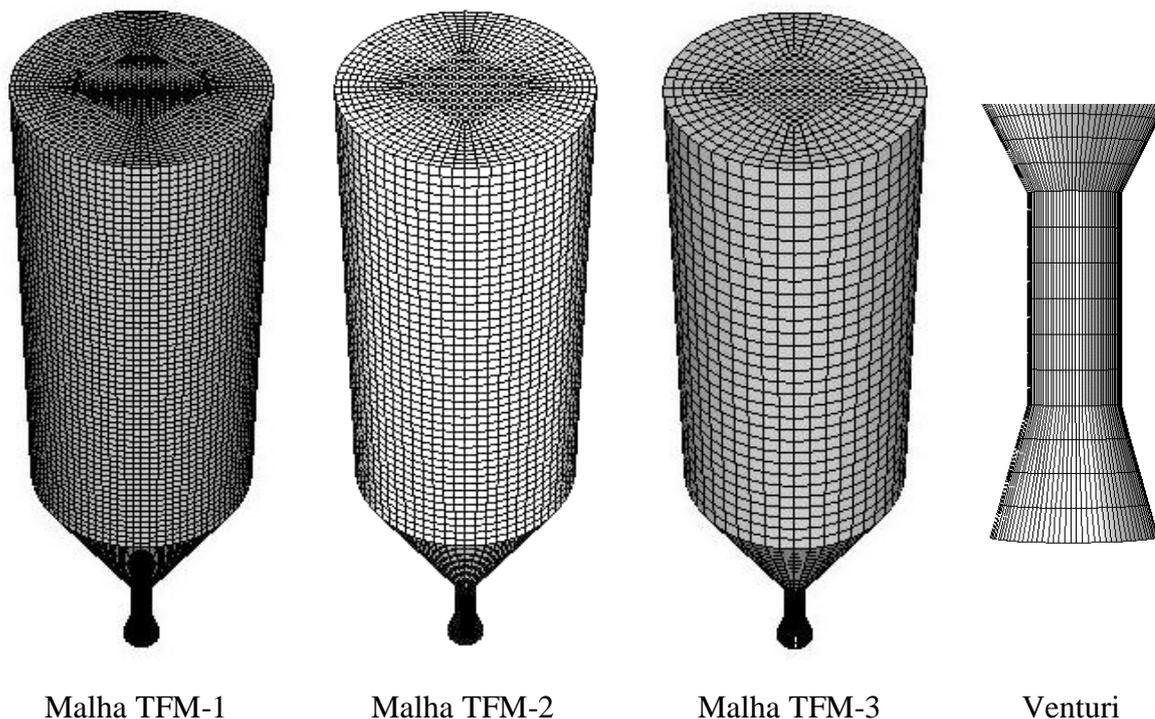
Tabela 3. Configuração das malhas testadas para as simulações TFM.

Malha	Espaçamento entre nós – Entrada do cone		Espaçamento entre nós – Cilindro		Número de células
	Região central	Região anular	Região central	Região anular	
	TFM-1	0,13 dp	0,13 – 0,15 dp	0,75 dp	
TFM-2	0,18 dp	0,21 – 0,39 dp	1,01 dp	1,22 – 2,25 dp	74613

TFM-3	0,25 dp	0,31 – 0,56 dp	1,43 dp	1,74 – 3,18 dp	26880
-------	---------	----------------	---------	----------------	-------

Fonte: Acervo pessoal.

Figura 19. Malhas testadas para as simulações TFM.



Fonte: Acervo pessoal.

A fase sólida foi inserida no domínio computacional a partir das medidas experimentais de altura de leito estático e fração volumétrica de sólidos, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores experimentais de fração volumétrica de sólidos e altura de leito estático inicial.

Fração volumétrica de sólidos		0,631
Altura de leito estático inicial (cm)	Massa: 200 g	6,0
	Massa: 300 g	7,5
	Massa: 400 g	8,5

As simulações consistiram de 9 segundos em regime transiente, onde era aplicado o regime de escoamento laminar nos 3 segundos iniciais, e posteriormente, regime turbulento. Foi utilizado o procedimento de média das variáveis monitoradas ao longo dos 2 segundos finais da simulação. Optou-se por utilizar o regime laminar inicialmente para garantir o desenvolvimento do perfil dentro do equipamento e evitar instabilidades nas simulações. Na

Tabela 4 são apresentados os modelos e parâmetros mais relevantes utilizados nas simulações TFM.

Tabela 4. Principais modelos e parâmetros de entrada adotados nas simulações TFM.

Condições de contorno	Entrada do sistema: velocidade do ar prescrita
	Posição de saída: condição de pressão prescrita
	Parede: condição de não deslizamento do fluido
Método de solução	Acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE
	Discretização - Quantidade de movimento: QUICK
	Discretização - Fração volumétrica: QUICK
	Discretização – Turbulência: Upwind de 1ª ordem
	Formulação transiente: Implícita de 2ª ordem
Modelo de turbulência	$k - \varepsilon$ padrão disperso
Viscosidade	Granular – Gidaspow
	Granular bulk - Lun <i>et al.</i>
	Fricção - Schaeffer
Limite de empacotamento	0,63
Critério de convergência	1×10^{-3}
Passo no tempo (s)	1×10^{-4}
Número de passos no tempo	90000
Máximo de iterações por passo	100
Parâmetros de relaxação	Quantidade de movimento: 0,2
	Fração de volume: 0,5
	Fase discreta: 0,5

6.4. Solução numérica: CFD-DEM

Quanto as malhas testadas para as simulações com o acoplamento CFD-DEM, as configurações das malhas são apresentadas na Tabela 5, enquanto as malhas são apresentadas na Figura 20. Devido ao refinamento da malha na região central do leito, não foi possível construir malhas com espaçamento entre nós menores que o apresentado na malha DEM-1. Malhas menores apresentaram problemas de convergência. O espaçamento entre nós foi

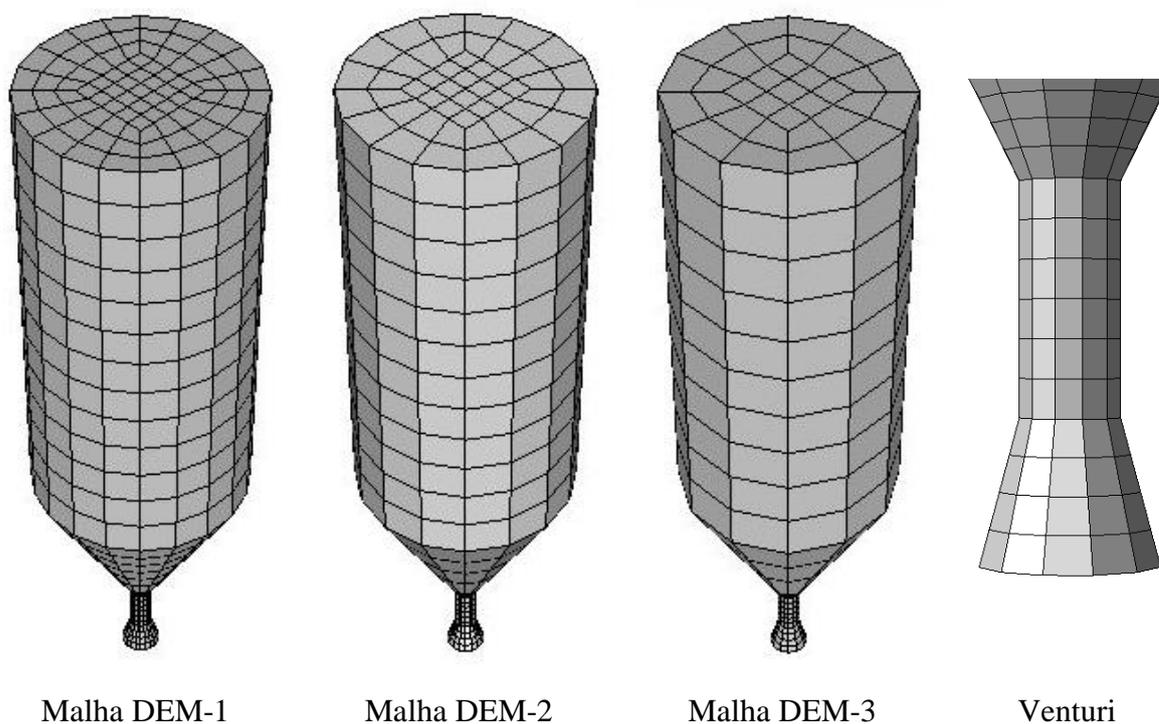
estabelecido com base no diâmetro da partícula (dp). Novamente, é mantido o espaçamento entre nós vertical do distribuidor, em função das dimensões menores que do leito de jorro.

Tabela 5. Configuração das malhas testadas para as simulações CFD-DEM.

Malha	Espaçamento entre nós –		Espaçamento entre nós -		Número de células
	Entrada do cone		Cilindro		
	Região central	Região anular	Região central	Região anular	
DEM-1	0,6 dp	0,7 – 1,3 dp	3,4 dp	4,0 – 7,6 dp	2720
DEM-2	0,8 dp	1,1 – 1,7 dp	4,3 dp	6,1 - 9,6 dp	1392
DEM-3	1,0 dp	1,1 – 2,2dp	5,7 dp	6,1 – 12,7 dp	858

Fonte: Acervo pessoal.

Figura 20. Malhas testadas para simulações CFD-DEM.



Fonte: Acervo pessoal.

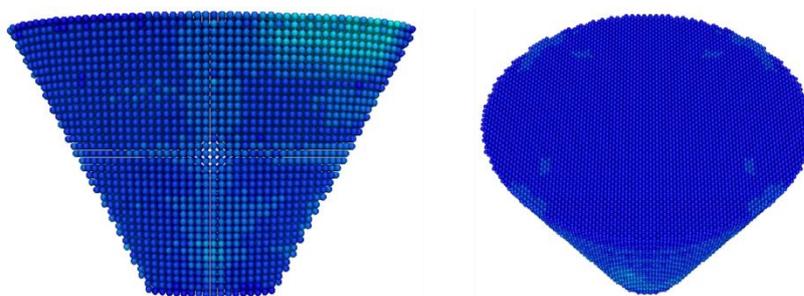
O processo de injeção das partículas foi realizado a partir de um código em linguagem C++. Com a rotina, as partículas são injetadas em camadas, conforme apresentado na Tabela 6 são apresentados os números de partículas injetadas para cada massa de amostra. Calculado o volume de cada partícula, a partir do diâmetro médio, e com a densidade do material, foi

possível obter a massa de cada partícula. Assim, pela razão entre a massa total de sólidos e a massa de cada partícula obteve-se a estimativa do número total de partículas.

Figura 21.

Na Tabela 6 são apresentados os números de partículas injetadas para cada massa de amostra. Calculado o volume de cada partícula, a partir do diâmetro médio, e com a densidade do material, foi possível obter a massa de cada partícula. Assim, pela razão entre a massa total de sólidos e a massa de cada partícula obteve-se a estimativa do número total de partículas.

Figura 21. Exemplo de injeção de partículas no sistema de camadas.



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 6. Número de partículas injetadas para cada massa simulada.

Massa (g)	Número de partículas
400	29399
300	20743
200	13857

Fonte: Acervo pessoal.

O levantamento da curva fluidodinâmica foi realizado a partir de 9 segundos, em regime transiente, com regime laminar aplicado nos 3 segundos iniciais, e regime turbulento nos outros 6 segundos. Foi utilizado o procedimento de média das variáveis monitoradas ao longo dos 2 segundos finais da simulação. Na Tabela 7 são apresentados os principais parâmetros e equações utilizados nas simulações CFD-DEM.

Tabela 7. Principais modelos e parâmetros de entrada adotados nas simulações CFD-DEM.

Condições de contorno	Entrada do sistema: velocidade do ar prescrita
	Posição de saída: condição de pressão prescrita

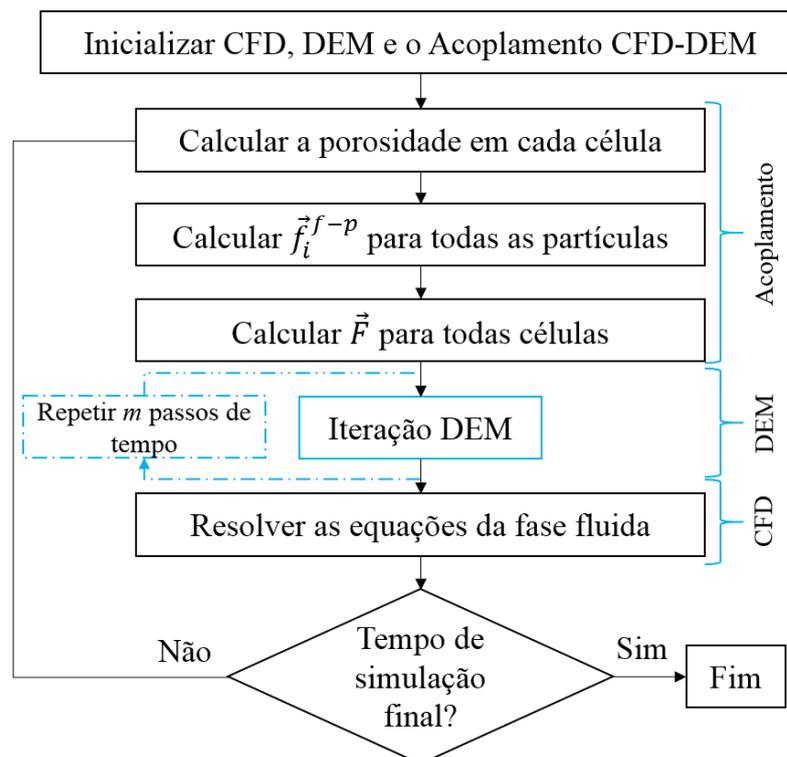
	Parede: condição de não deslizamento do fluido
Método de solução	Acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE
	Discretização - Quantidade de movimento: QUICK
	Discretização - Fração volumétrica: QUICK
	Discretização – Turbulência: Upwind de 1ª ordem
	Formulação transiente: Implícita de 2ª ordem
	Continua

Modelo de turbulência	$k - \epsilon$ padrão para fase dispersa
Força de contato	Normal: <i>spring-dashpot</i>
	Tangencial: <i>friction-spring-dashpot</i>
Critério de convergência	1×10^{-3}
Passo no tempo (s)	Fase fluida: 1×10^{-4}
	Fase sólida: 2×10^{-5}
Número de passos no tempo	100000
Máximo de iterações por passo	200
Parâmetros de relaxação	Quantidade de movimento: 0,2
	Fração de volume: 0,5
	Fase discreta: 0,5

Fonte: Acervo pessoal.

Estabelecidas a geometria e condições de contorno, passa-se para a etapa de cálculo no *software*. Na Figura 22 é apresentado o fluxograma de resolução do acoplamento CFD-DEM.

Figura 22. Acoplamento das equações de quantidade de movimento através do CFD-DEM



Fonte: Adaptado de Norouzi *et al.* (2016)

Inicialmente são inicializados os componentes da simulação. O acoplamento é então iniciado com o cálculo da porosidade (fração volumétrica do fluido) de cada célula, baseado na posição da partículas e informações da malha. Velocidade das partículas, velocidade do fluido, pressão e tensores de tensão são calculados no passo de tempo em questão e utilizados no cálculo das forças de interação partícula-fluido para cada partícula (\vec{f}_i^{f-p}).

