



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Alysson Dantas Ferreira

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA FLUIDODINÂMICA DE UM
LEITO DE JORRO

Campina Grande-PB

2019

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA FLUIDODINÂMICA DE UM LEITO DE JORRO

Alysson Dantas Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Dr. Severino Rodrigues de Farias
Neto

Campina Grande
Março de 2019

F383e Ferreira, Alysson Dantas.
Estudo experimental e numérico da fluidodinâmica de um leito de jorro / Alysson Dantas Ferreira. – Campina Grande, 2019.
54 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto".
Referências.

1. Modelagem. 2. CFD. 3. OpenFOAM. I. Farias Neto, Severino Rodrigues de. II. Título.

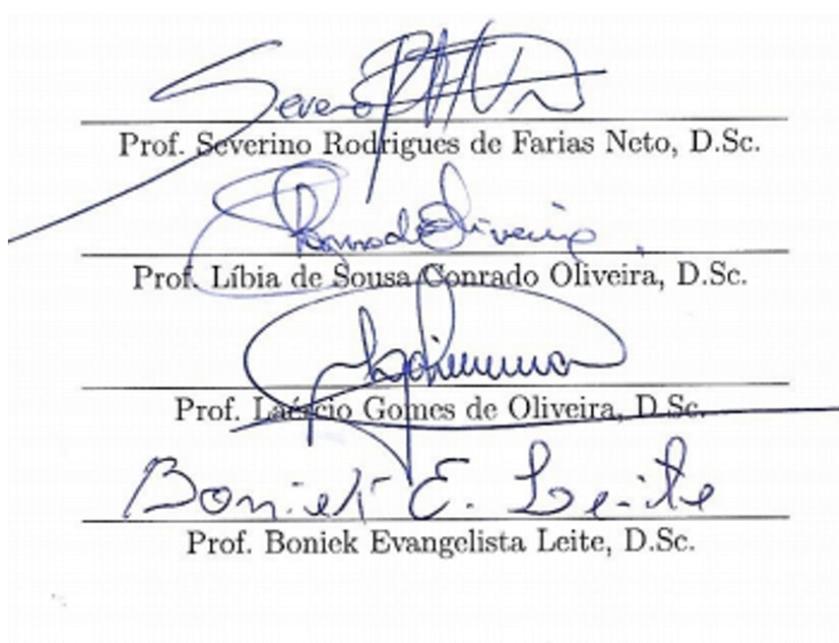
CDU 66.047:004.414.23(043)

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA FLUIDODINÂMICA DE UM
LEITO DE JORRO

Alysson Dantas Ferreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE CAMPINA GRANDE COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA QUÍMICA.

Dissertação apresentada e aprovada em 15/03/2019, pela banca examinadora cons-
tituída pelos professores:



Prof. Severino Rodrigues de Farias Neto, D.Sc.

Prof. Líbia de Sousa Conrado Oliveira, D.Sc.

Prof. Láticio Gomes de Oliveira, D.Sc.

Prof. Boniek Evangelista Leite, D.Sc.

CAMPINA GRANDE, PB – BRASIL
MARÇO DE 2019

*Aos meus pais por todo o amor,
incentivo e compreensão ao longo
desta árdua jornada e a Maria
das Neves Cardoso (In
Memorian) que em todos os
momentos de dificuldades, sei
que sempre esteve ao meu lado.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela saúde e pela coragem de seguir em frente com os meus objetivos e não desanimar com as dificuldades.

Agradeço aos meus irmãos, Anderson Dantas, Suzana Dantas, a minha namorada, Aline Mirely e principalmente aos meus pais, Alcilene Dantas da Silva e Severino Ferreira Filho, que sempre me motivaram, entenderam as minhas faltas e momentos de afastamento e reclusão e me mostraram o quanto era importante estudar.

Ao meu orientador, professor e amigo, Prof. Severino Rodrigues de Farias Neto, pelos seus sábios ensinamentos, amizade, paciência, confiança e sua sempre valiosa orientação.

A professora Líbia de Sousa Conrado Oliveira, pela parceria com o LEB, onde se foi possível realizar os experimentos e pela ajuda preciosa dada ao desenvolvimento do meu trabalho laboratorial.

A Tamires Santos, pelo tempo dedicado a me ajudar na realização dos experimentos. O meu muito obrigado.

Agradeço também aos membros da banca, Líbia de Sousa Conrado Oliveira, Laércio Gomes de Oliveira e Boniek Evangelista Leite por terem aceito o convite, se colocando a disposição para avaliar e contribuir com este trabalho.

As minhas tias Maria José Ferreira, Edna Cristina e Maria Leda, pelo carinho e apoio dado durante os dois anos de mestrado.

Gostaria de deixar registrada minha gratidão aos amigos que me acompanharam desde os tempos de graduação, Gilvan Wanderley, Esley Cavalcante e Gladson Euler.

Agradeço a Universidade Federal de Campina Grande, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, bem como seus professores e funcionários, que se dedicam diariamente para possibilitar a formação de novos mestres e doutores.

Agradeço também ao suporte da financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - Brasil.

Por fim desejo exprimir os meus agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, permitiram que esta dissertação se concretizasse.

*“Lembre-se que as pessoas podem
tirar tudo de você, menos o seu
conhecimento.”*

Albert Einstein

Resumo da Dissertação apresentada à PPGEQ/UFCG como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química (M.Sc.)

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA FLUIDODINÂMICA DE UM LEITO DE JORRO

Alysson Dantas Ferreira

Março/2019

Orientador: Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

Programa: Engenharia Química

O leito de jorro é um equipamento muito utilizado nos mais diversos ramos da indústria devido a sua ampla aplicabilidade. Este equipamento apresenta algumas limitações, principalmente quando há a necessidade de um scale-up, o que dependem das condições geométricas e operacionais. Assim um modelo matemático que represente bem os fenômenos envolvidos auxilia no desenvolvimento de leitos de jorro mais eficientes. Neste sentido, a proposta deste trabalho é avaliar a dinâmica do leito de jorro aplicado a fluidodinâmica computacional. Foi adotada a abordagem euleriana-lagrangiana para avaliar o comportamento das fases. Empregou-se o software OpenFOAM na resolução das equações de conservação de massa, momento e de turbulência. Foram avaliados duas situações na aplicação da abordagem lagrangiana. A primeira DPM e a segunda MP-PIC. Os resultados das simulações, indicam que o modelo DPM representou melhor o comportamento do leito de jorro em relação ao MP-PIC. Os resultados numéricos foram confrontados com os dados experimentais do leito de jorro retangular (reportados na literatura) e cônico (dados obtidos experimentalmente ao longo da pesquisa). Nas duas situações, os resultados numéricos apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais.

Palavras-chave: Modelagem, CFD, OpenFOAM.

Abstract of Dissertation presented to PPGEQ/UFCG as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF THE FLUIDODYNAMICS IN A SPOUTED BED

Alysson Dantas Ferreira

March/2019

Advisor: Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

Department: Chemical Engineering

The spouted bed is an equipment widely used in the most diverse branches of the industry due to its wide applicability. This equipment presents some limitations, especially when there is a need for a scale-up, which depends on the geometric and operational conditions. Thus a mathematical model that represents well the phenomena involved assists in the development of more efficient spouted beds. In this sense, the proposal of this work is to evaluate the dynamics of the spouted bed applied to computational fluid dynamics. The Eulerian-Lagrangian approach was adopted to evaluate the behavior of the phases. The OpenFOAM software was used to solve mass conservation, momentum and turbulence equations. Two situations were evaluated in the application of the Lagrangian approach. The first DPM and the second MP-PIC. The results of the simulations indicate that the DPM model represented better the behavior of the spouted bed in relation to MP-PIC. The numerical results were compared with the experimental data of the rectangular jet bed (reported in the literature) and conical (data obtained experimentally throughout the research). In both situations, the numerical results showed a good agreement with the experimental data.

Key-Words: Modeling, CFD, OpenFOAM.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Siglas e Símbolos	xii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivo	2
1.2.1 Objetivos Específicos	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Leito de Jorro	4
2.1.1 Mecanismo Fluidodinâmico	7
2.2 Fluido Dinâmica Computacional	8
2.2.1 OpenFOAM	11
2.3 Escoamento Multifásico	12
2.3.1 Característica da Fase Discreta	17
2.3.2 Modelagem Lagrangiana	20
3 Metodologia	24
3.1 Abordagem Experimental	24
3.1.1 Caracterização das partículas	24
3.1.2 Unidade Experimental	26
3.1.3 Procedimento Experimental	29
3.2 Abordagem Teórica	29
3.2.1 Definição do Problema	29
3.2.2 Domínio de Estudo	30
3.2.3 Domínio Computacional: Malha	32
3.2.4 Modelagem Matemática	33
3.2.5 Condições Iniciais e de Contorno	36
3.2.6 Modelagem Numérica	37

4	Resultados e Discussões	40
4.1	Experimental	40
4.1.1	Caracterização do Inerte	40
4.1.2	Obtenção da Curva Característica	40
4.2	Resultados Numérico	42
4.2.1	Convergência da Malha	42
4.2.2	Resíduos	43
4.2.3	Avaliação dos Modelos DPM e MP-PIC	44
4.2.4	Leito de Jorro Cônico	47
5	Conclusões	51
	Referências Bibliográficas	52