Na sequência inicia-se o *loop* de interação do DEM, onde o valor de \vec{f}_i^{f-p} , calculado no passo de tempo do acoplamento, é usado na equação do movimento para cada partícula. O passo de tempo para a integração da equação do movimento das partículas é Δt_p e o *loop* de interação do DEM é repetido m vezes, sendo m a razão entre o passo de tempo de integração das partículas e o passo de tempo de integração do fluido (Δt_f). Ao completar o *loop* do DEM, são obtidos uma nova posição e velocidades translacional e rotacional de todas as partículas para o próximo passo de tempo do fluido.

Para resolver as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são utilizados a porosidade e forças de interação volumétrica fluido-partícula já calculados para cada célula. Como resultados de cada passo de tempo de integração do fluido (Δt_f) têm-se os campos de pressão e velocidade da fase fluida do próximo passo de tempo do fluido.

6.5. Curvas fluidodinâmicas

Após estabelecer a modelagem matemática é necessário verificar os resultados das simulações. Para isso foi utilizada a curva fluidodinâmica experimental. Foram obtidas as curvas fluidodinâmicas a partir das simulações CFD-DEM para as três massas utilizadas experimentalmente, a fim de validar o modelo. Também foi obtida a curva fluidodinâmica para as massas de 400 g e 300 g a partir do TFM para verificação do modelo e posterior comparação entre as abordagens.

Cada ponto da curva fluidodinâmica simulada consiste em uma simulação com velocidade do ar de entrada definida, partindo da velocidade máxima até a velocidade mínima que compõem a curva experimental. A entrada do domínio onde a velocidade foi definida corresponde à entrada do distribuidor. A partir do monitoramento da área da entrada do leito de jorro, obtém-se a média de pressão nessa área referente àquela velocidade. A partir da construção dessa curva fluidodinâmica é possível obter a velocidade de mínimo jorro, também utilizada na validação do modelo.

7. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

7.1. Caracterização do material

A partir da metodologia empregada de análise de imagem e medida com paquímetro, obteve-se as propriedades das esferas de ABS, apresentadas na Tabela 8. Os valores de diâmetro foram obtidos a partir de análise de imagem e medição com paquímetro enquanto que área superficial e perímetro foram obtidos apenas a partir de análise de imagem. Foi utilizado nas simulações o diâmetro de 2,93 mm, obtido a partir de análise de imagem, por apresentar menor desvio relativo quando comparado ao resultado obtido por paquímetro.

Tabela 8. Características físicas da esfera de ABS.

Propriedade	Valor médio	Desvio relativo
Diâmetro _{imagem} (mm)	2,93	0,01
Área superficial _{imagem} (mm ²)	6,86	0,03
Perímetro _{imagem} (mm)	9,35	0,04
Diâmetro _(paquímetro) (mm)	2,89	0,05

Na Tabela 9 são apresentados os dados de massa específica aparente, densidade *bulk* e porosidade obtidos em triplicata para as esferas. Os baixos desvios indicam a confiabilidade dos métodos empregados e a uniformidade das partículas.

Tabela 9. Parâmetros físicos das esferas de ABS obtidos experimentalmente.

Propriedade	Valor médio	Desvio relativo
Massa específica aparente (g/cm ³)	1,053	0,005
Densidade <i>bulk</i> (g/cm ³)	0,661	0,004
Porosidade do leito (-)	0,369	0,006

7.2. Parâmetros de interação

Nas Tabelas Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12 são apresentados os coeficientes de restituição, coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito de rolamento, respectivamente, obtidos experimentalmente para as interações partícula-partícula (*pp*) e partícula-parede (*pw*).

Os coeficientes obtidos a partir da placa recoberta com esferas de ABS estão marcados com *, enquanto que os demais coeficientes de interação partícula-partícula foram obtidos a partir da placa lisa de ABS. Foram realizadas 100 medidas experimentais para cada parâmetro, das quais foram selecionadas apenas 50, que se apresentavam distribuição normal, para compor a média.

Tabela 10. Coeficiente de restituição experimental (η).

Medida	Valor médio	Desvio relativo
$\eta_{(pw)}$	0,72	0,09
$\eta_{(pp)}$	0,81	0,02

Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 11. Coeficiente de atrito estático experimental (μ_s).

Medida	Valor médio	Desvio relativo
$\mu_{s(pw)}$	0,75	0,12
$\mu_{s(pp)}$	0,61	0,06
$\mu_{s(pp)}^*$	0,84	0,11

* - placa recoberta com esferas ABS

Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 12. Coeficiente de atrito de rolamento experimental (μ_r).

Medida	Valor médio	Desvio relativo
$\mu_{r(pw)}$	0,04	0,01
$\mu_{r(pp)}$	0,10	0,02
$\mu_{r(pp)}^*$	0,53	0,16

* - placa recoberta com esferas ABS

Comparando os dados das Tabelas *Tabela 10* a *Tabela 12*, o maior desvio relativo é referente à interação partícula-parede. Pode-se observar desvios superiores à 0,05 para os coeficientes de atrito estático (μ_s) de ambas as interações (partícula-partícula e partícula-parede). O procedimento de elevação do plano inclinado foi realizado manualmente, dificultando a repetição precisa do movimento, levando ao aumento do desvio. O maior desvio observado é para o coeficiente de atrito de rolamento (μ_r) partícula-partícula, onde foi utilizada

a superfície recoberta por partículas. Acredita-se que a superfície irregular seja o fator principal para o elevado desvio, já que os interstícios influenciavam o caminho das esferas.

Nas Tabelas Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15 são apresentados, respectivamente, os valores dos coeficientes de restituição, coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito de rolamento das interações partícula-partícula e partícula-parede obtidos por Xiao *et al.* (2017). Os autores utilizaram esferas de ABS de densidade 1100 kg/m^3 e diâmetro de 2,00 mm, e acrílico (superfície do equipamento) com densidade de 1190 kg/m^3 .

Tabela 13. Coeficientes de restituição obtidos na literatura.

Parâmetro	Valor	Desvio relativo
$\eta_{(pw)}$	0,850	0,014
$\eta_{(pp)}$	0,873	0,024

Fonte: Adaptado de Xiao *et al.* (2017).

Tabela 14. Coeficientes de atrito estático obtidos na literatura.

Parâmetro	Valor	Desvio relativo
$\mu_{s(pw)}$	0,422	0,041
$\mu_{s(pp)}$	0,360	0,039

Fonte: Adaptado de Xiao *et al.* (2017).

Tabela 15. Coeficientes de atrito de rolamento obtidos na literatura.

Parâmetro	Valor	Desvio relativo
$\mu_{r(pw)}$	0,015	0,014
$\mu_{r(pp)}$	0,030	0,011

Fonte: Adaptado de Xiao *et al.* 2017.

Comparando com os dados das Tabelas Tabela 10 a

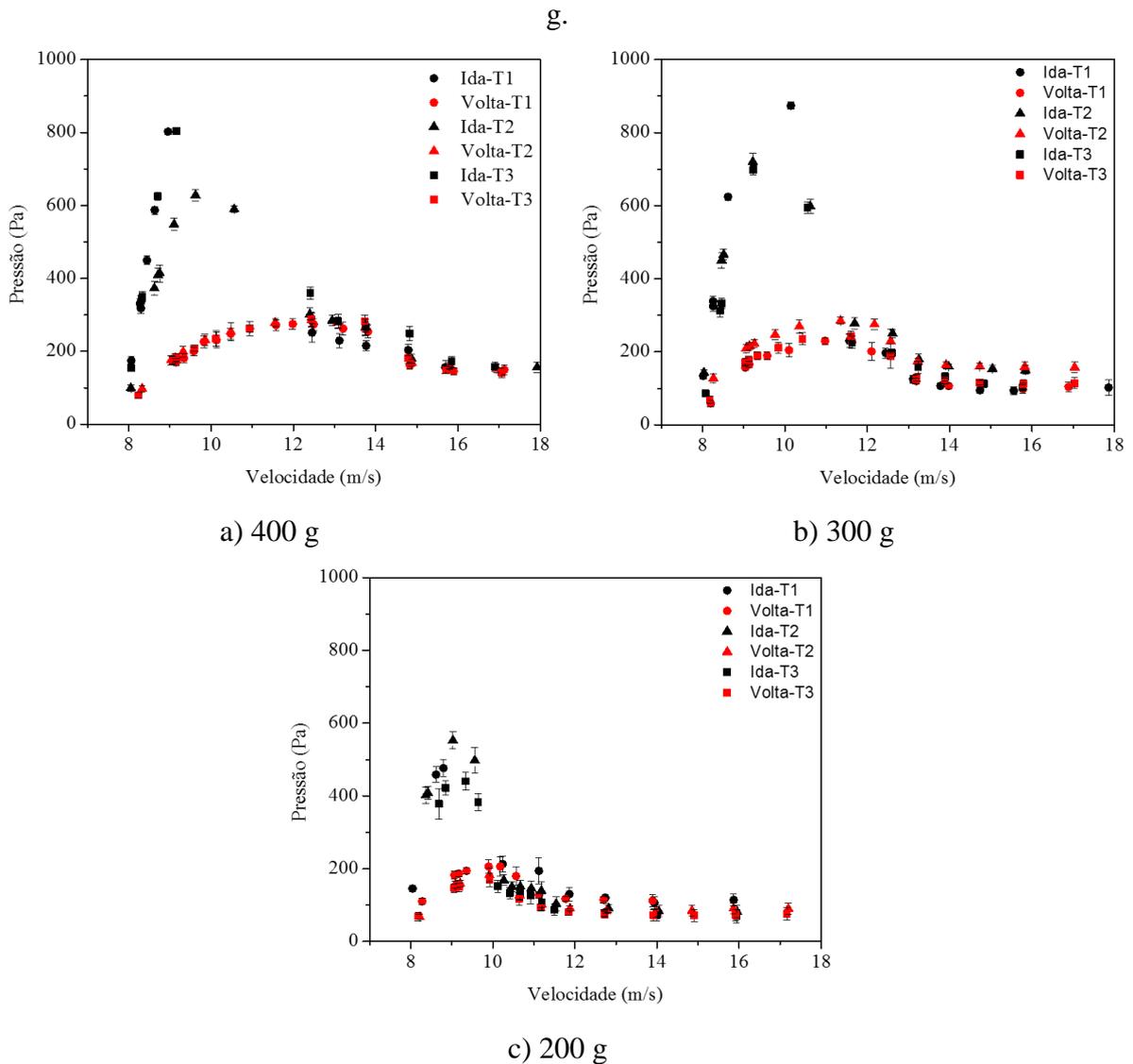
Tabela 13, observa-se que apenas os coeficientes de restituição (η) se encontram com a mesma ordem de grandeza. As maiores diferenças encontram-se nos coeficientes de atrito, especialmente para as interações partícula-partícula. O método de obtenção dos coeficientes de atrito de rolamento e estático utilizado por Xiao *et al.* (2017) é diferente do empregado neste trabalho. Nota-se também, a diferença no diâmetro das partículas e na densidade. A junção

desses fatores pode justificar a diferença entre os valores da literatura e os obtidos por medição direta.

7.3. Curvas fluidodinâmicas

Na Figura 23 são apresentadas as curvas fluidodinâmicas obtidas experimentalmente para as massas de 400 g (a), 300 g (b) e 200 g (c), onde T1, T2 e T3 correspondem às triplicatas. As variações de velocidade do ar foram realizadas manualmente, dificultando a reprodução precisa das velocidades nas triplicatas. Cada ponto da curva corresponde à média de, aproximadamente, 50 medidas e as barras de erro indicam os desvios das medidas de pressão.

Figura 23. Curvas fluidodinâmicas experimentais para as massas: a) 400 g, b) 300 g e c) 200 g.



Fonte: Acervo pessoal.

Uma vez que as medidas foram tomadas na entrada do leito de jorro após a tela de retenção, não houve a necessidade do levantamento da “curva do branco”, obtida com o leito sem carga de sólidos. A média de temperatura durante os ensaios variou entre 30°C e 33°C. Pode-se observar que, para todas as massas, a curva apresentou o comportamento esperado de leito de jorro, com um elevado aumento da pressão na curva de ida, próximo ao ponto de mínimo jorro, pressão constante após estabelecer o jorro estável e histerese entre as curvas.

As velocidades de mínimo jorro experimentais foram determinadas por meio da visualização do experimento. Durante a redução da velocidade (curva de volta), foi avaliado o momento em que a fonte deixou de existir, estabelecendo essa velocidade como velocidade de mínimo jorro. As pressões máximas foram obtidas a partir da máxima pressão atingida durante o aumento da velocidade (curva de ida). Quanto às pressões de jorro estável, correspondem às pressões referentes às maiores velocidades, quando o regime de jorro se encontra totalmente desenvolvido.

Na Tabela 16 são apresentados os valores de pressão máxima, pressão de jorro estável e velocidade de mínimo jorro obtidos para cada massa e suas respectivas alturas de leito estático. Os valores de pressão máxima, pressão de jorro estável e velocidade de mínimo jorro foram obtidos a partir da média das três corridas. Pode-se observar a tendência de aumento da pressão máxima, pressão de jorro estável e velocidade de mínimo jorro com o aumento da massa, conforme encontrado na literatura (Golshan *et al.*, 2018; Zhou e Bruns, 2012). Tal efeito é consequência da resistência ao escoamento das partículas, assim, quanto mais partículas, maior a energia necessária para romper a inércia do leito de sólidos (Olazar *et al.*, 1992, 2004).

Tabela 16. Principais parâmetros fluidodinâmicos experimentais.

Massa (g)	Altura de leito estático (cm)	Pressão máxima (Pa)	Pressão de jorro estável (Pa)	Velocidade de mínimo jorro (m/s)
200	6,0	490 ± 58	93 ± 18	11,83 ± 0,05
300	7,5	764 ± 96	127 ± 28	13,21 ± 0,02
400	8,5	745 ± 101	148 ± 6	14,83 ± 0,05

Fonte: Acervo pessoal.

É importante ressaltar que o aumento da velocidade do ar sem o auxílio de um controlador de rotação e rampa de aceleração pode interferir nos valores dos parâmetros fluidodinâmicas.

8. RESULTADOS: SIMULAÇÕES TFM

8.1. Teste de malhas

Na Tabela 17 são apresentados os resultados de queda de pressão no leito e tempo de simulação obtidos para cada malha monitorada, os resultados de GCI, convergência assintótica (A), resposta assintótica (f^{exact}), calculados a partir do método, e desvio de cada malha em relação à resposta assintótica. As pressões apresentadas correspondem aos valores médios da pressão ao longo da área de entrada do leito, dos 2 segundos finais da simulação.

Tabela 17. Resultados de queda de pressão e valores obtidos a partir do teste GCI para malhas TFM.