Lista de Figuras

1.1	Leito de Jorro	2
2.1	Diagrama do leito de jorro.	5
2.2	Curva característica para um leito de jorro.	7
2.3	Padrões de escoamento Gás-Sólido	14
2.4	Abordagens para a resolução de problemas com partículas	16
2.5	Regimes de escoamento.	19
2.6	Mapa dos mecanismos de acoplamento.	21
3.1	Esquema do diâmetro da partícula.	25
3.2	Esquema da esfericidade.	26
3.3	Leito de Jorro.	27
3.4	Sistema de impulsão.	28
3.5	Tela presente na base do leito de jorro.	29
3.6	Esquema da metodologia numérica	30
3.7	Aparato experimental.	31
3.8	Geometrias CAD.	31
3.9	Malha computacional.	32
4.1	Curva característica experimental do leito de jorro cônico	42
4.2	Resíduos da simulação do MP-PIC	43
4.3	Resíduos da simulação do DPM	43
4.4	Resíduos da simulação do MPP-IC corrigido	44
4.5	Resíduos da simulação do DPM corrigido	45
4.6	Comparativo dos modelos avaliados.	45
4.7	Distribuição radial da concentração de partícula	46
4.8	Comportamento das partículas no leito de jorro cônico.	47
4.9	Comportamento da pressão no leito de jorro cônico.	48
4.10	Comparação da queda de pressão experimental e simulado.	50

Lista de Tabelas

3.1	Tamanho dos elementos.	33
3.2	Equações governantes.	34
3.3	Equações constitutivas.	35
3.4	Propriedades físicas da simulação.	36
3.5	Métodos numéricos - Discretização e resolução das matrizes.	38
3.6	Métodos Numéricos - Relaxamento e acoplamento pressão-velocidade.	39
4.1	Propriedades físicas das partículas.	40
4.2	Velocidade medida e velocidade real.	41
4.3	Médias e desvios padrões do experimento.	41
4.4	Comparativo das pressões simuladas e medidas para o base.	49
4.5	Comparativo das pressões simuladas e medidas para a topo.	49
4.6	Comparativo da variação de pressão simulada e medida.	49

Lista de Siglas e Símbolos

Siglas

CAD Computer-Aided Design

CFD Computational Fluid Dynamics

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

DEM Discrete Element Method

DPM Discrete Parcel Method

GPL Gnu Public License

LEB Laboratório de Engenharia Bioquímica

MP – PIC Multiphase Particle In Cell

PIC Particle In Cell

Símbolos

α_c Fração de volume do fluido

ϵ Dissipação da energia cinética turbulenta.

κ Produção de energia cinética turbulenta.

μ_c Viscosidade dinâmica do fluido

μ_t Viscosidade dinâmica turbulenta do fluido

ϕ_p Esfericidade da partícula

ρ_d Densidade da partícula

ρ_f Densidade do fluido

τ_c Tensão do fluido

τ_p	Tensão da partícula
τ_t	Tempo de resposta do térmica
τ_V	Tempo de resposta do momento
C_D	Coefficiente de arrasto.
d_p	Diâmetro da partícula
g	Gravidade
m_p	Massa da partícula
q_{jm}	Vazão de jorro mínimo
Re_p	Reynolds de partícula.
St	Número de Stokes
u_f	Velocidade do fluido
u_p	Velocidade da partícula

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

O leito de jorro foi estudado e desenvolvido pelos canadenses Mathur e Gishler em 1954 com a finalidade de secar grãos de trigo. Segundo SANTOS et al. (2015), o leito de jorro se caracteriza pelo movimento aleatório das partículas, apresentando movimentos cíclicos e mais uniformes comparado com o leito fluidizado, possibilitando assim, um contato mais efetivo entre as fases envolvidas, alcançando elevados coeficientes convectivos de transferência de massa, energia e quantidade de movimento. Desta forma, o leito de jorro apresenta maiores eficiências em suas operações, quando comparado com outros secadores, além de apresentar baixo custo de instalação, operação e manutenção, sendo essas uma das razões do porque tem sido aplicado em diversas atividades industriais. A Figura 1.1 apresenta a configuração mais tradicional do leito de jorro.

De acordo com WU et al. (2018), o leito de jorro tem sido utilizado em indústrias petroquímicas, químicas, nucleares e metalúrgicas, para processos como secagem, granulação, polimerizações, pirólise, gaseificação e revestimento de combustível nuclear, entre outras coisas.

Apesar das vantagens do leito de jorro, esse equipamento apresenta algumas limitações, como por exemplo, quando há a necessidade de *scale-up*, visto que, dependendo das condições geométricas e operacionais, o leito de jorro apresenta instabilidades as quais são caracterizadas por formações de bolhas acarretando o surgimento de pulsações da fonte e, conseqüentemente, a diminuição de sua eficiência (SANTOS et al., (2015)), além de ser um equipamento que apresenta elevada queda de pressão e uma máxima altura do leito para uma operação estável.

SILVA et al. (2016), afirma que estudos fluidodinâmicos de leitos de jorro são de grande importância, pois fornecem curvas características que determinam importantes parâmetros operacionais. Estes estão intimamente ligados ao tipo de partícula



Figura 1.1: Leito de Jorro

Fonte: Laboratório de Sistemas Particulados e Termodinâmica Computacional

presente no interior do equipamento e do fluido que escoar no interior mesmo, a altura do leito estático de partículas e a geometria do equipamento.

Segundo SANTOS et al. (2015), o estudo aplicando as técnicas experimentais apresenta alguns obstáculos, como por exemplo, o custo para construção de equipamentos, perturbações provocadas por medidas experimentais intrusivas, entre outras. Desta forma, a aplicação de simulação numérica computacional pode contribuir com o desenvolvimento e otimização do equipamento e do processo de secagem, reações químicas, processos farmacêuticos, entre outros.

Diante do exposto é de fundamental importância um modelo matemático que seja capaz de fornecer o conhecimento da fluidodinâmica do leito de jorro, para contribuir no entendimento fenomenológico desse equipamento aplicado a operações específicas, a exemplo da secagem de partículas. Portanto a proposta desse trabalho de dissertação consiste em confrontar alguns modelos encontrados na literatura, e usar o melhor para avaliar os efeitos dos parâmetros operacionais.

1.2 Objetivo

Avaliar o comportamento fluidodinâmico de um leito de jorro via fluidodinâmica computacional.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Realizar experimentos em um leito de jorro variando as condições operacionais;
- Definir uma modelagem matemática para prever o comportamento das partículas no interior do leito de jorro;
- Aplicar os métodos multifásicos de partículas em célula (MP-PIC) e o de partícula discreta (DPM) para avaliar qual dos métodos melhor representa a fluidodinâmica do leito de jorro.
- Comparar os resultados numéricos obtidos com os dados analíticos e/ou experimentais reportados na literatura.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Leito de Jorro

O leito de jorro é um equipamento formado por uma câmara de secagem cilíndrica acoplada a uma base cônica, que possui em sua extremidade inferior um duto, na qual ocorre a entrada do fluido de jorro. Esse equipamento tem como finalidade melhorar o contato entre um fluido e partículas que apresentam fluidização de baixa qualidade, promovendo assim, um aumento nos coeficientes convectivos de massa e calor entre as fases, podendo ser aplicado em processos como secagem de grãos e pastas, granulação, recobrimento de sólidos, extração mecânica por atrito de produtos de alto valor agregado, dentre outros.

O leito de jorro convencional foi desenvolvido por Mathur e Epstein no ano de 1954, para secagem de grandes partículas. Na tentativa de secar grãos de trigo em leito fluidizado, os pesquisadores observaram que partículas com diâmetro superior a 1 mm não fluidizavam bem. Após o rompimento acidental da placa de distribuição de ar do leito fluidizado, eles verificaram que submetendo as partículas a uma vazão maior de ar, o leito apresentava um movimento cíclico de partículas e executava certas operações úteis em partículas sólidas que não podem ser executadas em um leito fluidizado, devido ao movimento de partículas comparativamente aleatório (MATHUR E EPSTEIN, 1974).

Segundo DUARTE (2002), alguns autores consideram o leito de jorro como uma versão modificada do leito fluidizado, isto em função da pequena fluidização encontrada nesse tipo de leito quando em contato com partículas maiores. Ainda segundo DUARTE (2002), a consideração de um leito de jorro como uma versão modificada de leito fluidizado não é adequada, visto que o leito de jorro exibe características particulares no comportamento das partículas, que não podem ser observadas quando comparado com um leito fluido.

O regime de jorro é estabelecido pela entrada de um jato de fluido em um leito

de sólidos particulados, também conhecidos como inertes. Após a entrada do fluido, normalmente constituído por ar, através da extremidade inferior da base cônica, nota-se com o aumento gradativo da vazão do fluido que surge uma aceleração ascendente das partículas sólidas presentes no interior da câmara com formação de um canal central diluído, denominado de região de jorro. Ao redor do canal central, verifica-se a presença de um leito denso de partículas, que se deslocam contra o fluxo ascendente de ar, traçando uma trajetória parabólica em relação à região central do equipamento, esta região que compreende o leito deslizante de partículas recebe a denominação de ânulo ou região anular. Quando as partículas provenientes da região de jorro atingem a superfície do leito, conhecidas como região fonte, as mesmas desaceleram e caem sobre a região anular. Por fim, essas partículas descreveram uma trajetória de volta para a região de jorro, fechando o ciclo que se mantém até o final da operação de secagem. A Figura 2.1 ilustra esquematicamente a movimentação cíclica e ordenada das partículas em um leito de jorro convencional.(MATHUR E EPSTEIN, 1974).

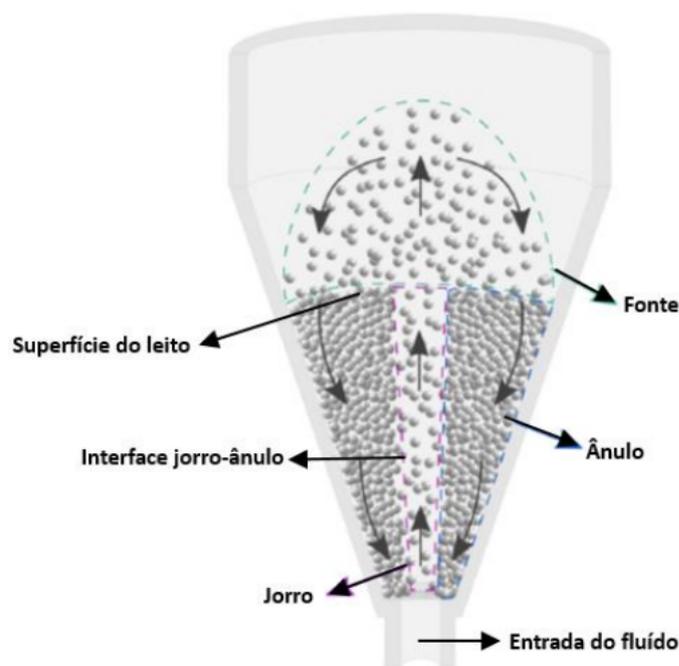


Figura 2.1: Diagrama do leito de jorro.
 Fonte: SANTOS JÚNIOR (2016)

Segundo ROCHA (2006), o movimento do sólido depende muito da razão do comprimento cone-cilindro. Em leitos com pequenos ângulos do cone, o fluxo tem forma muito semelhante a fluidização. O leito de jorro convencional apresenta algumas limitações, entre elas:

1. Elevada perda de carga antes de atingir o jorro estável;

2. Dimensões geométricas limitadas para uma operação eficiente;
3. Fluxo de gás limitado mais pelas exigências de estabilidade do jorro que pelas necessidades de transferência de calor e massa;
4. Faixa operacional limitada;
5. Capacidade limitada por unidade de espaço (devido aos limites sobre as dimensões do secador e à altura máxima de carga capaz de manter o jorro estável);
6. Dificuldade de mudança de escala.

Devido a essas limitações, vem-se estudando algumas alterações na configuração geométrica do leito de jorro convencional, dentre as quais, de acordo com CONCEIÇÃO FILHO (1997), destacam-se:

a) leito de jorro cônico: constituído apenas por uma base cônica, esse leito tem como principal vantagem a capacidade de carga, ou seja, para uma mesma altura do leito é possível alimentar o equipamento com uma carga inicial maior do que aquela comparada com um leito convencional, onde o ângulo da base tronco-cônica é igual ao ângulo do leito cônico;

b) leito de jorro com tubo interno (DTSB): nesta variação há a inserção de um tubo concêntrico à parte cilíndrica do leito. Com a utilização desse artifício, consegue-se a melhora do comportamento fluidodinâmico, com o direcionamento do ar na região de jorro central, o que possibilita uma redução na queda de pressão máxima. Sua principal vantagem é o aumento no tempo de residência das partículas bem como na homogeneização da circulação de partículas. Como desvantagens, destaca-se o comprometimento da permeação do ar na região anular e a diminuição das taxas de transferência de calor e massa nessa região, o que pode acarretar prejuízo às operações de secagem, por exemplo;

c) leito de jorro diluído (JSB): a característica que diferencia este grupo em relação ao convencional está no diâmetro de entrada do ar e no aumento da porosidade da região anular (acima de 85 %), além da diminuição do tempo de residência dos materiais, que pode ser uma vantagem adicional na secagem de pastas, por exemplo. Entretanto, na secagem de sistemas estruturados, o elevado grau de atrito inter-particular pode ser uma característica desfavorável na aplicação desse regime;

d) leito de jorro bidimensional (2DSB): leito composto de um prisma retangular com uma base de tronco de pirâmide, muito utilizado para o estudo da influência do ângulo da base como uma das variáveis do processo de recobrimento. A entrada do ar na forma de fenda permite que o ar de jorro penetre por toda a extensão da câmara permitindo que sua operação seja feita em leitos de grandes dimensões sem a ocorrência de elevadas perdas de carga;

e) leito vibro-jorado (VFB): a movimentação das partículas é aumentada pela

se aumenta a vazão do fluido, originando o jorro interno, ao tempo em que a queda de pressão aumenta até o ponto B, em que se verifica a situação de queda de pressão máxima do sistema, ($\Delta P_{máx}$). Nesse ponto, a altura do jorro interno é bem maior do que aquela em que as partículas estão compactadas na parte superior do leito, de modo que incrementos no valor da vazão do fluido acarretam decréscimos na queda de pressão. Continuando com o aumento da vazão, muitos sólidos são deslocados da região central causando uma expansão significativa do leito, assim, a queda de pressão diminui até o ponto C, o qual corresponde ao jorro incipiente, em que existe a instabilidade no jorro interno em virtude da oscilação na sua altura. O jorro está próximo à superfície do leito, mas é instável em decorrência da formação frequente de bolhas na região adjacente mais densa de partículas (região anular). No ponto C, qualquer incremento na vazão do fluido faz com que a queda de pressão caia bruscamente até o ponto D, no qual o jorro aflora através da superfície deste leito. A partir desse ponto, incrementos na vazão do fluido ocasionam a elevação da altura da fonte de partículas e a queda de pressão mantém-se praticamente constante. (CREMASCO (2014)).

Ainda segundo CREMASCO (2014), no processo inverso, com a redução da vazão do fluido, o jorro se mantém até o ponto E correspondente à situação de jorro mínimo (q_{jm}) e a queda de pressão correspondente é (ΔP_{jm}). Na situação de jorro mínimo, tem-se o menor valor para a vazão do fluido com o qual se pode obter o jorro estável. Prosseguindo a redução dessa vazão, chega-se ao ponto F, máximo de queda de pressão, cujo valor é menor do que o valor de queda de pressão referente ao ponto D, pois, no processo inverso, a queda de pressão é devida à interação fluido-partícula, não havendo a ruptura do jato de fluido através do leito. A partir desse ponto, a queda de pressão volta a decrescer à medida que se processam as reduções da vazão do fluido e o leito, assim como na fluidização, passa a comportar-se como leito fixo, em que a sua porosidade é a de um leito expandido.

2.2 Fluido Dinâmica Computacional

A fluidodinâmica computacional, ou do inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD) foi definida por MALALASEKERA e VERSTEEG (2007) como a análise de escoamentos, transferência de calor e fenômenos associados a reações químicas através de simulações auxiliadas por computadores.

O estudo da CFD deu-se início por volta do ano 1960, quando a indústria aeronáutica começou a utilizar os resultados das simulações das equações que governam o deslocamento do ar ao redor de aviões, para suportar o desenvolvimento de suas aeronaves. Poucos anos depois essa mesma técnica começou a ser aplicada em projetos

de máquinas térmicas e turbinas a gás, chegando posteriormente a indústria automobilística, que a utilizou para a análise da aerodinâmica dos carros. A partir deste marco, observou-se que essas equações que respondiam diversos questionamentos nestes equipamentos, também poderiam ser aplicadas a estudos de escoamentos de um modo geral, assim esta ciência se alastrou nos mais diversos campos da engenharia.

Segundo OLIVEIRA et al. (2012), a CFD é uma ferramenta poderosa, aplicada tanto no projeto de engenharia como na investigação e desenvolvimento de uma base de conhecimento para auxiliar em novos projetos. A utilização deste conjunto de ferramentas tem se destacado, principalmente, a partir da década de 1990. A evolução dos computadores, possibilitaram o fornecimento de resultados com maior acurácia para situações com escoamentos complexos e onde o acesso a instrumentação de equipamentos industriais se torna difícil.

Com o auxílio das ferramentas da CFD é possível simular difusão e convecção de substâncias fluidas nos mais diferentes ambientes; realizar o planejamento e gestão de recursos hídricos; analisar a aerodinâmica e aerotermodinâmica de veículos; avaliar a refrigeração de equipamentos, como reatores nucleares, motores entre outros; fazer estudos de caracterização de poluição ambiental, dispersão de gases, análise e simulação de lançamento de poluentes e contaminantes em corrente hídricas; testar e desenvolver projetos de sistemas propulsivos e de geração de energia em geral; processos químicos como misturas, separações, reações entre outros;

TU et al. (2008) apresentam algumas vantagens relacionadas ao uso de CFD:

- Em alguns casos, no desenvolvimento teórico, muitos termos são desprezados para que a resolução das equações seja possível. No caso da utilização de algoritmos computacionais, é possível resolver as equações diferenciais completas, tornando a análise do escoamento mais próxima da realidade;
- O estudo de um certo sistema em diversas configurações é facilitado, o que implica em um menor custo quando comparado com experimentos laboratoriais;
- Diversos valores para números adimensionais podem ser avaliados durante o trabalho, fornecendo mais flexibilidade e eficiência nas primeiras etapas do projeto de um sistema de escoamento;

Existem diversos pacotes abertos e comerciais de softwares que simulam os mais diversos tipos de escoamento (bi ou tridimensionais, monofásicos ou multifásicos, etc.), a exemplo do FlexPDE, CFX, FLUENT, POLIFLOW, OpenFOAM, Saturne, Salome e outros. Esses se diferenciam em diversos fatores, tais como: Construção da geometria, geração da malha (estruturada ou não estruturada), modelos de turbulência e de transferência interfacial, método de resolução de equações (diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos).