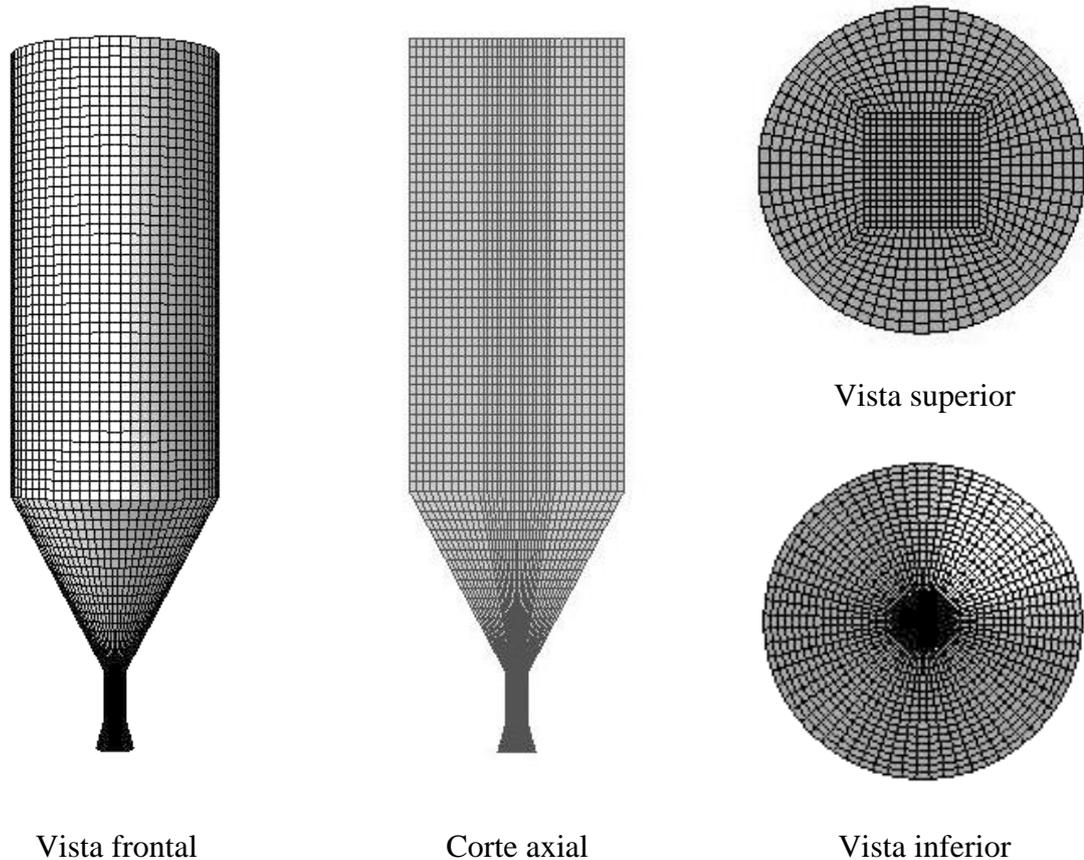
P (Pa)	Malha 1: -99,96
	Malha 2: -94,72
	Malha 3: -150,30
Tempo de simulação (h)	Malha 1: 41:30
	Malha 2: 32:20
	Malha 3: 16:52
GCI₁₂	0,01
GCI₂₃	0,05
GCI₃	0,08
A	1,36
f^{exact}	-100,36
Desvio 1 (%)	0,57
Desvio 2 (%)	5,78
Desvio 3 (%)	49,51

Fonte: Acervo pessoal.

Pode-se observar que a redução do número de células levou ao aumento do desvio em relação à solução assintótica do problema (f^{exact}), além do aumento do GCI. O valor da convergência assintótica (A) superior a 1, indica a extrapolação do intervalo assintótico. O método recomenda que a malha escolhida seja a que apresentou menor desvio e menor GCI. Nesse caso, a melhor escolha de malha seria TFM-1. Contudo, o elevado tempo de simulação

fez com que a malha TFM-2 fosse escolhida. Ela apresenta desvio inferior a 6%, GCI intermediário e tempo de simulação inferior ao da malha TFM-1. Tendo em vista que o tempo de simulação aumenta com o refinamento da malha, não foram testadas malhas mais refinadas que a malha 1. Na Figura 24 são apresentados detalhes da malha utilizada.

Figura 24. Malha utilizada nas simulações TFM-2.

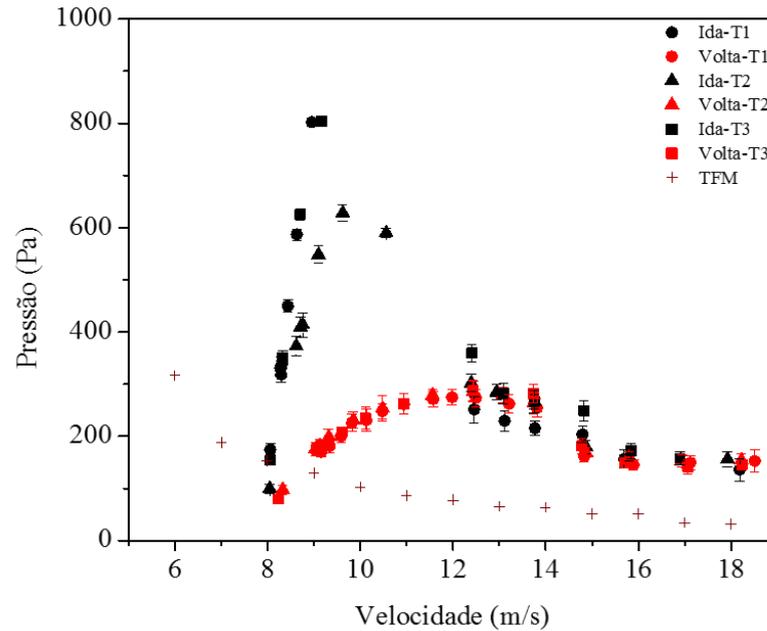


Fonte: Acervo pessoal.

8.2. Curvas fluidodinâmicas e contornos

Na Figura 25 são apresentadas as curvas fluidodinâmicas obtidas experimentalmente e por meio das simulações para a massa de 400g. A curva simulada subestima os valores experimentais e o seu comportamento segue uma tendência linear, com uma maior discrepância de pressão entre as velocidades de 7 e 6 m/s.

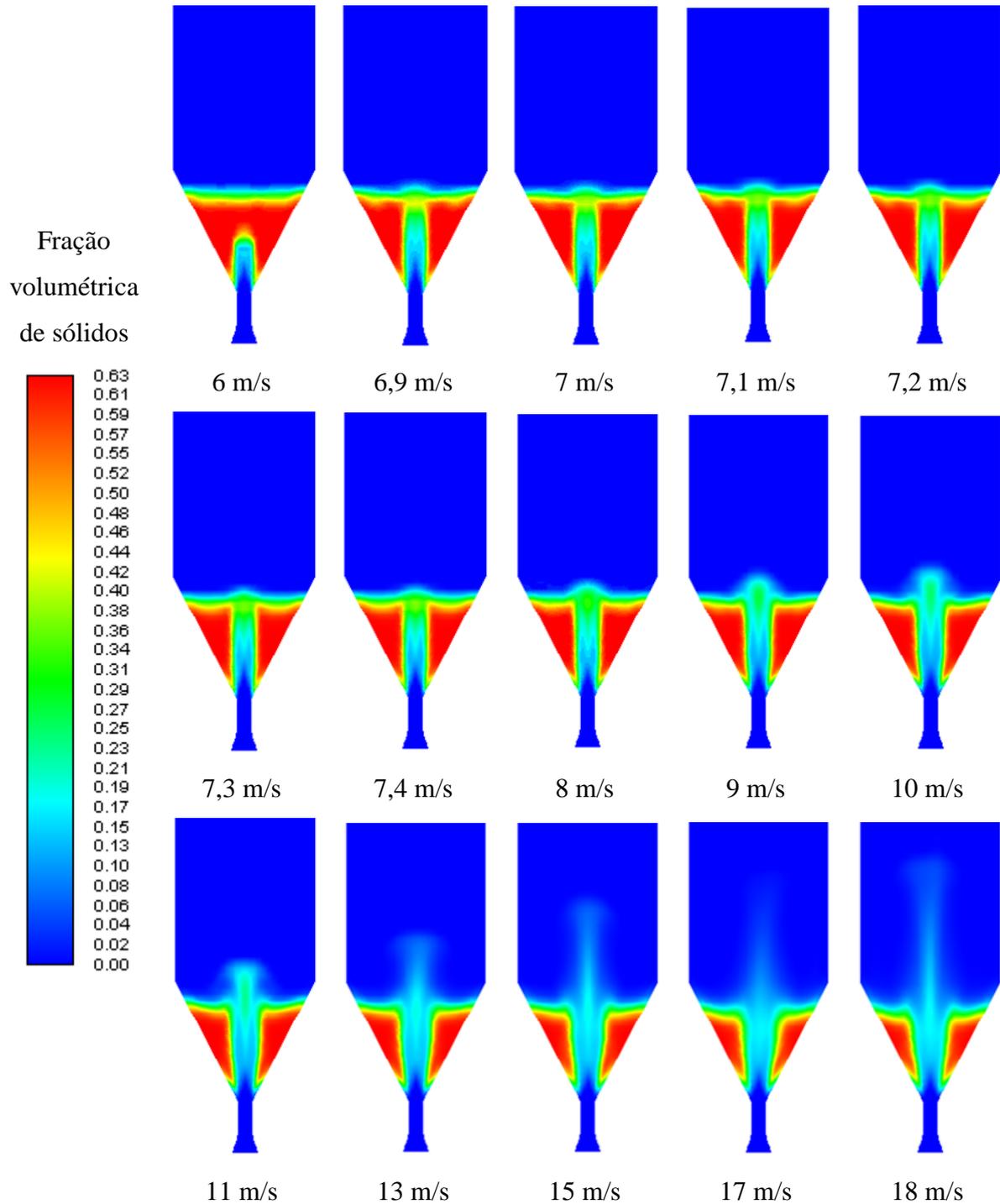
Figura 25. Curvas fluidodinâmicas experimentais e simulada por TFM para massa de 400 g.



Fonte: Acervo pessoal.

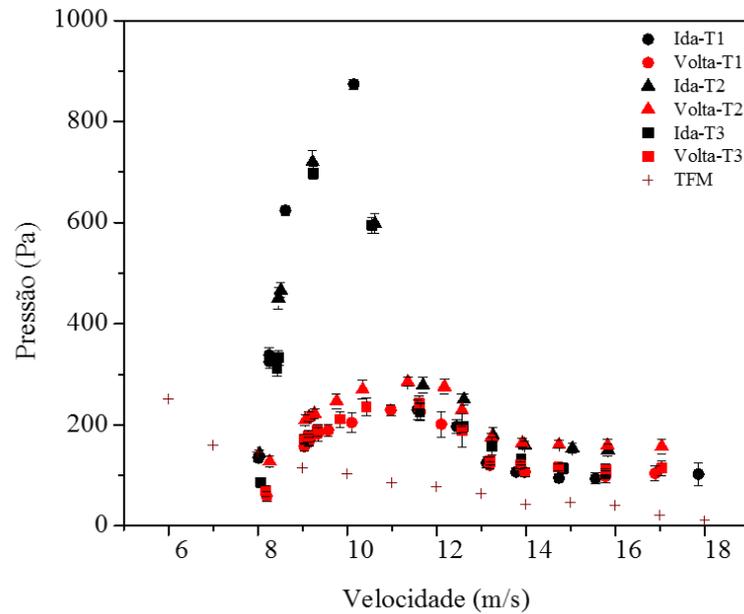
A identificação da velocidade de mínimo jorro simulada foi realizada a partir dos contornos de fração volumétrica de sólidos apresentados na Figura 26. À medida que a velocidade do ar aumenta, ocorre a expansão do canal de jorro até o rompimento da camada de sólidos e início do jorro. Assim, a velocidade de mínimo jorro estimada é de 7,1 m/s, apresentando um desvio de aproximadamente 52,12% do valor experimental (14,8 m/s). O aumento da velocidade do ar, após o estabelecimento do jorro, leva à redução da concentração de sólidos na região do canal do jorro e o aumento da altura da fonte.

Figura 26. Contornos de fração volumétrica de sólidos para massa de 400g por TFM.



A Figura 27 traz as curvas fluidodinâmicas experimentais e simulada por TFM para a massa de 300 g. Assim como na análise anterior, a curva obtida subestima os dados experimentais. As maiores diferenças de pressão são observadas entre as velocidades de 8 e 6 m/s, não sendo possível determinar a velocidade de mínimo jorro pelas curvas.

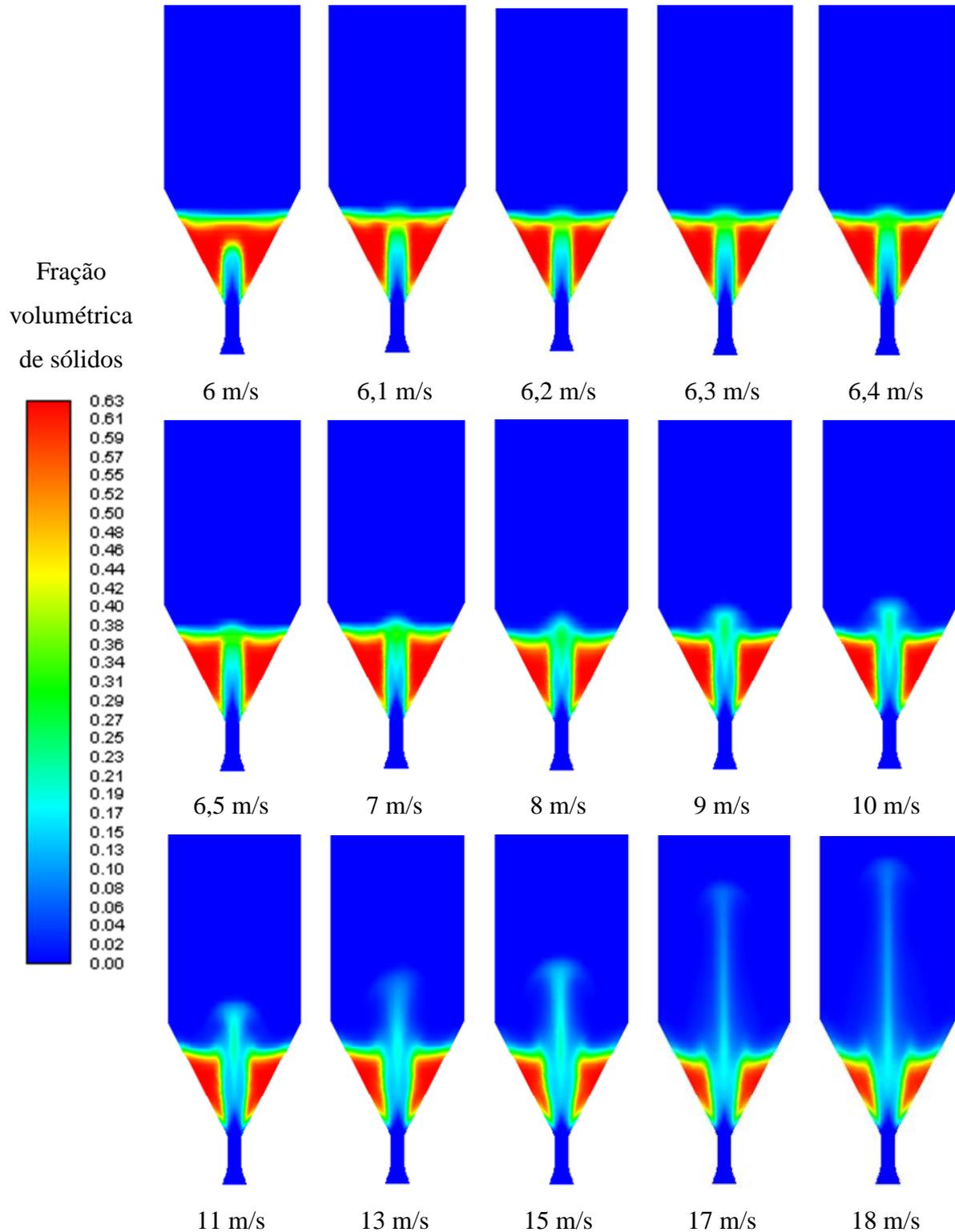
Figura 27. Curvas fluidodinâmicas experimentais e simulada por TFM para massa de 300g



Fonte: Acervo pessoal

Na Figura 28 são apresentados os contornos de fração volumétrica de sólidos para a massa de 300 g. O aumento da velocidade do gás leva à expansão dos sólidos, até o momento em que a superfície da camada de sólidos é rompida, estabelecendo-se a velocidade de mínimo jorro de 6,2 m/s. Essa velocidade apresenta um desvio de aproximadamente 53,1% do valor experimental (13,21 m/s). O crescente aumento da velocidade do gás leva ao aumento do diâmetro do canal de jorro e da altura da fonte.