MALALASEKERA e VERSTEEG (2007) explicita que os códigos de CFD são estruturados em torno de algoritmos de resolução numéricos que podem resolver problemas de fluxo de fluido. De modo a oferecer um fácil acesso ao seu poder de resolução e problemas, softwares comerciais incluem interfaces gráficas sofisticadas para parâmetros de problemas de entrada e para avaliação de resultados.

Um problema de CFD pode ser dividido em 3 importantes etapas:

Pré-Processamento

O pré-processamento é caracterizado por preparar a modelagem que os softwares irão solucionar. Nessa etapa se faz necessário seguir uma serie passos, onde o primeiro é definir o domínio de estudo através da criação de uma geometria através de uma ferramenta CAD, reproduzindo a região de interesse, ou seja, definindo o volume de controle do problema. O segundo passo é a geração da malha, onde se divide o domínio de estudo em pequenos volumes de controle, de modo que em cada um desses elementos sejam resolvidos as equações matemáticas. Esses primeiros passos são costumeiramente demorados, levando cerca de 60% do tempo do estudo (segundo MALALASEKERA e VERSTEEG (2007)) e crítico para a simulação, uma vez que o uso de uma malha não adequada pode influenciar nos resultados. Posteriormente, define-se a modelagem matemática do problema, isto é, escolher as equações matemáticas que representem os fenômenos físicos e químicos que serão resolvidas pelo algoritmo dos software. Ainda nessa etapa, deve-se especificar as condições de contorno, bem como os algoritmos de discretização que serão utilizados, sendo essa tarefa de grande importância, pois também podem influenciar na solução numérica.

Processamento

A etapa de processamento é onde os software estarão aplicando o método de discretização e resolução de matrizes para resolver a modelagem realizada no pré-processamento. Existem uma grande variedade de métodos de discretização, onde pode-se destacar o método dos volumes finitos, este que é empregado nos mais famosos softwares de CFD.

O método dos volumes finito tem como objetivo substituir a solução contínua das equações diferenciais parciais das equações de conservação por valores discretos, realizando resumidamente os seguintes passos:

- Integração das equações de conservação sobre todos os volumes de controle;
- Aplicação do teorema da divergência nas integrais dos termos convectivos e

difusivos;

- Substituição da integral de superfície sobre os volumes de controle pelo somatório dos termos de fluxo sobre a face dos elementos;
- Uso da quadratura gaussiana;
- Obtenção das equações algébricas;
- Resolução das equações algébricas por um método numérico

Segundo PATANKAR (1980), uma das grandes vantagens desse procedimento é que as equações algébricas obtidas satisfazem aos princípios de conservação, o que não necessariamente ocorre com outros métodos, como o de elementos finitos ou de diferenças finitas.

Pós-Processamento

Quando a simulação é concluída com êxito, o usuário dispõe de uma vasta quantidade de dados a serem avaliados e discutidos. Os dados devem ser visualizados de maneira apropriada, a fim de examinar minuciosamente os resultados obtidos do problema em estudo. Para tanto, existe vastas opções de softwares, nos quais podemos citar o ParaView, Post-cfx.

2.2.1 OpenFOAM

Com o objetivo de desenvolver um código CFD e estruturá-lo de forma a se tornar geral o suficiente para que outras pessoas pudessem utilizá-lo como um *software* confiável, eficiente e de fácil manuseio, em 1993, os então alunos de doutorado da Imperial College, Henry Weller e Hrvoje Jasak combinaram esforços e desenvolveram a ferramenta FOAM (Field Operation and Manipulation) para operar e manipular campos tensoriais visando aplicações na fluidodinâmica computacional.

Em dezembro de 2004, o FOAM teve seu código liberado e se tornou domínio público através da licença GLP (Gnu Public License), assim tendo seu nome mudado para OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation). A partir deste momento houve um enorme crescimento no número de usuários que, além de poder usar os muitos *solvers* padrões que o pacote já possuía para o caso dos problemas mais gerais envolvendo fluidos newtonianos, podiam também desenvolver *solvers* específicos para os seus problemas de interesse.

A tecnologia do OpenFOAM é baseada em um conjunto eficiente e flexível de módulos escritos em C++ que são usados com o intuito de construir: (i) *solvers* para resolver problemas específicos de engenharia que envolvam campos vetoriais, (ii)

utilitários para realizar tarefas de pré e pós-processamento, que vão de uma simples manipulação de dados à visualização e construção e processamento de malhas, e (iii) bibliotecas de expansão usadas pelos *solvers* e utilitários, tal como uma biblioteca de modelos físicos.

O OpenFOAM é um pacote completo no sentido de permitir a simulação de sistemas complexos utilizando computação em paralelo, permite a utilização de malhas estruturadas e não-estruturadas, assim como permite a importação das mesmas de *softwares* livres e comerciais. Possui uma grande capacidade multi-físicas, apresentando fluxo compressíveis e incompressíveis, transferência de calor, combustão, reação química, fluxos multifásicos, transferência de massa; métodos de partículas (DEM, DSMC, MD), rastreamento de partículas lagrangianas; análise de tensão e interação fluido-estrutura, manipulação de malhas dinâmica e refinamento adaptativo. Quanto à modelagem física apresenta modelos termo-físicos e propriedades físicas para líquidos e gases; modelos de transporte/reologia; modelos de viscosidade newtoniana e não-newtoniana; extensas capacidades de modelagem de turbulência (RANS, SRS, DES, LES e DNS); modelagem discreta de partículas (DPM, MP-PIC); métodos VOF e EULER-EULER para fluxos multifásicos; modelagem de transferência de momento interfásico para fluxos multifásicos; velocidade da chama; reação química; meios porosos e alguns outros. Além de possuir uma grande variedade de esquemas de interpolação e bons *solvers* para resolução de sistemas lineares de equações.

Segundo SOARES (2017), a comunidade de programadores de diferentes graus de experiência é extremamente colaborativa, sendo promovida em fóruns na internet a sinergia entre os interessados por sistemas físicos restritos ou pelo desenvolvimento do pacote como um todo, em prol do aprimoramento contínuo dos resultados obtidos.

2.3 Escoamento Multifásico

Na fluidodinâmica, os estudos envolvendo escoamentos multifásicos podem ser definidos para qualquer sistema de escoamento de fluido em que haja duas ou mais fases distintas presente simultaneamente, apresentando uma separação entre as fases acima nível microscópico. Dependendo das combinações entre as fases, os escoamentos multifásicos podem ser definidos, de acordo com YEOH e TU (2010), como:

- **ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO** - Os escoamentos de gás-líquido podem, em princípio, assumir várias configurações. Um exemplo é o movimento de bolhas em um fluxo líquido, enquanto outro é o movimento de gotículas líquidas em um gás. Estes dois exemplos também podem ser categorizados como fluxos dispersos. Para

o primeiro exemplo, o líquido é tomado como a fase contínua e as bolhas são consideradas como constituintes discretos da fase dispersa. Para o segundo exemplo, o gás, no entanto, é tomado como a fase contínua e as gotículas são agora consideradas como partículas de fluido finito da fase dispersa. Uma vez que as bolhas ou as gotículas podem se deformar livremente dentro da fase contínua, elas podem assumir diferentes formas geométricas: esféricas, elípticas, distorcidas, toroidais e assim por diante. Além dos fluxos dispersos, os escoamentos gás-líquido geralmente apresentam outras estruturas interfaciais complexas, nomeadamente, fluxos separados e fluxos mistos ou de transição. Os fluxos de transição ou mistos indicam a transição entre os fluxos dispersos e os fluxos separados, que é obviamente caracterizada pela presença de ambos os fluxos. A mudança de estruturas interfaciais ocorre através da presença de interações bolhas-bolhas devido à coalescência e ruptura e qualquer processo de mudança de fase prevalecente.

- **ESCOAMENTO LÍQUIDO-SÓLIDO** - Os escoamentos líquido-sólido consistem no transporte de partículas sólidas em um escoamento líquido. Esse fluxo também podem ser categorizados como fluxos dispersos em que o líquido representa a fase contínua. Em comparação com os escoamentos gás-partículas, as fases líquida e sólida são principalmente impulsionadas por e respondem em grande parte como gradientes de pressão, uma vez que a relação de densidade entre as fases é normalmente baixa e o arrasto entre as fases é significativamente alto. A preocupação significativa é o comportamento de sedimentação de partículas sólidas dentro do escoamento do líquido, que é fortemente governado pelo tamanho das partículas da fase dispersa e as condições de fluxo da fase contínua.