Figura 28. Contornos de fração volumétrica de sólidos para massa de 300g por TFM.



O tempo de cada simulação foi de, em média, 24 h. As simulações envolvendo a massa de 200 g apresentaram problemas de convergência, e por isso não foram apresentadas.

9. RESULTADOS: SIMULAÇÕES CFD-DEM

9.1. Teste de malhas

Os resultados de queda de pressão e tempo de simulação obtidos durante o teste de independência de malhas, junto com os resultados de GCI, convergência assintótica (A), resposta assintótica (f^{exact}), obtidos a partir de cálculo e desvio em relação à resposta assintótica são apresentados na Tabela 18. As pressões apresentadas correspondem aos valores médios da pressão ao longo da área de entrada do leite, dos 2 segundos finais da simulação.

Tabela 18. Resultados de queda de pressão e valores obtidos a partir do teste GCI para malhas CFD-DEM.

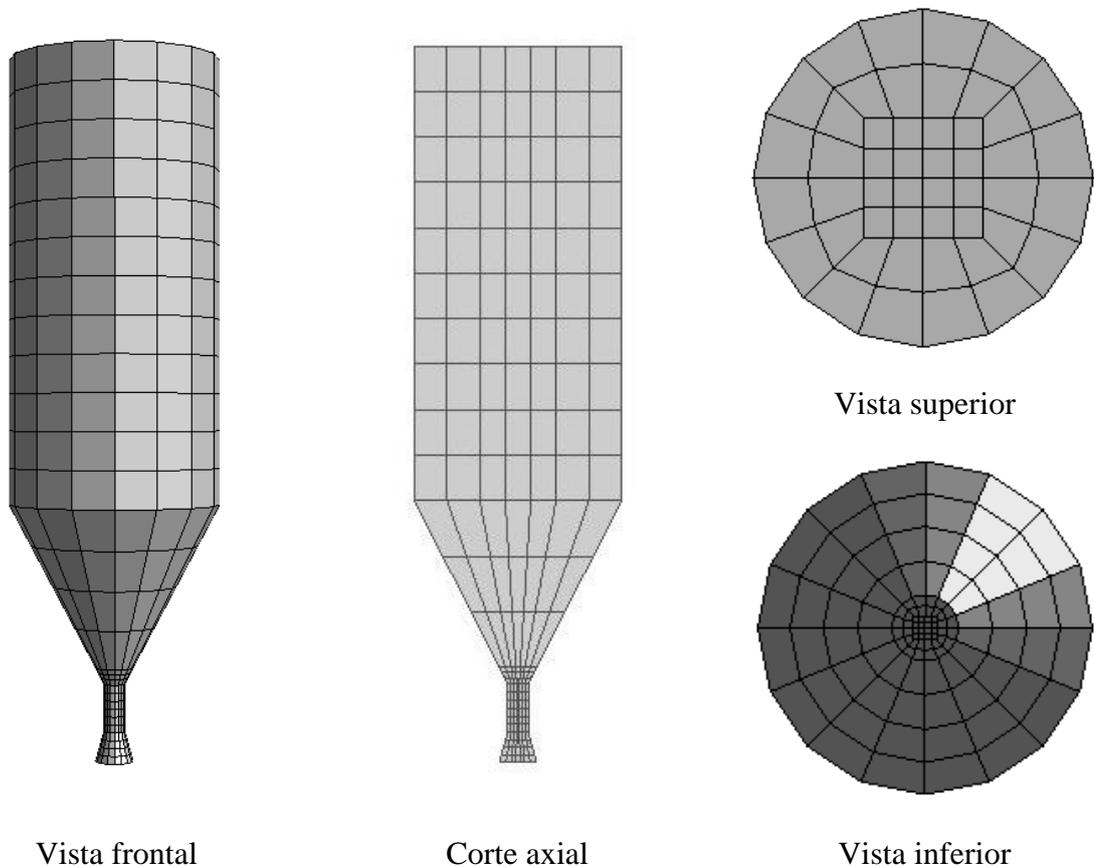
P (Pa)	Malha DEM-1: -65,22
	Malha DEM-2: -61,63
	Malha DEM-3: -47,33
Tempo de simulação (h)	Malha DEM-1: 8:03
	Malha DEM-2: 7:38
	Malha DEM3: 7:38
GCI₁₂	-0,01
GCI₂₃	-0,08
GCI₃	-0,10
A	0,94
f^{exact}	-65,73
Desvio 1 (%)	0,78
Desvio 2 (%)	6,24
Desvio 3 (%)	27,99

Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados mostram o aumento do GCI e do desvio em relação à solução assintótica do problema com a diminuição do número de células na malha. O valor da convergência assintótica próximo a 1 indica a proximidade entre a resposta assintótica (f^{exact}) e o valor assintótico. Conforme recomendado pelo método, a malha a ser escolhida é a que apresentou o menor desvio e menor GCI, correspondente à malha DEM-1. Contudo, houveram problemas

de convergência durante as simulações e passou-se então a utilizar a malha DEM-2, apresentada na Figura 29. Uma vez que o tempo de simulação foi próximo entre as três malhas, não foi considerado como fator decisivo na escolha.

Figura 29. Malha utilizada nas simulações CFD-DEM.



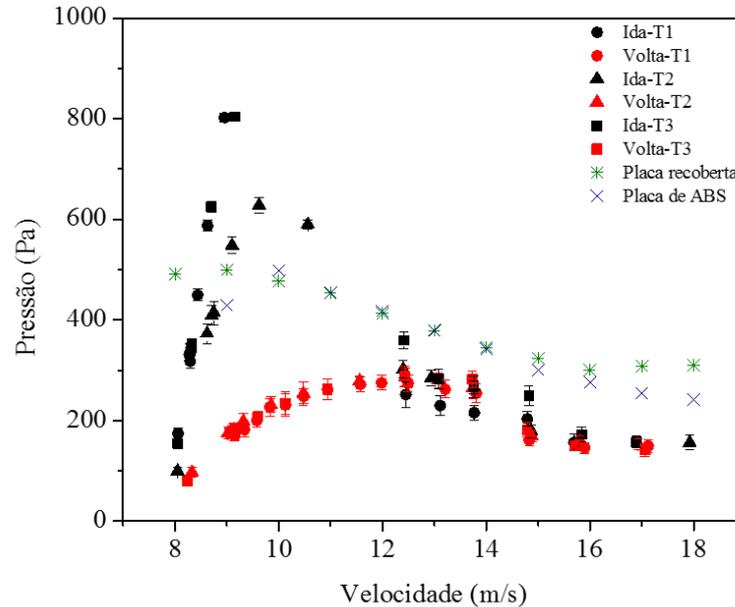
Fonte: Acervo pessoal.

9.2. Curvas fluidodinâmicas e contornos

9.2.1. Massa de sólidos: 400 g

Inicialmente, foram obtidas duas curvas fluidodinâmicas para a massa de 400g: uma utilizando os coeficientes das interações partícula-partícula obtidos a partir da placa recoberta por ABS e outra, com os coeficientes obtidos a partir da placa lisa de ABS. Na Figura 30 são apresentadas as curvas fluidodinâmicas obtidas por CFD-DEM com esses dois coeficientes e as curvas experimentais para comparação.

Figura 30. Curvas fluidodinâmicas com massa de 400g para comparação de coeficientes de interação.



Fonte: Acervo pessoal.

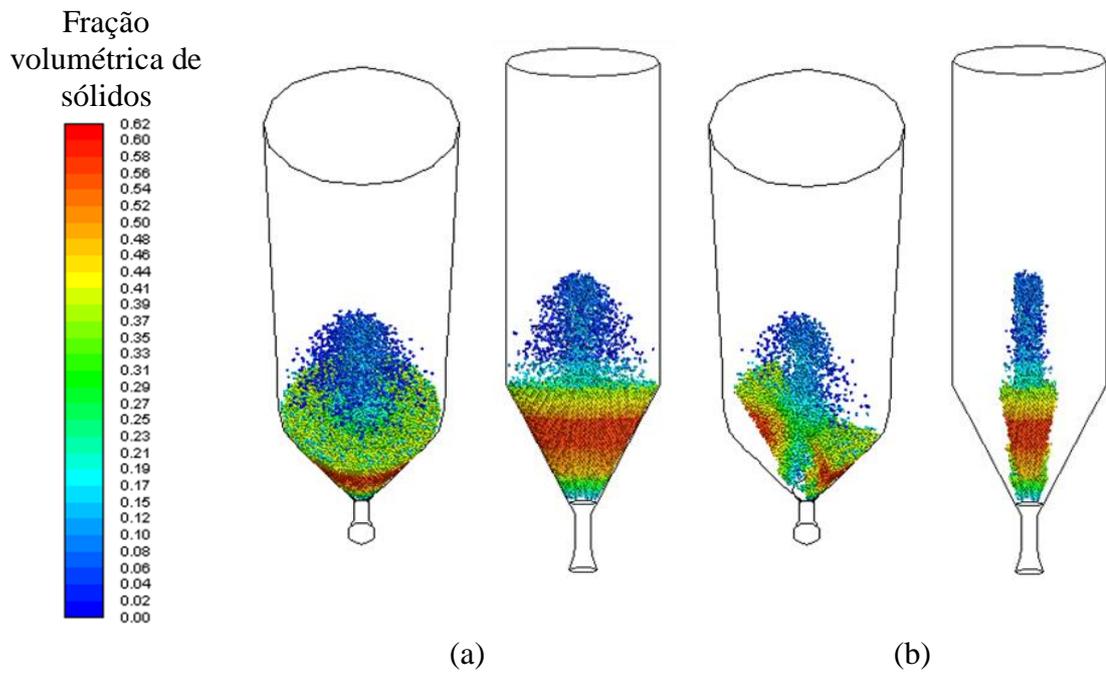
Observa-se boa concordância entre as curvas simuladas na região de velocidades intermediárias, e entre as curvas experimentais e simuladas. No entanto, os valores da curva obtida a partir da placa lisa de ABS encontra-se mais próxima aos dados experimentais nas regiões de alta e baixa velocidade. Diante disso, optou-se por utilizar os coeficientes obtidos a partir da placa lisa de ABS para as simulações com massas de 300 g e 200 g.

Observa-se na Figura 30 que a curva simulada superestima, de forma geral, o resultado experimental. Os valores de pressão máxima e pressão de jorro estável são 497,6 Pa e 241,0 Pa, respectivamente. Pelo gráfico não é possível determinar a velocidade de mínimo jorro, sendo necessário avaliar os contornos de fração volumétrica de sólidos.

Na

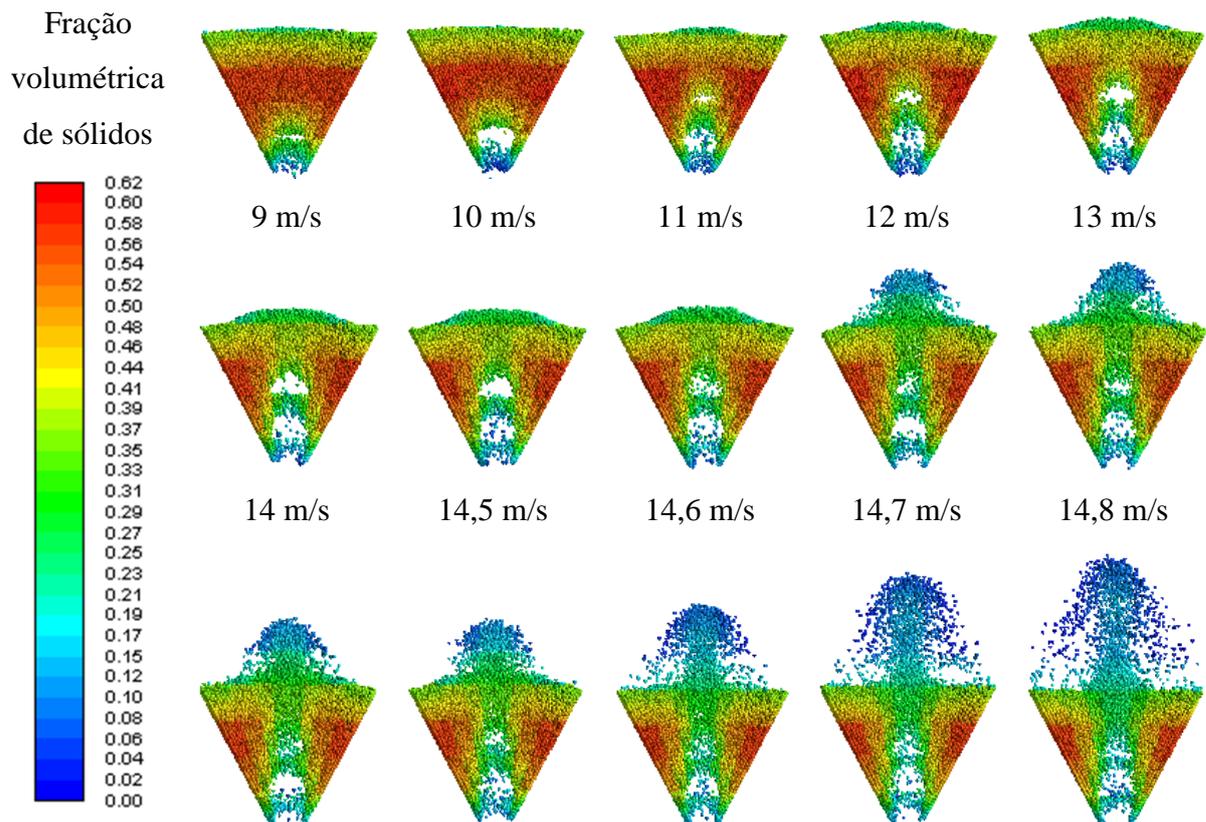
Figura 31 é apresentado um corte vertical do domínio, correspondente à uma seção de 0,025 m do leito. Na Figura 32 são apresentados os contornos de fração volumétrica de sólidos obtidos utilizando o corte vertical. Pelas imagens pode-se acompanhar a transição de leito fixo para regime de jorro estável com o aumento da velocidade do gás. Os contornos correspondem à média dos 2 segundos finais das simulações. Embora o distribuidor Venturi não seja apresentado nas imagens de contorno de fração volumétrica de sólidos, ele pertencia ao domínio utilizado e foi considerado nas simulações CFD-DEM.

Figura 31. Ilustração do corte realizado. (a) Imagem completa, (b) Corte.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 32. Fração volumétrica de sólidos para massa de 400g por CFD-DEM.



14,9 m/s 15 m/s 16 m/s 17 m/s 18 m/s

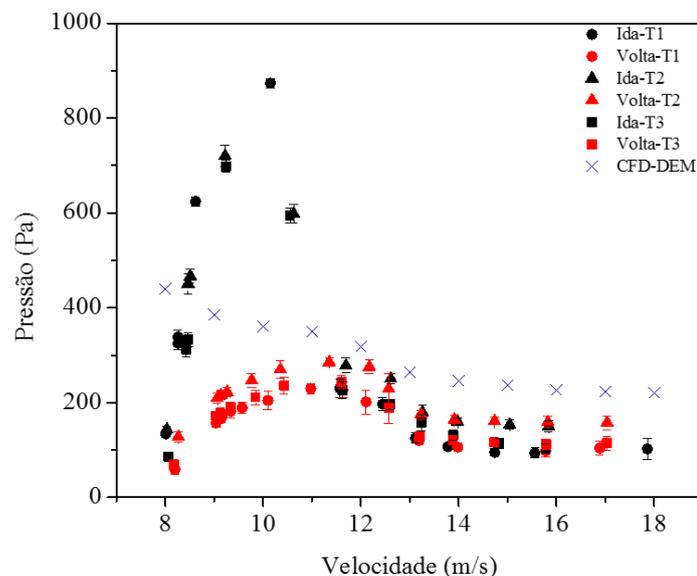
Fonte: Acervo pessoal.

Na velocidade de 9 m/s, observa-se a formação de uma pequena cavidade, indicando o arraste de partículas próximo à entrada do leito. Com o aumento da velocidade do ar, aumenta a região de arraste de partículas, até o rompimento da barreira de sólidos e formação do jorro, na velocidade de 14,7 m/s. Entre as velocidades de 15 e 18 m/s observar-se o aumento da altura da fonte com o aumento da velocidade sendo claramente observadas as regiões anular, canal de jorro e fonte nas velocidades superiores. Estabelece-se então a velocidade de mínimo 14,7 m/s, apresentando um desvio de aproximadamente 0,7 % do valor obtido experimentalmente (14,8 m/s).

9.2.2. Massa de sólidos: 300 g

Na Figura 33 são apresentadas as curvas fluidodinâmicas experimentais e simulada obtidas para a massa de 300g. Os dados simulados superestimam os dados experimentais para as menores e maiores velocidades de ar. Observa-se, neste caso, que a maior pressão corresponde à velocidade de 8 m/s, com valor de 12,3 m/s. A pressão de jorro estável é de 220,9 Pa e a pressão máxima atingida é de 385,0 Pa.

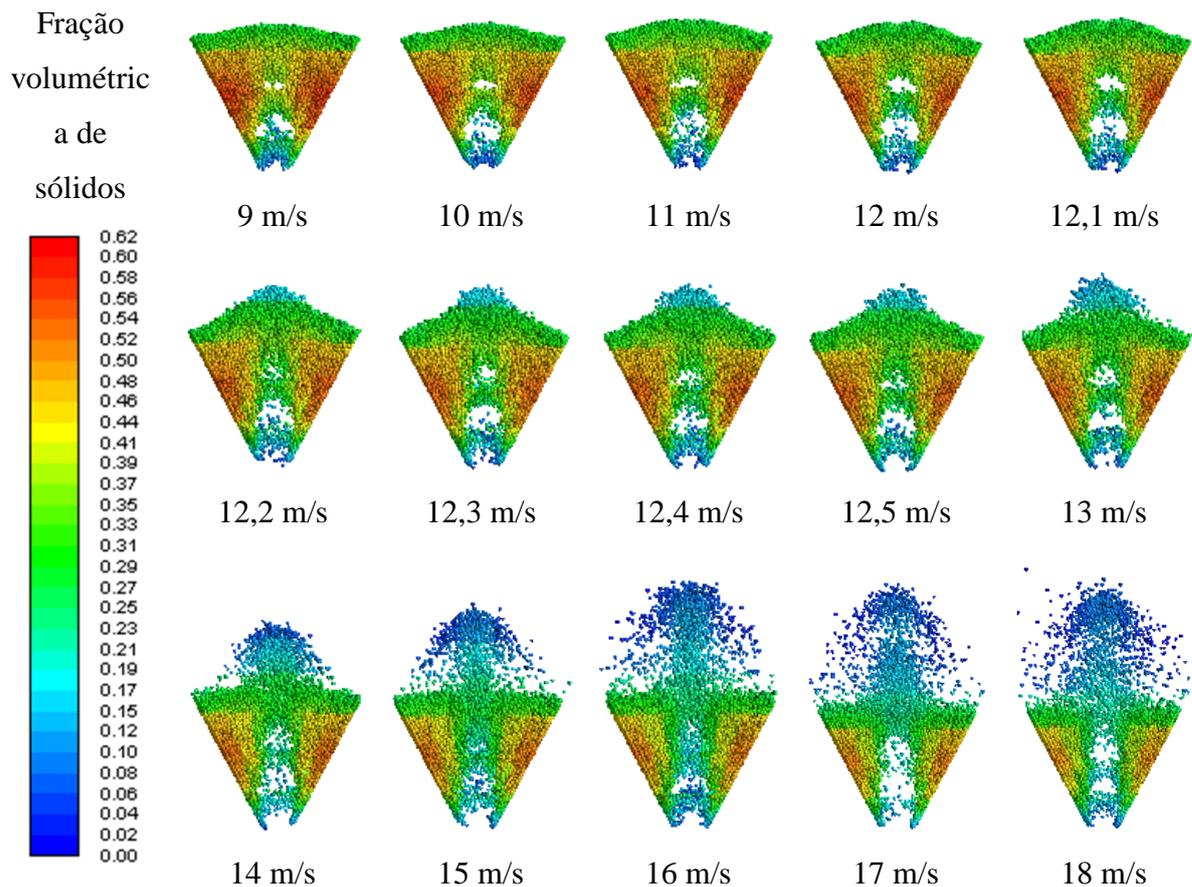
Figura 33. Curvas fluidodinâmicas experimentais e simulada por CFD-DEM para 300g.



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 34 são apresentados os contornos de fração volumétrica de sólidos correspondentes à uma média de 2 segundos de simulação. Observa-se o comportamento de transição de leito fixo para regime de jorro estável, com velocidade de mínimo jorro de 12,3 m/s. Assim, o desvio do resultado experimental (13,21 m/s) é de aproximadamente 6,9%. O aumento da velocidade após o estabelecimento do jorro leva ao aumento da altura de fonte e redução da concentração de sólidos na região anular.

Figura 34. Fração volumétrica de sólidos para massa de 300g por CFD-DEM



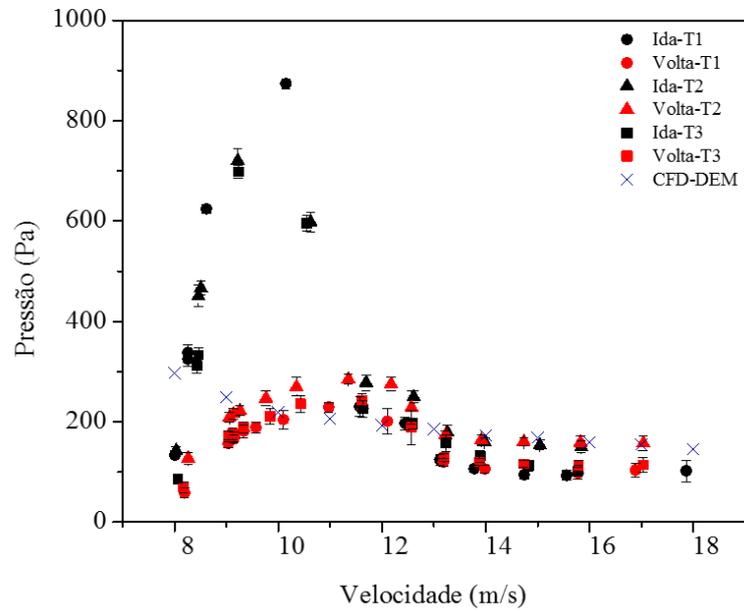
Fonte: Acervo pessoal.

9.2.3. Massa de sólidos: 200 g

Na Figura 35 são apresentadas as curvas fluidodinâmicas experimentais e simulada obtidas para a massa de 200g. A curva simulada sobrepõe-se sobre os dados experimentais, indicando a reprodução da fluidodinâmica. Assim como na Figura 33, ocorre o aumento da pressão para as velocidades inferiores à 11 m/s. A pressão no regime de jorro estável é de 142,5 kPa e a pressão máxima atingida é de 249,6 Pa.

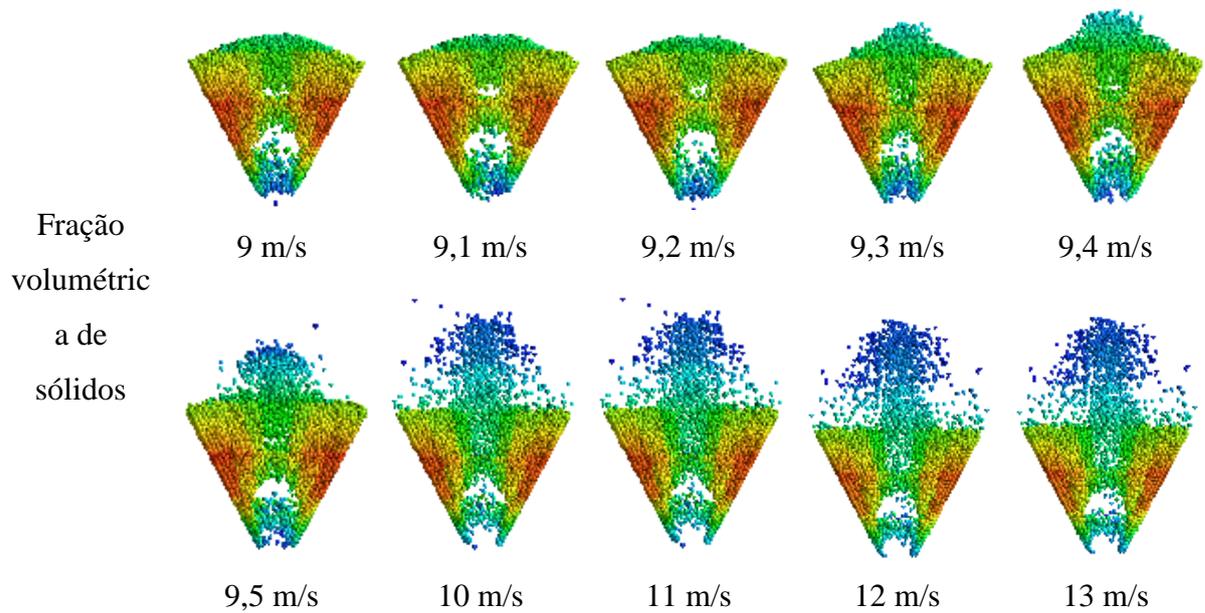
Na Figura 36 são apresentados os contornos de fração volumétrica de sólidos para massa de 200g.

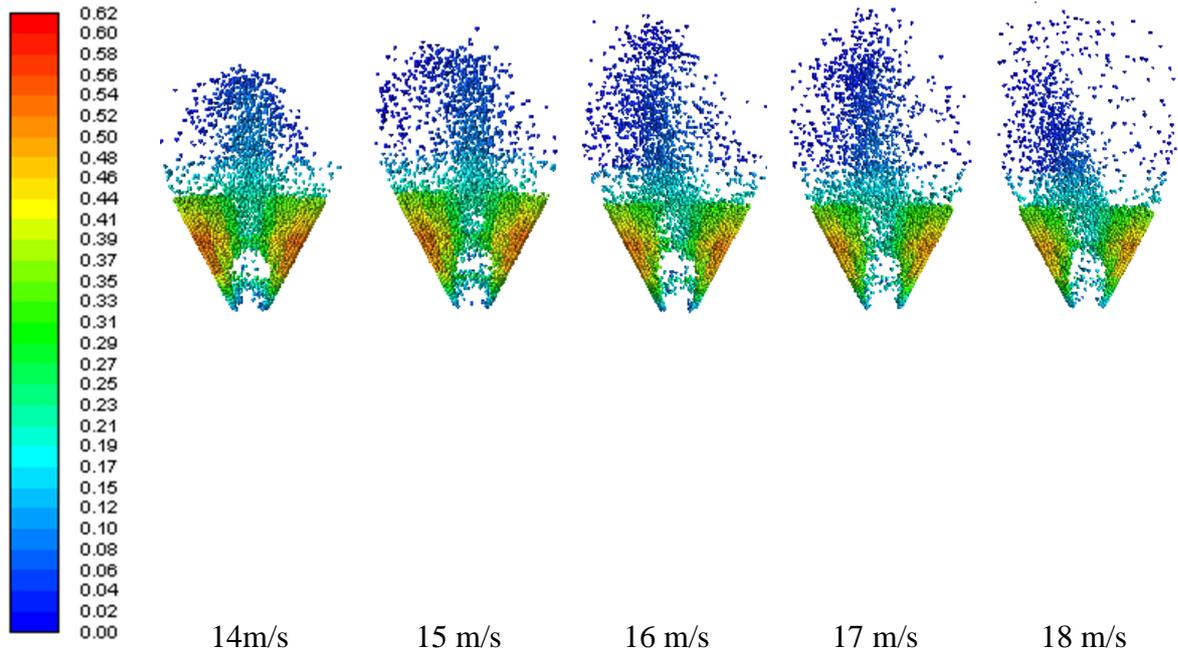
Figura 35. Curvas fluidodinâmicas experimentais e simulada por CFD-DEM para 200g.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 36. Fração volumétrica de sólidos para massa de 200g por CFD-DEM.





Fonte: Acervo pessoal.

De forma análoga às análises anteriores, observa-se a transição de leito fixo para regime de jorro estável, com velocidade de mínimo jorro de 9,4 m/s. Logo, o desvio do valor experimental (11,83 m/s) é de aproximadamente 20,5%. É possível observa a expansão da fonte com o aumento da velocidade até o a velocidade de 15 m/s, onde perde-se a característica de leito de jorro. Tal comportamento pode ser explicado pela baixa massa de sólidos associada à velocidade de ar elevada, que passa a arrastar todo o sólido, tornando-se um leito fluidizado.

Na Tabela 19 são apresentados os valores de velocidades de mínimo jorro experimental e simulada utilizando a abordagem CFD-DEM e os respectivos desvios relativos. Os resultados apresentados mostram o comportamento de redução de velocidade de mínimo jorro com a redução da massa de sólidos, conforme observado experimentalmente. Os desvios entre as velocidades de mínimo jorro experimental e simulada aumentaram com a redução da massa. Esse comportamento pode ser associado à instabilidade do leito diante da baixa carga de sólidos, que dificulta tanto a obtenção dos dados experimentais quanto a reprodução por simulação.

Tabela 19. Velocidades de mínimo jorro experimental e simulada por CFD-DEM.