- **ESCOAMENTO GÁS-SÓLIDO** - O escoamento gás-sólido, identificados como escoamento de gás-partícula ou de gás-gotículas, dizem respeito ao movimento de sólidos suspensos ou de gotículas em uma fase gasosa. Dependendo do número de partículas, o escoamento gás-sólido pode ser classificados em diluídos ou densos. Quando o número de partículas é relativamente pequena, a influência do escoamento do gás é o efeito dominante. Tais problemas são chamados de escoamento diluído de gás-partículas e são governados predominantemente pelas forças de superfície e de corpo que atuam sobre as partículas.

Para o caso especial de escoamento gás-partículas muito diluídos, as partículas sólidas atuam como traçadores que não contribuem para alterar o fluxo de gás. Quando a quantidade do número de partículas é considerada suficientemente grande, o movimento das partículas sólidas agora é controlado por interações partícula-partícula. Classificado como fluxos densos de gás-partículas, as colisões que existem entre as partículas sólidas influenciam significativamente o movimento dessas partículas na fase gasosa.

Em domínios fechados, o movimento das partículas sólida após o impacto nas

paredes da fronteira, é diferente quando comparado ao vôo livre de partículas sólidas no ar, é afetado pelas características da superfície e pelas propriedades do material. Os escoamentos de partículas de gás podem ser referidos como fluxos dispersos em que as partículas sólidas constituem a fase dispersa e o gás constitui a fase contínua. O escoamento gás-sólido apresenta alguns padrões de fluxo Figura 2.3, esses dependem das propriedades e das características do material (tamanho de partícula, distribuição de tamanho, forma, dureza e densidade).

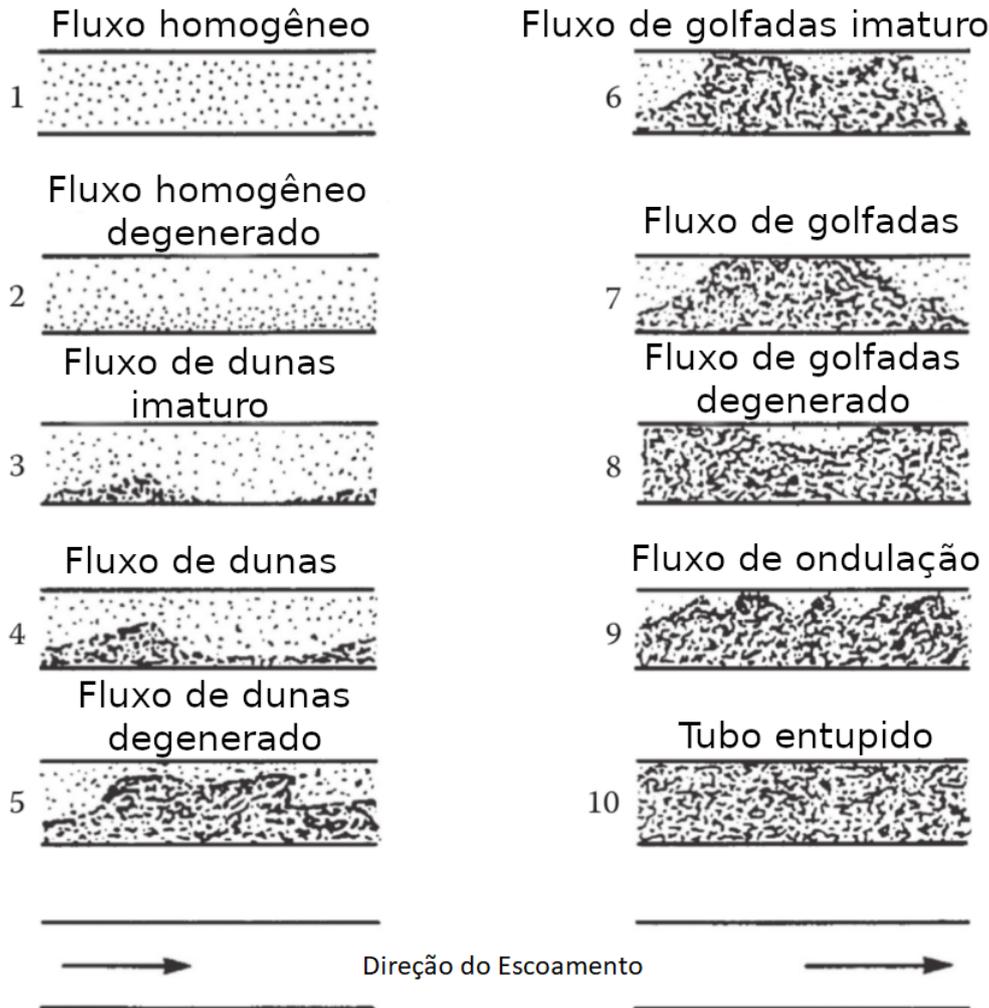


Figura 2.3: Padrões de escoamento Gás-Sólido
 Fonte: Adaptado de MICHEALIDES et al. (2015)

O estudo do escoamentos gás-partícula podem ser aplicados em uma vasta quantidade de problemas, tanto em estudo envolvendo o meio ambiente como no desenvolvimento tecnológico.

Em aplicações que envolvem o meio ambiente, o escoamento gás-partícula tem sido muito aplicado a problemas ambientais de poluição envolvendo partículas associados a atmosfera e a hidrosfera. Como por exemplo a análise do efeito de altas concentrações de rejeitos sólidos dispersos em efluentes, prever a dispersão de polu-

entes, fornecendo os meios necessários para entender os fenômenos de fluxo natural de dispersão poluentes de partículas e fornecendo soluções efetivas para reduzir as altas concentrações a níveis aceitáveis. Uma outra aplicação que vem sendo estudada com essa abordagem é o efeito de um ataque químicos e biológico com o uso de aerossóis e gotículas como partículas migratórias no ar; esse incidente trágico, tem várias consequências desastrosas que afetam a população humana e o meio ambiente.

As aplicações do escoamento gás-partícula para fins tecnológicos envolvem uma ampla aplicabilidade de situações e dizem respeito ao projeto e controle de vários processos multifásicos. Segundo YEOH e TU (2010), existe uma crescente demanda para resolver os diferentes tipos de fluxos gás-partícula através da aplicação de modelos de escoamento multifásico, no qual podemos citar sistemas de controle de poeiras e controle de poluentes de partículas e gases de escape, combustão em fornos e motores diesel envolvendo mistura de reagentes de partículas sólidas ou aerossóis e ar, separação de partículas de efluentes e de secagem; Estudos de leitos fluidizados que também estão conectados com sistemas de conversão de energia geralmente envolvem muitos processos químicos, incluindo a gasificação, combustão e liquefação do carvão; o estudo da remoção de partículas de efluentes industriais usando um projeto de ciclone; essa abordagem também pode ser aplicada a sistemas de secador de sementes, como o leito de jorro entre outras aplicações.

O escoamento gás-partícula pode ser dividido em duas classes de fluxos: fluxos de gás-sólido e fluxo gás-gotículas, tendo como a principal divergência entre essas classes a transferência de massa, na qual não acontece no escoamento gás-sólido e ocorre no escoamento gás-gotícula, acarretando assim, alguns fenômenos com outras considerações e importância tecnológica.

A ocorrência de fluxo em duas fases de ar e aerossóis sob a forma de partículas de poeira ou gotículas líquidas dispersas, exemplifica a distinção entre os fluxos gás-sólido e gás-gotículas na natureza. Para o caso de partículas de poeira que flui juntamente com o ar, estes aerossóis são normalmente transportados pela fase gasosa. Como um fluxo gás-sólido, os aerossóis apenas atuam como traçadores ou contaminantes passivos que não contribuem para alterar o fluxo do líquido contínuo. Para o caso de gotículas líquidas dispersas que co-flutuam com o ar, estes aerossóis na fase gasosa podem, no entanto, sofrer transferência de massa por evaporação ou condensação sob condições térmicas adequadas. Tais aerossóis também podem mudar de tamanho e forma dinamicamente devido à possível fusão no fluxo de massa ou ruptura durante o impacto na parede. Neste tipo de escoamento, o fluxo da fase contínua do ar pode ser significativamente afetado devido à transferência de massa e calor entre as duas fases. (YEOH e TU (2010))

O modelo numérico ideal para a fase particulada, seria aquele que resolveria as propriedades dinâmicas e térmicas de cada partícula do sistema. No entanto,

milhões de partículas são usadas nos mais diversos processos industriais, o que torna essa abordagem inviável na tecnologia de hoje. Em vez de rastrear cada partícula individual, é usada a abordagem de conjunto de partículas, na qual as propriedades “em massa” são identificadas e interpretadas em termos de mistura, reações químicas e outros processos.

Existem basicamente três abordagens para a simulação numérica de um conjunto de partículas, como mostrado na Figura 2.4. No Método dos Elementos Discretos (DEM), Figura 2.4(a), o movimento de cada partícula é analisado incorporando as forças dinâmicas dos fluidos, as forças de contato e os momentos devido às partículas vizinhas. O círculo aberto na Figura 2.4(a) representa um elemento discreto na nuvem. Resolver as equações de movimento para todos os elementos no campo produz as propriedades do conjunto de partículas. Obviamente, um grande número de partículas discretas seria necessário para representar um conjunto de partículas típica. Outro método é identificar uma parcela de partículas (círculos abertos na Figura 2.4(b)) que se movem pelo campo. As propriedades dinâmicas (tamanho, velocidade, taxa de rotação, etc.) de cada partícula na parcela são as mesmas, portanto a parcela é representada por uma partícula computacional. Resolver as propriedades das partículas computacionais à medida que elas se movem pelo campo fornece as propriedades locais da nuvem. Esse método é chamado de Método de Parcela Discreta. A terceira abordagem é o modelo de dois fluidos (TF), as propriedades das partículas são consideradas contínuas como as de um fluido. Na Figura 2.4(c) está representando o esquema desta abordagem. Equações de conservação diferencial são escritas para cada elemento no campo, discretizadas e a solução do resultado de um conjunto de equações algébricas fornece as propriedades do conjunto. (CROWE et al., (2012))

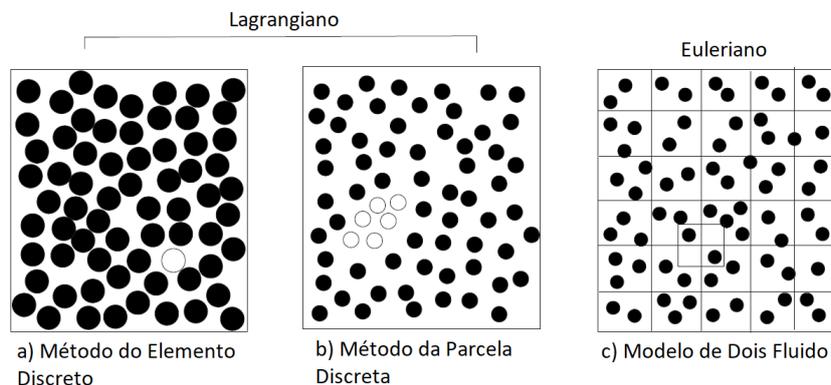


Figura 2.4: Abordagens para a resolução de problemas com partículas
 Fonte: CROWE et al. (2012)

Os métodos acima mencionados podem ser categorizados em duas classes, a abordagem Lagrangiano e a abordagem Euleriana. A primeira é usada nos modelos

do elemento discreto e no método de parcela discretos, onde partículas individuais ou parcelas de partículas são rastreadas através do campo e as propriedades locais do conjunto são determinadas pelas propriedades da partícula ou parcela à medida que passam pelo ponto no campo. A abordagem de dois fluidos, em que o conjunto de equações de conservação algébricas é resolvido simultaneamente para cada nó no campo, é a abordagem euleriana. O presente trabalho focou apenas nas abordagens lagrangianas.

2.3.1 Característica da Fase Discreta

Tempo de Resposta

O tempo de resposta em que uma partícula ou gota sente uma alteração na velocidade do escoamento ou em uma mudança de temperatura é de grande importância para a estimação de parâmetros que caracterizam o escoamento. Segundo CROWE et al. (2012), o tempo de resposta do momento (τ_V) refere-se ao tempo necessário para uma partícula ou gotícula responder a uma mudança na velocidade e é dado pela equação:

$$\tau_V = \frac{\rho_d D^2}{18\mu_c} \quad (2.1)$$

onde ρ_d é a densidade da partícula, D é o diâmetro da partícula e μ_c a viscosidade dinâmica do fluido.

Ainda segundo CROWE et al. (2012), o tempo de resposta térmica (τ_T) refere-se à capacidade de resposta de uma partícula ou gotícula a mudanças na temperatura no fluido transportador, a equação do tempo de resposta térmica é:

$$\tau_T = \frac{\rho_d C_d D^2}{12\kappa'_c} \quad (2.2)$$

onde C_d é o calor específico da partícula e κ'_c é a condutividade térmica da fase contínua.

Número de Stokes

O número de Stokes é um parâmetro muito importante nos fluxos de partículas de fluidos. O número de Stokes relacionado à velocidade da partícula é definido como

$$St_V = \frac{\tau_V}{\tau_F} \quad (2.3)$$

onde τ_F é o tempo característico do escoamento.

Este número adimensional determina o equilíbrio cinético das partículas com o gás circundante. Para o número Stokes pequeno ($St \ll 1$), as partículas podem ser consideradas em equilíbrio de velocidade próxima com o fluido transportador. No caso mais simples, pode-se considerar com segurança as partículas como contaminantes passivos e lidar com um problema de acoplamento unidirecional. Dado um fluxo turbulento, o comportamento de dispersão de partículas discretas transportadas é então previsto. Para o número de Stokes grande ($St \gg 1$), as partículas não estão mais em equilíbrio com a fase de fluido circundante e eles desviam bastante substancialmente do caminho da corrente de fluido, levando a uma transferência significativa do momento da partícula para o fluido. Aqui, o efeito de inércia das partículas torna-se mais prevalente e exerce uma influência significativa no fluxo de fundo. Encontra-se um problema de acoplamento de duas vias: a turbulência modifica o comportamento das partículas que, em troca, modifica a turbulência do fluido. A parte de retorno pode ser vista como a consequência de uma micro-turbulência produzida por gradientes extras em torno das partículas. (YEOH e TU, 2010)

Escoamento Diluído e Denso

O escoamento diluído da fase particulada é aquele que o movimento da partícula é controlada pelas forças do fluido, ou seja, as forças de arraste e de sustentação. Já o escoamento denso, é aquele no qual as colisões e contato contínuo são os responsáveis pelo movimento da partícula.

Pode-se estimar a natureza do escoamento realizando uma comparação entre o tempo de resposta do momento da partícula com o tempo entre colisões através de uma razão entre elas. Portanto, para um escoamento ser considerado diluído, tem-se que:

$$\frac{\tau_V}{\tau_C} < 1 \quad (2.4)$$

onde τ_C é o tempo médio entre colisões partícula-partícula, e é dado pela equação $\tau_C = \frac{1}{n\pi D^2 v_r}$. Para valores menores que 1, as partículas têm tempo suficiente para responder às forças dinâmicas dos fluidos locais antes da próxima colisão. Por outro lado, se tem:

$$\frac{\tau_V}{\tau_C} > 1 \quad (2.5)$$

então a partícula não tem tempo para responder às forças dinâmicas do fluido antes

da próxima colisão e o fluxo é denso.

A ordem de grandeza da fração volumétrica das partículas fornece um indicador geral para fluxos diluídos ou densos, como sugerido na Figura 2.5.

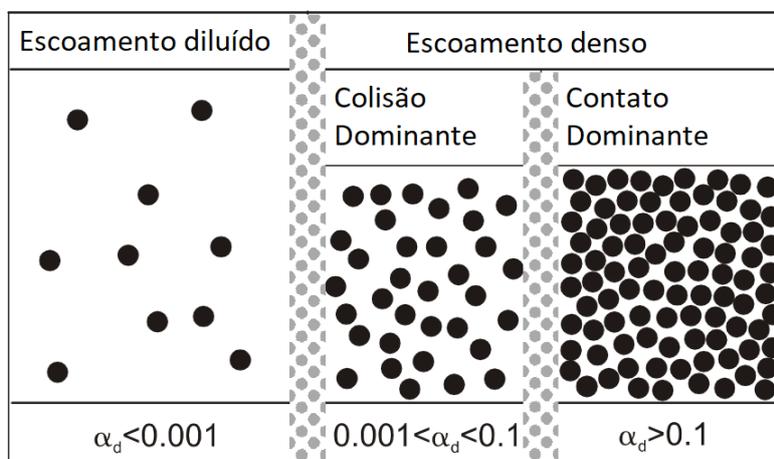


Figura 2.5: Regimes de escoamento.

Fonte: CROWE et al. (2012)

A região de fluxo denso é separada em regimes dominados por colisão e dominados por contato. Um fluxo dominado por colisão é um fluxo no qual as partículas colidem e se recuperam com uma trajetória diferente. O tempo durante o contato é pequeno comparado com o tempo entre as colisões. Um fluxo dominado por contato é aquele em que as partículas estão em contato contínuo e as forças de contato são responsáveis pelo movimento das partículas. Para as frações de volume de partícula 0,001 ou menor, o fluxo pode ser considerado como diluído. Um exemplo de fluxo diluído seria o fluxo de partículas gasosas em um precipitador eletrostático ou em um separador ciclônico. O exemplo clássico de um fluxo dominado por colisão é um leito fluidizado no qual as partículas são suspensas pelo fluido e colidem umas com as outras e com as paredes do vaso. A fração de volume de partículas para um fluxo dominado por colisão pode estar entre as frações de volume de partícula de 0,001 a 0,1. O limite para um fluxo dominado por contato seria um fluxo granular como o fluxo de partículas por gravidade em uma calha. No entanto, o transporte pneumático de fase densa também é um fluxo dominado por contato. A fração de volume de partículas, neste caso, pode ser 0,1 ou maior. Naturalmente, os campos de fluxo podem incluir regiões de todos os três tipos de fluxo. (CROWE et al., 2012).

Mecanismo de Acoplamento Entre as Fases

Uma compreensão que tem uma grande importância em estudos de escoamento multifásicos é o mecanismo de acoplamento entre as fases. Se o escoamento da

fase continua afeta o escoamento da fase dispersa, enquanto que o reverso não ocorre, teremos um acoplamento de uma via. Caso ocorra um efeito mútuo entre as fases durante o escoamento, o mecanismo desse fluxo será o acoplamento de duas vias. Se além das fases influenciarem o comportamento entre elas, ocorre colisões entre as partículas, na qual se uma partícula A influenciar uma partícula B, então, reciprocamente, a partícula B deve influenciar a partícula A, por ação e reação, teremos um mecanismo de acoplamento de quatro vias. Um resumo foi apresentado a seguir.