Massa de sólidos (g)	Velocidades de mínimo jorro (m/s)		Desvio relativo (%)
	Experimental	CFD-DEM	
400	14,83	14,7	0,9

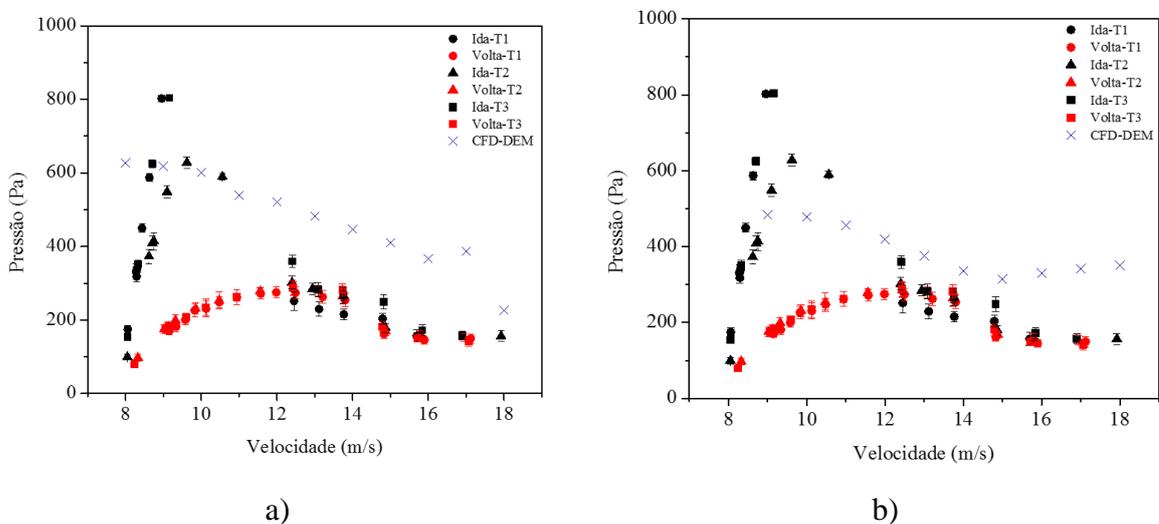
300	13,21	12,3	6,9
200	11,83	9,4	20,5

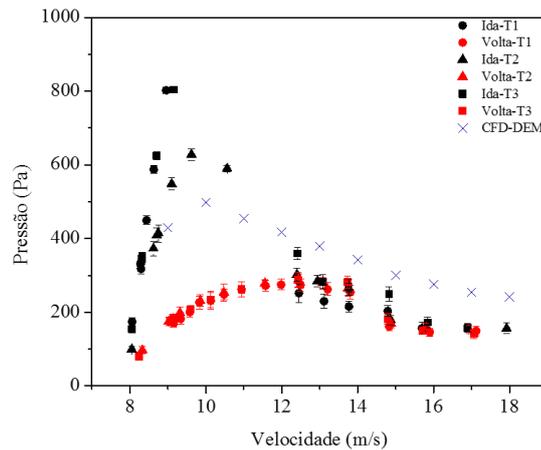
Embora haja discrepância entre as curvas simuladas e experimentais, considera-se que o conjunto de modelos e parâmetros utilizados foram capazes de reproduzir o comportamento do leito de jorro estudado. Como já foi apresentado, esses parâmetros de entrada são fundamentais para o sucesso das simulações, logo, a metodologia utilizada na obtenção dos mesmo levou à valores de parâmetros satisfatórios.

9.2.4. Análise de sensibilidade

A fim de verificar a interferência dos parâmetros de interação nos resultados, realizou-se o levantamento das curvas fluidodinâmicas utilizando os parâmetros apresentados por Xiao *et al.* (2017) e utilizando o modelo *friction-dshf* para força de contato tangencial, que desconsidera o atrito por rolamento. As simulações foram realizadas com a massa de sólidos de 400 g. Na Figura 37 (a) é apresentada a curva obtida a partir dos coeficientes da literatura, em (b) a curva obtida com o modelo *friction-dshf* e em (c) a curva obtido com os coeficientes medidos experimentalmente e já apresentados.

Figura 37. Curvas fluidodinâmicas para diferentes parâmetros de interação. a) Obtidos por Xiao *et al.* 2017, b) Modelo *friction-dshf*, c) Obtidos experimentalmente.





c)

Fonte: Acervo pessoal.

Observa-se na Figura 37 (a) que o comportamento da curva simulada não se assemelha ao da curva experimental e os valores apresentam grandes desvios. Assim, esses parâmetros não são adequados para representar os dados experimentais. Avaliando a Figura 37 (b), observa-se o aumento da pressão com a redução da velocidade do gás a partir da velocidade de 15 m/s, e a redução da pressão após essa velocidade. Maiores desvios com relação à curva experimental são observados nas extremidades da curva simulada. Portanto, dentre as curvas apresentadas, a que melhor representa os dados experimentais é a obtida utilizando os coeficientes medidos experimentalmente.

Na Tabela 20 são apresentadas as velocidades de mínimo jorro de cada situação apresentada na Figura 37 e a velocidade de mínimo jorro experimental. Observa-se que a velocidade de mínimo jorro da curva obtida com os coeficientes medidos diretamente foi a mais próxima da velocidade de mínimo jorro experimental. Logo, verifica-se a necessidade de incluir o atrito de rolamento nas simulações e a influência dos parâmetros no resultado final das simulações.

Tabela 20. Velocidades de mínimo jorro experimental e simuladas com diferentes coeficientes de interação para massa de 400 g.

Caso avaliado	Velocidade de mínimo jorro (m/s)
Experimental	14,83
Coeficientes de Xiao <i>et al.</i> (2017)	15,3
Coeficientes por medição direta	14,7

Modelo <i>friction-dshf</i>	14,4
-----------------------------	------

Fonte: Acervo pessoal.

9.3. Comparação entre modelos

Na Tabela 21 são apresentadas as velocidades de mínimo jorro experimental e obtidas a partir das duas simulações apresentadas neste trabalho com o intuito de compará-las. As velocidades obtidas a partir das simulações CFD-DEM medidos experimentalmente apresentam menores desvios quanto ao valor experimental, podendo ser consideradas mais adequadas para determinação desse parâmetro.

Tabela 21. Velocidades de mínimo jorro experimental e simuladas.

Massa (g)	u_{mj} - experimental (m/s)	CFD-DEM		TFM	
		u_{mj} (m/s)	Desvio relativo (%)	u_{mj} (m/s)	Desvio relativo (%)
300	13,21	12,3	6,9	6,2	53,1
400	14,83	14,7	0,9	7,5	49,4

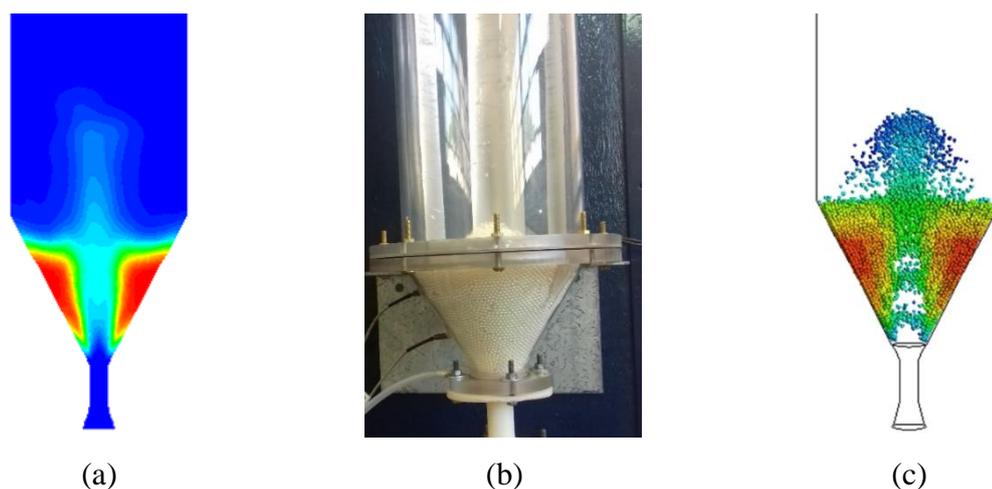
Fonte: Acervo pessoal.

Quanto aos tempos de simulação, conforme apresentado nos resultados dos testes de independência de malhas, as simulações TFM levam mais tempo para serem finalizadas. Uma das justificativas desse custo computacional é o elevado número de células da malha utilizada nas simulações TFM.

Na

Figura 38 são apresentados os contornos de fração volumétrica de sólidos para velocidade de 16 m/s e uma imagem do experimento com a velocidade de, aproximadamente, 15,7 m/s. A massa avaliada é de 400 g. Pode-se observar que em ambos os casos, a altura da fonte é superior à altura experimental. O canal de jorro formado nas duas simulações apresenta diâmetros semelhantes, com menor concentração de sólidos próximo à entrada, e as frações de sólidos na região anular são compatíveis.

Figura 38. Comparação dos contornos de fração volumétrica de sólidos dos modelos avaliados com o experimento: (a) TFM, (b) Experimento e (c) CFD-DEM.

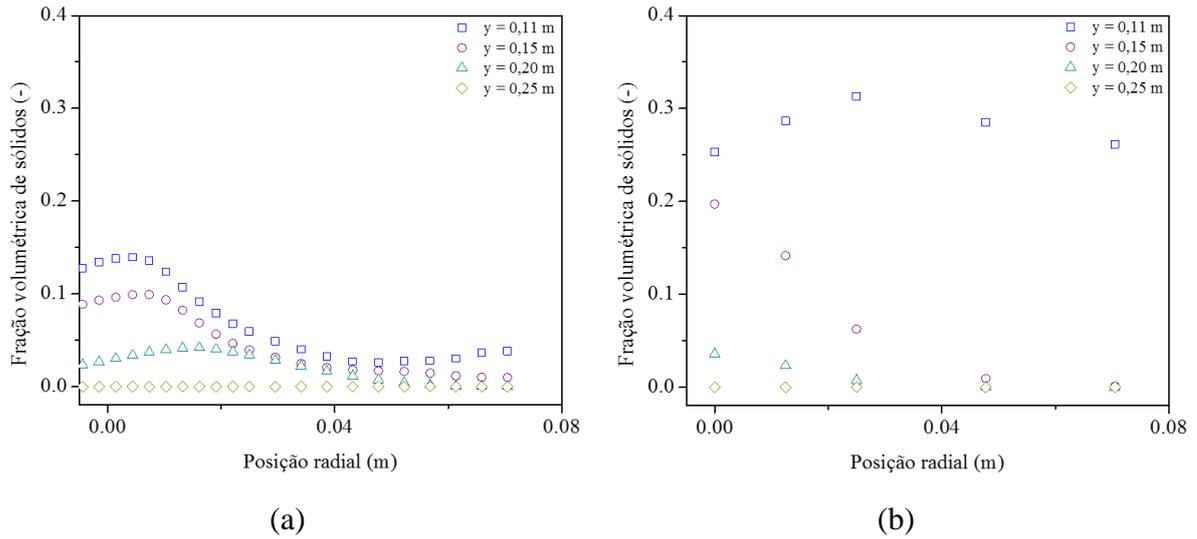


Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 39 traz o comportamento da fração volumétrica de sólidos ao longo da direção radial do leito de jorro, para massa de 400 g e velocidade de 16 m/s, para o TFM, em (a) e para o CFD-DEM, em (b). De modo geral observa-se maiores concentrações de sólidos para o CFD-DEM nas alturas avaliadas. A baixa concentração de sólidos na altura de 0,20 m, complementa a hipótese de que a altura da fonte, em ambos os casos, encontra-se próximo à essa altura, visto que para 0,25 m, a concentração torna-se nula.

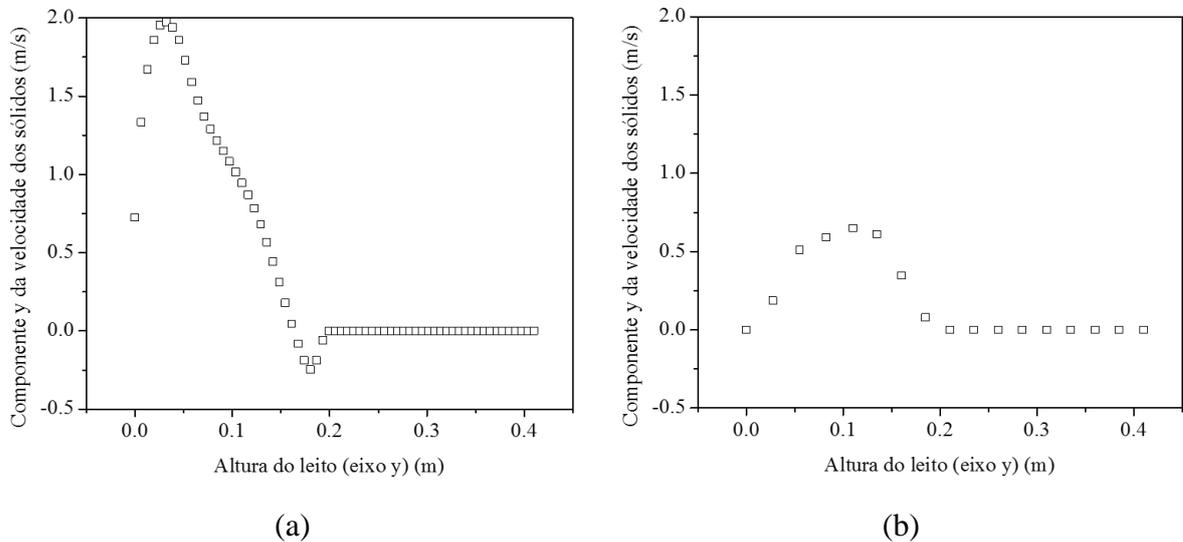
Na Figura 40 são apresentados os perfis longitudinais da componente axial da velocidade dos sólidos para a região central do leito de jorro da massa de 400 g e velocidade de 16 m/s, em (a) para o TFM e em (b) para o CFD-DEM. Observa-se o mesmo comportamento qualitativo entre as abordagens, mas resultados quantitativos diferentes, como apresentado por Moliner *et al.* (2018). As partículas são aceleradas próximo à região da entrada, atingem a velocidade máxima e desaceleram durante o canal de jorro e a fonte, comportamento condizente com o observado por Zhao *et al.* (2008).

Figura 39. Perfil radial da fração volumétrica de sólidos ao longo do eixo vertical superior ao leito de sólidos: a) TFM e b) CFD-DEM.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 40. Perfil longitudinal da componente vertical da velocidade das partículas no centro do equipamento.

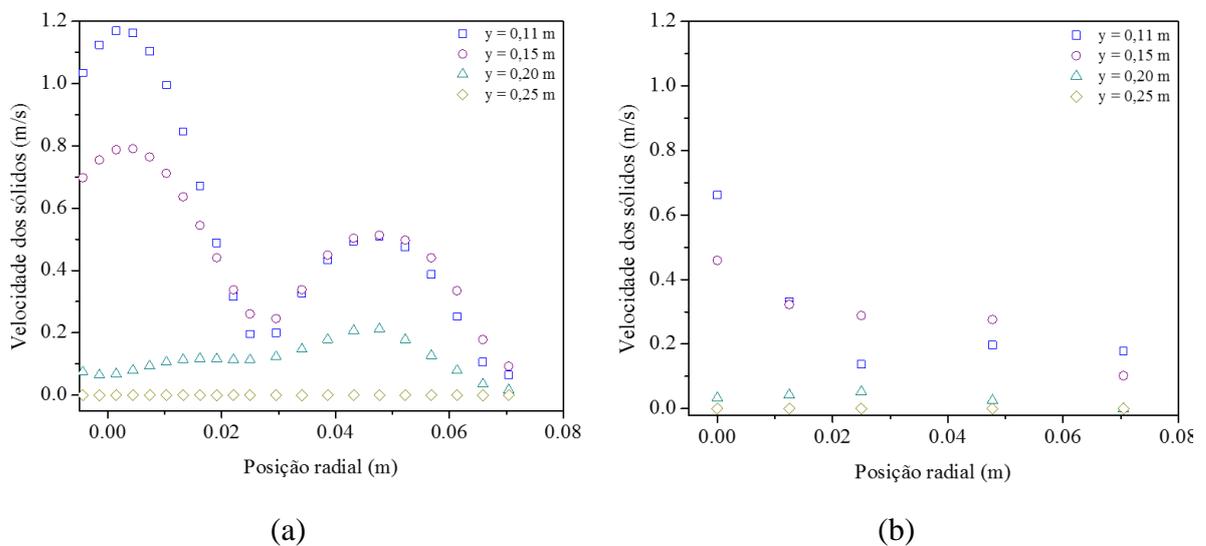


Fonte: Acervo pessoal.

Para o TFM, a velocidade da componente y máxima atingida é de aproximadamente 1,94 m/s na altura de 0,03 m, enquanto que para o CFD-DEM, essa velocidade é de 0,65 m/s na altura de 0,11 m. Portanto, as partículas atingem maiores velocidades nas simulações TFM. Observa-se que entre as alturas de 0,17 m e 0,19 m a velocidade é negativa para a simulação TFM, indicando a queda das partículas dentro da região de fonte. Para os dois casos, a velocidade é anulada na altura de 0,2 m, indicando que a altura da fonte de ambas as simulações se encontra nessa altura.

Na Figura 41 são apresentadas as velocidades dos sólidos em função do raio da região cilíndrica do leito de jorro, novamente para a massa de 400 g e velocidade de 16 m/s, para quatro alturas acima da região cônica, em (a) para o TFM e em (b) para CFD-DEM. Novamente observa-se comportamento qualitativo semelhante entre as abordagens, com velocidades máximas próximas ao centro e decaimento à medida que se avança sobre o raio, podendo ser atribuído à região de fonte, seguido de um novo aumento e redução de velocidade, próximo à parede, caracterizando a região anular. Observa-se, também, que as menores velocidades se encontram na posição mais alta e vice-versa.

Figura 41. Perfil radial da velocidade dos sólidos ao longo do eixo vertical superior ao leito de sólidos: a) TFM e b) CFD-DEM.



Fonte: Acervo pessoal.

A ausência de informações experimentais não permite afirmar a confiabilidade das abordagens. Contudo, considerando o tempo de simulação, o desvio da velocidade de mínimo jorro com relação ao experimental e as características visuais, pode-se assumir que a simulação utilizando abordagem CFD-DEM foi a que melhor representou o sistema experimental utilizado.

10. CONCLUSÕES

O leito de jorro construído apresenta parâmetros geométricos compatíveis com os encontrados na literatura e as curvas fluidodinâmicas obtidas experimentalmente apresentam comportamento característico de leito de jorro. Observou-se a influência do aumento da massa de sólidos nos parâmetros de pressão de jorro estável, velocidade de mínimo jorro e pressão máxima, conforme previsto pela literatura. As velocidades de mínimo jorro experimentais foram de 11,83 m/s, 13,21 m/s e 14,83 m/s para as massas de sólidos de 200 g, 300 g e 400 g, respectivamente. As metodologias empregadas na obtenção das propriedades físicas das esferas e dos parâmetros de interação resultaram em valores satisfatórios.

Os parâmetros de interação obtidos experimentalmente levaram à resultados mais próximos aos experimentais, quando comparados aos resultados obtidos a partir dos parâmetros encontrados na literatura. Além disso, observou-se a influência do coeficiente de atrito de rolamento nos resultados.

Dentre as abordagens utilizadas, as curvas obtidas a partir das simulações CFD-DEM apresentaram comportamento qualitativo mais próximo ao das curvas experimentais e os desvios das velocidades de mínimo jorro foram inferiores à 21%. Para a massa de sólidos de 200 g, os valores de queda de pressão encontram-se mais próximos aos valores experimentais, contudo, a velocidade de mínimo jorro apresenta o maior desvio. Comportamento oposto é observado para a massa de 400 g.

As curvas fluidodinâmicas obtidas a partir das simulações TFM apresentam comportamento diferente das curvas experimentais e as velocidades de mínimo jorro apresentam desvios superiores à 50% do experimental. De forma geral, os dados foram subestimados pelas simulações.

Assim, a abordagem CFD-DEM se mostrou mais adequada para representação do sistema estudado, uma vez que os resultados apresentaram menores desvios frente aos experimentais.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento fluidodinâmico utilizando a malha DEM nas simulações TFM;
- Estudar o efeito dos modelos de turbulência no resultado das simulações;
- Avaliar o comportamento das simulações com partículas com diâmetros diferentes;
- Investigar o aumento dos desvios relativos frente à redução de massa;
- Verificar a sensibilidade do modelo frente às alterações nos parâmetros de interação;
- Utilizar malha não-estrutura com células de mesmo tamanho na região cônica e região cilíndrica.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas. 1994. “Medição de Vazão de Fluidos Por Meio de Instrumentos de Pressão - Parte 1: Placas de Orifícios, Bocais e Tubos de Venturi Instalados Em Seção Transversão Circular de Conduitos Forçados.” *Seta*.
- Adegoroye, A., N. Paterson, X. Li, T. Morgan, A. A. Herod, D. R. Dugwell, and R. Kandiyoti. 2004. “The Characterisation of Tars Produced during the Gasification of Sewage Sludge in a Spouted Bed Reactor.” *Fuel* 83 (14-15 SPEC. ISS.): 1949–60. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.04.006>.
- Ai, Jun, Jian Fei Chen, J. Michael Rotter, and Jin Y. Ooi. 2011. “Assessment of Rolling Resistance Models in Discrete Element Simulations.” *Powder Technology* 206 (3): 269–82. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.030>.
- Albina, D. O. 2006. “Emissions from Multiple-Spouted and Spout-Fluid Fluidized Beds Using Rice Husks as Fuel.” *Renewable Energy* 31 (13): 2152–63. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.02.013>.
- Almeida, N. P., and Kássia Graciele dos Santos. 2015. “Dinâmica Das Partículas De Soja Em Tambor Rotativo De Bancada Empregando O Método De Elementos Discretos.” *XXXVII ENEMP - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, 2015. <https://doi.org/10.5151/enemp2015-ms-404>.
- Almohammed, Naser, Falah Alobaid, Michael Breuer, and Bernd Epple. 2014. “A Comparative Study on the Influence of the Gas Flow Rate on the Hydrodynamics of a Gas-Solid Spouted Fluidized Bed Using Euler-Euler and Euler-Lagrange/DEM Models.” *Powder Technology* 264: 343–64. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.024>.
- Alobaid, Falah. 2015. “A Particle-Grid Method for Euler-Lagrange Approach.” *Powder Technology* 286: 342–60. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.019>.
- Alvarez, J., G. Lopez, M. Amutio, M. Artetxe, I. Barbarias, A. Arregi, J. Bilbao, and M. Olazar. 2016. “Characterization of the Bio-Oil Obtained by Fast Pyrolysis of Sewage Sludge in a Conical Spouted Bed Reactor.” *Fuel Processing Technology* 149: 169–75. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.04.015>.
- Amutio, M., G. Lopez, M. Artetxe, G. Elordi, M. Olazar, and J. Bilbao. 2012. “Influence of Temperature on Biomass Pyrolysis in a Conical Spouted Bed Reactor.” *Resources, Conservation and Recycling* 59: 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.04.002>.
- ANSYS. 2018. “Fluent Theory Guide.” 2018. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v191/flu_th

/x1-62700016.7.6.html.

- Arregi, Aitor, Maider Amutio, Gartzzen Lopez, Maite Artetxe, Jon Alvarez, Javier Bilbao, and Martin Olazar. 2017. "Hydrogen-Rich Gas Production by Continuous Pyrolysis and in-Line Catalytic Reforming of Pine Wood Waste and HDPE Mixtures." *Energy Conversion and Management* 136: 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.008>.
- Aryaei, A., K. Hashemnia, and K. Jafarpur. 2010. "Experimental and Numerical Study of Ball Size Effect on Restitution Coefficient in Low Velocity Impacts." *International Journal of Impact Engineering* 37 (10): 1037–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.04.005>.
- Asaf, Z., D. Rubinstein, and I. Shmulevich. 2007. "Determination of Discrete Element Model Parameters Required for Soil Tillage." *Soil and Tillage Research* 92 (1–2): 227–42. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.006>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. 1994. "Medição de Vazão de Fluidos Por Meio de Instrumentos de Pressão - Parte 1: Placas de Orifícios, Bocais e Tubos de Venturi Instalados Em Seção Transversão Circular de Conduitos Forçados." *Seta*.
- ASTM International. 2004. "Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients." *Test* 31 (7): 490–501. <https://doi.org/10.1520/G0115-10.2>.
- Bacelos, Marcelo Silveira. 2006. "Análise Do Comportamento Da Fluidodinâmica Do Leito de Jorro Com Misturas de Tamanhos DePartículas." Universidade Federal de São Carlos.
- Batista, Júnia Natália Mendes, Ronaldo Correia De Brito, and Rodrigo Béttega. 2018. "Influence of Inlet Air Distributor Geometry on the Fluid Dynamics of Conical Spouted Beds: A CFD Study." *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly* 24 (4): 369–78. <https://doi.org/10.2298/CICEQ171011009B>.
- Beetstra, R., M. A. van der Hoef, and J A M Kuipers. 2007. "Drag Force of Intermediate Reynolds Number Flow Past Mono- and Bidisperse Arrays of Spheres." *AIChE Journal* 53 (2): 489–501. <https://doi.org/10.1002/aic.11065>.
- Béttega, Rodrigo. 2009. "Contribuições Ao Estudo Da Fluidodinâmica Em Leitos de Jorro Utilizando-Se CFD." Universidade Federal de São Carlos.
- Béttega, Rodrigo, Ronaldo Guimarães Corrêa, and José Teixeira Freire. 2010. "Three-Dimensional Numerical Simulation of Semi-Cylindrical and Cylindrical Spouted Bed Hydrodynamics." *Drying Technology* 28 (11): 1266–76. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.493624>.
- Borini, G. B., T. C. Andrade, and Luis A.P. Freitas. 2009. "Hot Melt Granulation of Coarse Pharmaceutical Powders in a Spouted Bed." *Powder Technology* 189 (3): 520–27. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.08.004>.

- Bove, Dario, Cristina Moliner, Massimo Curti, Marco Baratieri, Barbara Bosio, Giorgio Rovero, and Elisabetta Arato. 2019. "Preliminary Tests for the Thermo-Chemical Conversion of Biomass in a Spouted Bed Pilot Plant." *Canadian Journal of Chemical Engineering* 97 (1): 59–66. <https://doi.org/10.1002/cjce.23223>.
- Breuninger, Paul, Dominik Weis, Isabell Behrendt, Philipp Grohn, Fabian Krull, and Sergiy Antonyuk. 2018. "CFD–DEM Simulation of Fine Particles in a Spouted Bed Apparatus with a Wurster Tube." *Particuology*. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.03.015>.
- Brito, Ronaldo Correia de, Thiago Faggion de Pádua, José Teixeira Freire, and Rodrigo Béttega. 2017. "Effect of Mechanical Energy on the Energy Efficiency of Spouted Beds Applied on Drying of Sorghum [Sorghum Bicolor (L) Moench]." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 117 (March): 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.03.021>.
- Chen, H., Y. L. Liu, X. Q. Zhao, Y. G. Xiao, and Y. Liu. 2015. "Numerical Investigation on Angle of Repose and Force Network from Granular Pile in Variable Gravitational Environments." *Powder Technology* 283: 607–17. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.017>.
- Coetzee, C. J. 2017. "Review: Calibration of the Discrete Element Method." *Powder Technology* 310: 104–42. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.015>.
- Combarros, M., H. J. Feise, H. Zetzener, and A. Kwade. 2014. "Segregation of Particulate Solids: Experiments and DEM Simulations." *Particuology* 12 (1): 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.04.005>.
- Crüger, B., V. Salikov, S. Heinrich, S. Antonyuk, V. S. Sutkar, N. G. Deen, and J. A.M. Kuipers. 2016. "Coefficient of Restitution for Particles Impacting on Wet Surfaces: An Improved Experimental Approach." *Particuology* 25: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2015.04.002>.
- Cundall, P. A., and O. D. L. Strack. 1979. "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies." *Géotechnique* 29: 47–65.
- Du, Wei, Xiaojun Bao, Jian Xu, and Weisheng Wei. 2006. "Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of Spouted Bed: Influence of Frictional Stress, Maximum Packing Limit and Coefficient of Restitution of Particles." *Chemical Engineering Science* 61 (14): 4558–70. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.02.028>.
- Ebrahimi, Mohammadreza, Eva Siegmann, Doris Prieling, Benjamin J. Glasser, and Johannes G. Khinast. 2017. "An Investigation of the Hydrodynamic Similarity of Single-Spout Fluidized Beds Using CFD-DEM Simulations." *Advanced Powder Technology* 28 (10):

- 2465–81. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.05.009>.
- Elsayed, Khairy, and Chris Lacor. 2011. “Numerical Modeling of the Flow Field and Performance in Cyclones of Different Cone-Tip Diameters.” *Computers and Fluids* 51 (1): 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.07.010>.
- Epstein, Normam, and John R. Grace. 2011. *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*. New York-USA: Cambridge University Press.
- Ergun, S. 1952. “Fluid Flow Throught Packed Columns.” *Chemical Engineering Progress* 48: 89–94.
- Erkiaga, Aitziber, Gartzen Lopez, Mainer Amutio, Javier Bilbao, and Martin Olazar. 2013. “Steam Gasification of Biomass in a Conical Spouted Bed Reactor with Olivine and γ -Alumina as Primary Catalysts.” *Fuel Processing Technology* 116: 292–99. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.07.008>.
- Fortuna, Armando de Oliveira. 2000. *Técnicas Computacionais Para Dinâmica Dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações*. São Paulo-SP: EdUSP.
- Freire, José Teixeira, and Dermeval José Mazzini Sartori. 1992. *Tópicos Especiais Em Secagem*. São Carlos -SP: UFSCar.
- G194-08, ASTM Standard. 2013. “Standard Test Method for Measuring Rolling Friction Characteristics of a Spherical Shape on a Flat Horizontal Plane” i (Reapproved 2013): 1–9. <https://doi.org/10.1520/G0194-13.Copyright>.
- Gidaspow, D., R. Bezburuah, and J. Ding. 1992. “Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach, Fluidization VII.” In , 75–82. Proceedings of the 7th Engineering Foudation Conference on Fluidization.
- Gidaspow, Dimitri, Rukmini Bezburuah, and J. Ding. 1992. “Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds: Kinetic Theory Approach.” In *7 Th Fluidization Conference*. [papers3://publication/uuid/2F13F4C4-AC14-4BBE-9026-AAC43ED516DF](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.1992.07.008).
- Golshan, Shahab, Behrad Esgandari, and Reza Zarghami. 2017. “CFD-DEM and TFM Simulations of Spouted Bed.” *Chemical Engineering Transactions* 57: 1249–54. <https://doi.org/10.3303/CET1757209>.
- Golshan, Shahab, Onur Yaman, Murat Koksai, Gorkem Kulah, Reza Zarghami, and Navid Mostoufi. 2018. “A New Correlation for Minimum Spouting Velocity for Conical Spouted Beds Operating with High Density Particles.” *Experimental Thermal and Fluid Science* 96 (October 2017): 358–70. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.03.027>.
- Golshan, Shahab, Reza Zarghami, and Navid Mostoufi. 2017. “Hydrodynamics of Slot-Rectangular Spouted Beds: Process Intensification.” *Chemical Engineering Research and*