- Acoplamento de uma via: fluido \mapsto partícula
- Acoplamento de duas vias: fluido \Leftrightarrow partícula
- Acoplamento de duas vias: fluido \Leftrightarrow partícula + colisão entre partículas

O acoplamento pode ocorrer através da transferência de massa, momento e energia entre as fases. Segundo CROWE et al. (2012), o acoplamento de massa é a adição de massa através da evaporação ou a remoção de massa da corrente de transporte por condensação; O acoplamento de momento é o resultado da força de arrasto na fase dispersa e contínua, enquanto que o acoplamento de energia ocorre através da transferência de calor entre as fases. A energia térmica e cinética também pode ser transferida entre fases devido à transferência de massa.

Uma maneira útil de determinar qual é o acoplamento que deve ser usado no estudo de problemas particulados é usar o mapa proposto de modulação de partículas e turbulências, que é mostrado na Figura 2.6

2.3.2 Modelagem Lagrangiana

Segundo SNIDER et al. (1997), o método de partículas em células (PIC) tem sido utilizado desde a década de 1960. Os fluidos são representados por pontos de massa discretos. As equações diferenciais de conservação de massa, momento e energia governam o escoamento, embora a conservação da massa seja satisfeita pela soma dos pontos de massa em um elemento computacional. Os termos não transacionais são calculados a partir das equações diferenciais e os termos de transporte são calculados a partir de pontos de massa que se movem por um procedimento de ponderação de velocidade. A motivação inicial para os métodos PIC foi provavelmente a precisão nas interfaces. No entanto, o cálculo da convecção é muito preciso devido à natureza Lagrangiana do método PIC. Esse método oferece a promessa de resolução de sub-malhas daquelas propriedades que não são atualizadas na malha. O'ROURKE e AMSDEN (1983), apresentaram um modelo de partículas em células aplicadas a um fluxo quimicamente reativo. As propriedades das partículas

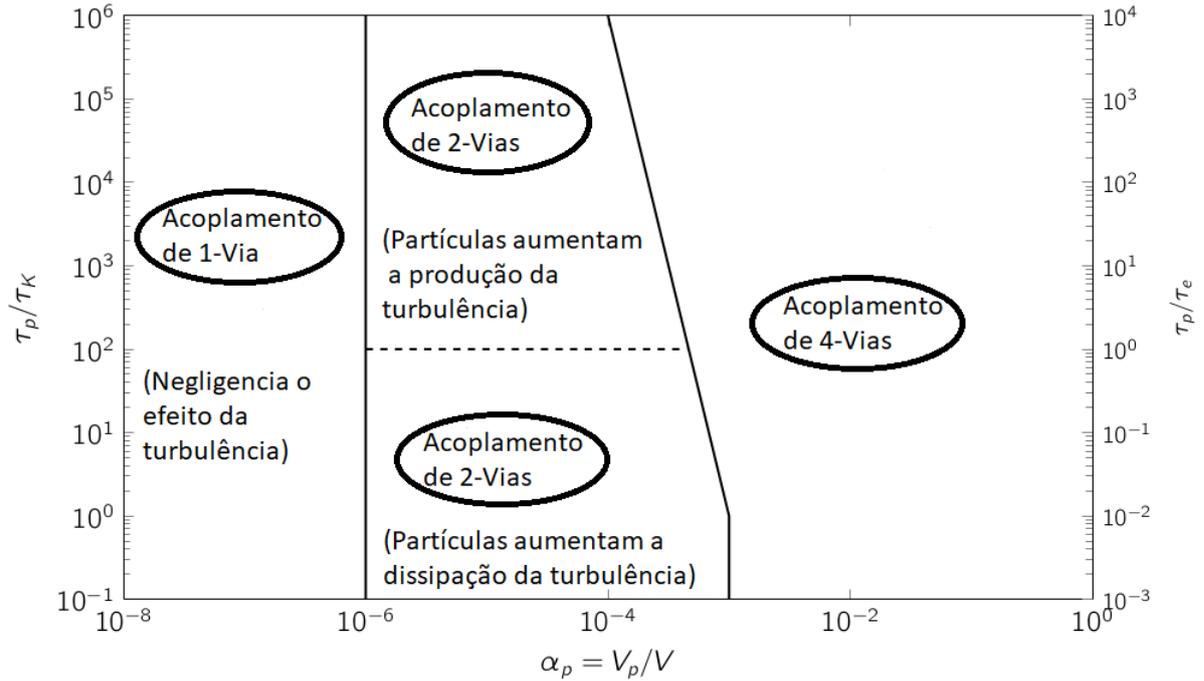


Figura 2.6: Mapa dos mecanismos de acoplamento.
 Fonte: Adaptado de KASPER (2017)

foram interpoladas para a malha, e as interações de campo de fluxo e partículas foram calculadas na malha em um passo de tempo futuro. As propriedades foram então interpoladas de volta para as partículas. O cálculo das interações de partículas na malha aumentou a eficiência computacional sem aumento significativo no erro numérico. O'ROURKE e AMSDEN (1996) estenderam o esquema PIC para um método multifásico de partículas na célula (MP-PIC) para o fluxo unidimensional de Eulerian-Lagrangian. No método, as partículas são tratadas tanto como partículas quanto como um continuum. O gradiente de tensão de partículas, que é difícil de calcular para cada partícula em fluxo denso, é calculado como um gradiente na malha e é então interpolado para partículas discretas. SNIDER et al. (1997) modificaram o método para ser bidimensional, com um método melhorado de interpolação de malha para partículas.

A equação de continuidade para o fluido, desprezando a transferência de massa na interface é:

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_f \mathbf{u}_f) \quad (2.6)$$

onde u_f é a velocidade do fluido e θ_f é a fração de volume do fluido.

A equação de momento para o fluido é:

$$\frac{\partial \alpha_f \mathbf{u}_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \mathbf{u}_f \mathbf{u}_f) = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P - \frac{1}{\rho_f} \mathbf{F} + \alpha_f \mathbf{g} \quad (2.7)$$

onde ρ_f é a densidade do fluido, p é a pressão do fluido e \mathbf{g} é a aceleração da gravidade. \mathbf{F} é a taxa de troca de momento por volume entre as fases fluida e partícula. A fase fluida é incompressível e as fases fluida e partícula são isotérmicas. A equação de momento apresentada aqui negligencia a difusão molecular viscosa no fluido mas retém o arrasto viscoso entre partículas e fluido através da força de arrasto interfacial, \mathbf{F} . Segundo SNIDER et al. (1997), os termos viscosos do fluido laminar geralmente tem efeito negligenciável no fluxo de partículas densas, e termos laminares podem ser facilmente incluído no conjunto de equações de fluidos. Para o fluxo turbulento mais interessante, atualmente não há modelos adequados para o fluxo de partículas densas. As partículas de grande densidade e tamanho atuam como grandes redemoinhos de transferência de momento, enquanto o fluxo de gás em torno de partículas de pacote fechado produz pequenos redemoinhos de sub-grade e dissipação. Além disso, a transferência de momento nas paredes é complicada por partículas que cobrem paredes com tamanhos de partículas na mesma ordem ou maiores do que a subcamada viscosa. Este documento não aborda o fluxo de partículas densas turbulentas. No entanto, a partícula discreta para transferência de momento fluido (que é um modelo de fechamento turbulento para transferência de momento entre partículas e fluido) geralmente produz baixos números de Reynolds (com base no diâmetro das partículas) e fornece uma excelente previsão de fluxos de partículas densas em uma ampla gama de fluxo de gás.

A dinâmica da fase particulada é descrita usando a função de distribuição de probabilidade de partículas $\phi(\mathbf{x}, \mathbf{u}_p, \rho_p, \Omega_p, t)$, onde \mathbf{x} é a posição da partícula, \mathbf{u}_p é a velocidade da partícula, ρ_p é a densidade da partícula e Ω_p é o volume de partículas. Presentemente, assume-se que a massa de cada partícula é constante no tempo (sem transferência de massa entre as partículas ou para o fluido), mas as partículas podem ter uma gama de tamanhos e densidades. A evolução temporal de ϕ é obtida resolvendo-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}_p) + \nabla \mathbf{u}_p \cdot (\phi \mathbf{A}) = 0 \quad (2.8)$$

onde $\nabla \mathbf{u}_p$ é o operador de divergência em relação à velocidade. A aceleração discreta de partículas (\mathbf{A}) é:

$$\mathbf{A} = \sum F \quad (2.9)$$

onde somatório de F representam as forças que atuam na partícula como a aceleração devido a arrasto aerodinâmico, gradiente de pressão, gravidade e o gradiente de tensão inter-particular, entre outras.

SNIDER et al. (1997) afirmam que as propriedades das partículas são interpoladas de e para a grade euleriana no esquema MP-PIC. As propriedades do operador de interpolação são definidas, que são tanto local quanto globalmente conservadoras no mapeamento para e da grade. Este estudo usa uma grade escalonada onde as propriedades de momento são calculadas em faces de células e as propriedades escalares são calculadas em centros de células. Ambas as propriedades de partículas escalares e de momento são necessárias. A equação de continuidade e a equação de pressão são calculadas nos centros de células. A transferência de momento entre as partículas e o gás é calculada nas superfícies das células. Isso requer quatro conjuntos de operadores de interpolação em três dimensões. As propriedades escalares, nos centros de células, são mapeadas com um conjunto de funções de interpolação. As propriedades do momento, nos centros de face, são mapeadas com três outros conjuntos. Os operadores têm a mesma definição, mas possuem suporte diferente no eixo de interpolação.