- Design* 121: 315–28. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.03.022>.
- González-Montellano, C., J. M. Fuentes, E. Ayuga-Téllez, and F. Ayuga. 2012. “Determination of the Mechanical Properties of Maize Grains and Olives Required for Use in DEM Simulations.” *Journal of Food Engineering* 111 (4): 553–62. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.017>.
- Hastie, D. B. 2013. “Experimental Measurement of the Coefficient of Restitution of Irregular Shaped Particles Impacting on Horizontal Surfaces.” *Chemical Engineering Science* 101: 828–36. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.07.010>.
- Hoomans, B. P.B., J. A.M. Kuipers, W. J. Briels, and W. P.M. Van Swaaij. 1996. “Discrete Particle Simulation of Bubble and Slug Formation in a Two-Dimensional Gas-Fluidised Bed: A Hard-Sphere Approach.” *Chemical Engineering Science* 51 (1): 99–118. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(95\)00271-5](https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00271-5).
- Horabik, Józef, Michał Beczek, Rafał Mazur, Piotr Parafiniuk, Magdalena Ryzak, and Marek Molenda. 2017. “Determination of the Restitution Coefficient of Seeds and Coefficients of Visco-Elastic Hertz Contact Models for DEM Simulations.” *Biosystems Engineering* 161: 106–19. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.009>.
- Hosseini, Seyyed Hossein, Goodarz Ahmadi, and Martin Olazar. 2013. “CFD Simulation of Cylindrical Spouted Beds by the Kinetic Theory of Granular Flow.” *Powder Technology* 246: 303–16. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.05.016>.
- . 2014. “CFD Study of Particle Velocity Profiles inside a Draft Tube in a Cylindrical Spouted Bed with Conical Base.” *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 45 (5): 2140–49. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.05.027>.
- Hu, Chenshu, Kun Luo, Shuai Wang, Lin Junjie, and Jianren Fan. 2019. “The Effects of Collisional Parameters on the Hydrodynamics and Heat Transfer in Spouted Bed: A CFD-DEM Study.” *Powder Technology* 353: 132–44. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.020>.
- Kafui, K. D., C. Thornton, and M. J. Adams. 2002. “Discrete Particle-Continuum Fluid Modelling of Gas-Solid Fluidised Beds.” *Chemical Engineering Science* 57 (13): 2395–2410. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00140-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00140-9).
- Ketterhagen, William R., Rahul Bharadwaj, and Bruno C. Hancock. 2010. “The Coefficient of Rolling Resistance (CoRR) of Some Pharmaceutical Tablets.” *International Journal of Pharmaceutics* 392 (1–2): 107–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.03.039>.
- Kieckhefen, Paul, Swantje Pietsch, Moritz Höfert, Michael Schönherr, Stefan Heinrich, and Frank Kleine Jäger. 2018. “Influence of Gas Inflow Modelling on CFD-DEM Simulations

- of Three-Dimensional Prismatic Spouted Beds.” *Powder Technology* 329: 167–80. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.048>.
- Lauder, B. E., and D. B. Spalding. 1974. “The Numerical Computation of Turbulent Flows.” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3 (2): 269–89. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2).
- Lee, Jian Le, and Eldin Wee Chuan Lim. 2017. “Comparisons of Eulerian-Eulerian and CFD-DEM Simulations of Mixing Behaviors in Bubbling Fluidized Beds.” *Powder Technology*, 2017.
- Li, Qiang, Mingxia Feng, and Zongshu Zou. 2013. “Validation and Calibration Approach for Discrete Element Simulation of Burden Charging in Pre-Reduction Shaft Furnace of COREX Process.” *ISIJ International* 53 (8): 1365–71. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.1365>.
- Li, Yanjie, Yong Xu, and Colin Thornton. 2005. “A Comparison of Discrete Element Simulations and Experiments for ‘sandpiles’ Composed of Spherical Particles.” *Powder Technology* 160 (3): 219–28. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.09.002>.
- Lima, Rondinelli Moulin. 2017. “Estudo Da Dinâmica de Partículas Em Tambores Rotatórios Empregando a Abordagem Numérica Lagrangeana.” Universidade Federal de Uberlândia.
- Liu, Malin, Yuanyun Wen, Rongzheng Liu, Bing Liu, and Youlin Shao. 2015. “Investigation of Fluidization Behavior of High Density Particle in Spouted Bed Using CFD-DEM Coupling Method.” *Powder Technology* 280: 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.042>.
- Liu, Xuejiao, Wenqi Zhong, Yingjuan Shao, Bing Ren, and Baosheng Jin. 2014. “Evaluation on the Effect of Conical Geometry on Flow Behaviours in Spouted Beds.” *Canadian Journal of Chemical Engineering* 92 (4): 768–74. <https://doi.org/10.1002/cjce.21869>.
- Locurto, G J, X Zhang, V Zakirov, R A Bucklin, D M Hanes, and O R Walton. 1997. “S I : E d S” 40 (352): 789–94.
- Lun, C. K.K., S. B. Savage, D. J. Jeffrey, and N. Chepurniy. 1984. “Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flowfield.” *Journal of Fluid Mechanics* 140: 223–56. <https://doi.org/10.1017/S0022112084000586>.
- Mahmoodi, B., S. H. Hosseini, and G. Ahmadi. 2018. “CFD–DEM Simulation of a Pseudo-Two-Dimensional Spouted Bed Comprising Coarse Particles.” *Particuology*. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2017.12.014>.
- Mahmoodi, Bayazid, Seyyed Hossein Hosseini, Martin Olazar, and Haritz Altzibar. 2017.

- “CFD-DEM Simulation of a Conical Spouted Bed with Open-Sided Draft Tube Containing Fine Particles.” *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 81: 275–87. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.09.051>.
- Maliska, Clovis R. 2004. *Transferência de Calor e Mecânica Dos Fluidos Computacional*. Rio de Janeiro-RJ: Editora LTC.
- Marchelli, Filippo, Dario Bove, Cristina Moliner, Barbara Bosio, and Elisabetta Arato. 2017. “Discrete Element Method for the Prediction of the Onset Velocity in a Spouted Bed.” *Powder Technology* 321: 119–31. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.08.032>.
- Marchelli, Filippo, Cristina Moliner, Barbara Bosio, and Elisabetta Arato. 2019a. “A CFD-DEM Sensitivity Analysis: The Case of a Pseudo-2D Spouted Bed.” *Powder Technology* 353: 409–25. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.035>.
- . 2019b. “A CFD-DEM Study of the Behaviour of Single-Solid and Binary Mixtures in a Pyramidal Spouted Bed.” *Particuology* 42: 79–91. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.03.017>.
- Mathur, K. B., and Norman Epstein. 1974. *Spouted Beds*. New York-USA: Academic Press.
- Mathur, K. B., and P. E. Gishler. 1955. “A Technique for Contacting Gases with Coarse Solid Particles.” *American Institute of Chemical Engineers Journal* 1: 157–64.
- MATHUR, Kishan B., and Norman EPSTEIN. 1974. *Spouted Beds*. New York: Academic Press.
- Moliner, Cristina, Filippo Marchelli, Barbara Bosio, and Elisabetta Arato. 2017a. “Modelling of Spouted and Spout-Fluid Beds: Key for Their Successful Scale Up.” *Energies* 10 (11). <https://doi.org/10.3390/en10111729>.
- . 2017b. “Modelling of Spouted and Spout-Fluid Beds: Key for Their Successful Scale Up.” *Energies* 10 (11). <https://doi.org/10.3390/en10111729>.
- Moliner, Cristina, Filippo Marchelli, Massimo Curti, Barbara Bosio, Giorgio Rovero, and Elisabetta Arato. 2018. “Spouting Behaviour of Binary Mixtures in Square-Based Spouted Beds.” *Particuology*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.01.003>.
- Moliner, Cristina, Filippo Marchelli, Laura Ong, Alfonso Martinez-Felipe, Dominic Van der A, and Elisabetta Arato. 2019. “Sensitivity Analysis and Validation of a Two Fluid Method (TFM) Model for a Spouted Bed.” *Chemical Engineering Science* 207: 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.06.008>.
- Moliner, Cristina, Filippo Marchelli, Nayia Spanachi, Alfonso Martinez-felipe, Barbara Bosio, and Elisabetta Arato. 2018. “CFD Simulation of a Spouted Bed : Comparison between the Discrete Element Method (DEM) and the Two Fluid Model (TFM).” *Chemical*

- Engineering Journal*, no. xxxx: 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.164>.
- Moliner, Cristina, Filippo Marchelli, Nayia Spanachi, Alfonso Martinez-Felipe, Barbara Bosio, and Elisabetta Arato. 2018. “CFD Simulation of a Spouted Bed: Comparison between the Discrete Element Method (DEM) and the Two Fluid Method (TFM).” *Chemical Engineering Journal*, no. xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.164>.
- Norouzi, Hamid Reza, Reza Zarghami, Rahmat Sotudeh-Gharebagh, and Navid Mostoufi. 2016. *Coupled CFD-DEM Modeling: Formulation, Implementation and Application to Multiphase Flows*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Olazar, Martin, Maria J. San José, Andrés T. Aguayo, José M. Arandes, and Javier Bilbao. 1992. “Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds.” *Industrial and Engineering Chemistry Research* 31 (7): 1784–92. <https://doi.org/10.1021/ie00007a025>.
- Olazar, Martin, Maria J. San Jose, Miguel A Izquierdo, Sonia Alvarez, and Javier Bilbao. 2004. “Fountain Geometry in Shallow Spouted Beds.” *Industrial and Engineering Chemistry Research* 43: 1163–68.
- Peng, Zhengbiao, Yusif A Alghamdi, Behdad Moghtaderi, and Elham Doroodchi. 2016. “CFD-DEM Investigation of Transition from Segregation to Mixing of Binary Solids in Gas Fluidised Beds.” *Advanced Powder Technology* 27 (6): 2342–53. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.08.024>.
- Pietsch, Swantje, Stefan Heinrich, Katja Karpinski, Michael Müller, Michael Schönherr, and Frank Kleine Jäger. 2017. “CFD-DEM Modeling of a Three-Dimensional Prismatic Spouted Bed.” *Powder Technology* 316: 245–55. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.046>.
- Pietsch, Swantje, Paul Kieckhefen, Stefan Heinrich, Michael Müller, Michael Schönherr, and Frank Kleine Jäger. 2018. “CFD-DEM Modelling of Circulation Frequencies and Residence Times in a Prismatic Spouted Bed.” *Chemical Engineering Research and Design* 132 (i): 1105–16. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.01.013>.
- Rasul, Mohammad G. 2001. “Spouted Bed Combustion of Wood Charcoal: Performance Comparison of Three Different Designs.” *Fuel* 80 (15): 2189–91. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00110-7).
- Ren, Bing, Wenqi Zhong, Xiaofeng Jiang, Baosheng Jin, and Zhulin Yuan. 2014. “Numerical Simulation of Spouting of Cylindroid Particles in a Spouted Bed.” *Canadian Journal of Chemical Engineering* 92 (5): 928–34. <https://doi.org/10.1002/cjce.21900>.
- Ren, Bing, Wenqi Zhong, Baosheng Jin, Yingjuan Shao, and Zhulin Yuan. 2013. “Numerical

- Simulation on the Mixing Behavior of Corn-Shaped Particles in a Spouted Bed.” *Powder Technology* 234: 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.09.024>.
- Renzo, Alberto Di, and Francesco Paolo Di Maio. 2004. “Comparison of Contact-Force Models for the Simulation of Collisions in DEM-Based Granular Flow Codes.” *Chemical Engineering Science* 59 (3): 525–41. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.09.037>.
- Roache, P. J. 1994. “Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies.” *Journal of Fluids Engineering* 116 (3): 405–13. <https://doi.org/10.1109/GHTC.2011.83>.
- Rosa, Cezar A. Da, and José T. Freire. 2009. “Fluid Dynamics Analysis of a Draft-Tube Continuous Spouted Bed with Particles Bottom Feed Using CFD.” *Industrial and Engineering Chemistry Research* 48 (16): 7813–20. <https://doi.org/10.1021/ie900547u>.
- Salikov, Vitalij, Sergiy Antonyuk, Stefan Heinrich, Vinayak S. Sutkar, Niels G. Deen, and J. A.M. Kuipers. 2015. “Characterization and CFD-DEM Modelling of a Prismatic Spouted Bed.” *Powder Technology* 270 (PB): 622–36. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.026>.
- San José, María J., Sonia Alvarez, Iris García, and Francisco J. Peñas. 2014. “Conical Spouted Bed Combustor for Clean Valorization of Sludge Wastes from Paper Industry to Generate Energy.” *Chemical Engineering Research and Design* 92 (4): 672–78. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.01.008>.
- Souza Nascimento, Bruna de, Fábio Bentes Freire, and José Teixeira Freire. 2013. “Neuronal and Grey Modelling of Milk Drying in Spouted Bed.” *Canadian Journal of Chemical Engineering* 91 (11): 1815–21. <https://doi.org/10.1002/cjce.21886>.
- Taghizadeh, Afshin, Seyed Hassan Hashemabadi, Esmail Yazdani, and Soheil Akbari. 2018. “Numerical Analysis of Restitution Coefficient, Rotational Speed and Particle Size Effects on the Hydrodynamics of Particles in a Rotating Drum.” *Granular Matter* 20 (3): 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0813-2>.
- Thornton, Colin. 2015. *Granular Dynamics, Contact Mechanics and Particle System Simulations: A DEM Study*. Granular Dynamics, Contact Mechanics and Particle System Simulations: A DEM Study. Vol. 24. Birmingham, UK. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18711-2>.
- Wang, Lijun, Rui Li, Baoxin Wu, Zhenchao Wu, and Zhenjun Ding. 2018. “Determination of the Coefficient of Rolling Friction of an Irregularly Shaped Maize Particle Group Using Physical Experiment and Simulations.” *Particuology* 38: 185–95. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2017.06.003>.

- Wang, Lijun, Wenxiu Zhou, Zhenjun Ding, Xingxing Li, and Chuangen Zhang. 2015. "Experimental Determination of Parameter Effects on the Coefficient of Restitution of Differently Shaped Maize in Three-Dimensions." *Powder Technology* 284: 187–94. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.042>.
- Wen, C. Y., and Y. H. Yu. 1966. "Mechanics of Fluidization." *Chemical Engineering Progress Symposium Series* 62.
- Xiao, Xiangwu, Yuanqiang Tan, Hao Zhang, Rong Deng, and Shengqiang Jiang. 2017. "Experimental and DEM Studies on the Particle Mixing Performance in Rotating Drums: Effect of Area Ratio." *Powder Technology* 314: 182–94. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.044>.
- Xu, Huibin, Wenqi Zhong, Zhulin Yuan, and A. B. Yu. 2017. "CFD-DEM Study on Cohesive Particles in a Spouted Bed." *Powder Technology* 314: 377–86. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.006>.
- Yang, Shiliang, Kun Luo, Mingming Fang, and Jianren Fan. 2014. "CFD-DEM Simulation of the Spout-Annulus Interaction in a 3D Spouted Bed with a Conical Base." *Canadian Journal of Chemical Engineering* 92 (6): 1130–38. <https://doi.org/10.1002/cjce.21958>.
- Yurata, Tarabordin, Pornpote Piumsomboon, and Benjapon Chalermssinsuwan. 2020. "Effect of Contact Force Modeling Parameters on the System Hydrodynamics of Spouted Bed Using CFD-DEM Simulation and 2 Factorial Experimental Design." *Chemical Engineering Research and Design* 153 (January): 401–18. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.025>.
- Zhang, Huang, and Shuiqing Li. 2017. "DEM Simulation of Wet Granular-Fluid Flows in Spouted Beds: Numerical Studies and Experimental Verifications." *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.05.009>.
- Zhang, Qinghong, Wenjian Cai, Cailei Lu, Dimitri Gidaspow, and Huilin Lu. 2019. "Modified MFI Code to Simulate Hydrodynamics of Gas-Solids Bubbling Fluidized Beds: A Model of Coupled Kinetic Theory of Granular Flow and Discrete Element Method." *Powder Technology* 357: 417–27. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.056>.
- Zhao, X. L., S. Q. Li, G. Q. Liu, Q. Yao, and J. S. Marshall. 2008. "DEM Simulation of the Particle Dynamics in Two-Dimensional Spouted Beds." *Powder Technology* 184 (2): 205–13. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.11.044>.
- Zhou, Jiandong, and Duane D. Bruns. 2012. "Minimum Spouting Velocity of Dense Particles in Shallow Spouted Beds." *Canadian Journal of Chemical Engineering* 90 (3): 558–64. <https://doi.org/10.1002/cjce.20654>.