Capítulo 3

Metodologia

Com a finalidade de avaliar o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro e apresentar a modelagem que melhor a representa, em parceria com o LEB (Laboratório de Engenharia Bioquímica) da Universidade Federal de Campina Grande, coordenado pela professora Dra. Líbia de Sousa Conrado Oliveira, realizou-se o experimento para a obtenção da curva característica de um protótipo de leito de jorro cônico, maiores detalhes da realização dos experimentos, bem como os equipamentos utilizados estão apresentados na seção 3.1. Enquanto que na seção 3.2 é apresentado toda a modelagem matemática utilizada para reproduzir o comportamento do leito de jorro computacionalmente.

3.1 Abordagem Experimental

Na presente seção, estão apresentados os procedimentos experimentais para a obtenção das propriedades físicas de interesse do estudo do material utilizado, bem como, a descrição detalhada dos equipamentos utilizados e o procedimento realizado para a obtenção da curva característica.

3.1.1 Caracterização das partículas

Para a obtenção da curva característica do leito de jorro, que será utilizada para validar a modelagem numérica, realizou-se uma série de análises com o material inerte feito de poliestireno, visando obter suas propriedades físicas. Foram utilizadas algumas abordagens experimentais, como na obtenção da densidade e massa da partícula, e para a obtenção da esfericidade e do diâmetro, utilizou-se equações empíricas conhecidas na literatura. A seguir são apresentadas as metodologias utilizadas na obtenção dessas propriedades.

Massa (m_p)

Determinou-se a massa da partícula pesando uma quantidade conhecida em uma balança analítica (previamente tarada) e posteriormente dividiu-se a massa pesada pela quantidade de partículas usadas. Realizou-se esse procedimento em triplicada e com três amostras diferentes.

Densidade (ρ_p)

A densidade das partículas (ρ_p) foi determinada pelo método de picnometria líquida. Nessa técnica, metade do volume do picnômetro (previamente calibrado) foi preenchida com as partículas. O picnômetro contendo a amostra foi então preenchido com água. Assim, por meio de um balanço de massa no sistema, que leva em consideração a massa de líquido e de partículas adicionado ao picnômetro juntamente com a massa específica dos líquidos, é possível obter a massa específica das partículas por meio da relação abaixo:

$$\rho_p = \frac{m}{v_p - v_l} \quad (3.1)$$

onde, m é a massa de partículas adicionada ao picnômetro; v_p é o volume do picnômetro; v_l é o volume de líquido adicionado ao picnômetro.

Diâmetro (d_{pe})

Observou-se que uma grande parte do material inerte utilizado apresentava um formato cilíndrico. Portanto, estimou-se o diâmetro da partícula pelo diâmetro volumétrico, isto é, o diâmetro de uma esfera de volume igual ao volume da partícula, volume esse que foi estimado pela média de trinta amostras. O volume da partícula foi estimado pela equação de volume de um cilindro, cuja suas dimensões são mostradas na Figura 3.1.

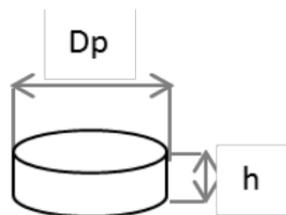


Figura 3.1: Esquema do diâmetro da partícula.
Fonte: Marques, 2013.

Estimou-se o diâmetro volumétrico pela seguinte relação (Equação 3.4):

$$V_{esfera} = V_{particula} \quad (3.2)$$

$$\frac{\pi d_{pe}^3}{6} = \frac{\pi D_p^2 h}{4} \quad (3.3)$$

$$d_{pe}^3 = \frac{3D_p^2 h}{2} \quad (3.4)$$

Esfericidade (ϕ_p)

A esfericidade das partículas de inerte foram calculadas pela equação empírica (Equação 3.5) apresentada por CREMASCO (2014).

$$\phi_p = \left(\frac{b^2}{ac} \right)^{1/3} \quad (3.5)$$

onde b, a e c são a espessura, largura e altura da partícula, como apresentado na Figura 3.2.

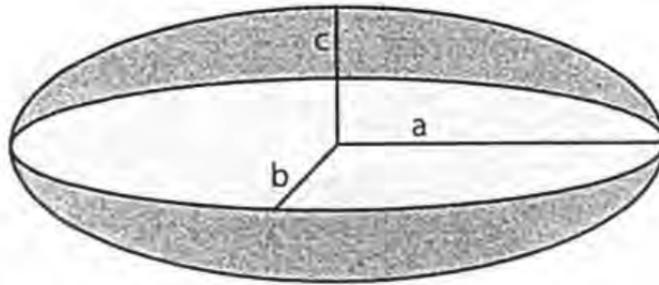


Figura 3.2: Esquema da esfericidade.

Fonte: Cremasco, 2014

Aplicou-se o calculo da esfericidade para uma amostra de 30 partículas.

3.1.2 Unidade Experimental

O aparato experimental, leito de jorro, pode ser dividido em quatro equipamentos distintos, a câmara de secagem, onde ocorre a interação gás-partículas, o sistema de impulsão, que é o equipamento que proporciona o escoamento do ar nas tubulações até chegar na câmara de secagem, e o medidores de pressão e de velocidade que

fizeram a leitura dos dados durante o processo. O medidor de velocidade é da marca Instrutherm, enquanto que o manômetro é da marca Phywe, modelo Cobra 4.

Leito de Jorro

O leito de jorro, no qual foi realizado o experimento esta mostrado na Figura 3.3. O equipamento é formado por uma coluna cilíndrica de diâmetro interno de 146 mm e uma altura de 470 mm. A coluna é acoplada a uma base de formato cônico, com um ângulo interno de $84,9^\circ$, a parede do cone tem comprimento de 80 mm. Na parte inferior do cone existe mais uma coluna cilíndrica de 100 mm de comprimento e diâmetro de 37,4 mm. A saída da câmara ocorre em um duto cilindro na parte superior, cujo diâmetro é de 30,1 mm, que se conecta a um ciclone, esse tem o objetivo de separar o material que foi secado da corrente do ar. Toda a câmara é feito de aço inoxidável, e na parte cilíndrica possui visores em acrílico, no qual é usado para o acompanhamento visual do processo. Na entrada e ao longo da coluna cilíndrica existe orifícios para tomadas de temperatura e pressão.



Figura 3.3: Leito de Jorro.

Sistema de Impulsão

O sistema de impulsão do leito de jorro consiste de um compressor rotatório, modelo S100, marca EBERLE com potência de 4Hp, que impulsiona o ar ao longo de uma tubulação em que estão acopladas duas resistências tipo espiral, com potência total igual a 1.750 Watts. Na rede de tubulação, existem duas válvulas, uma tipo globo de 1/2 pol. logo após a saída do soprador e outra tipo gaveta próximo à entrada do secador, ambas são utilizadas para controlar a vazão do ar que chega a câmara de secagem. O compressor e toda a rede de tubulação pode ser observado na Figura 3.4.



Figura 3.4: Sistema de impulsão.

Medidas de pressão e velocidade de saída do ar

Realizou-se as medições de pressão usando de um manômetro digital, esse foi posicionado na entrada e no topo do câmara de secagem. Mediu-se a velocidade de saída do ar com o auxílio de um anemômetro digital com sensor tipo hélice, essa medição era realizado na saída inferior do ciclone, enquanto que saída superior estava fechada.

Correção da velocidade na seção de entrada do leito de jorro

Na base do leito de jorro existe um distribuidor de ar (Figura 3.5), que é utilizada para segurar o material inerte e impedir que eles caiam na tubulação do ar quando o leito de jorro estiver inoperante, além de melhorar a distribuição do ar na entrada do equipamento. Essa tela causa uma diminuição da área por onde o ar passaria, aumentando sua velocidade. Portanto, se fez necessário corrigir a velocidade encontrada na entrada do equipamento. Essa correção foi realizada com o

auxílio do *software* ImageJ, possibilitando encontrar a área real da passagem do ar. A velocidade medida e a velocidade real são mostradas na Tabela 4.2

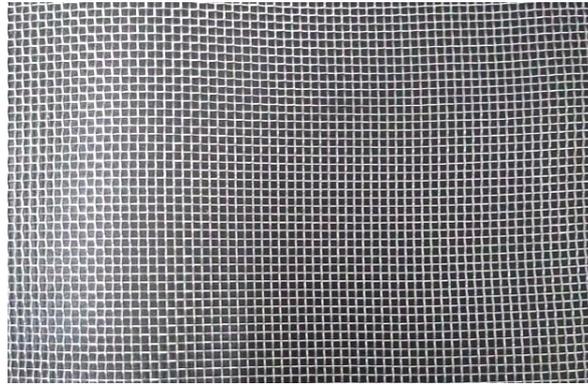


Figura 3.5: Tela presente na base do leito de jorro.

3.1.3 Procedimento Experimental

O procedimento realizado na obtenção da curva característica do leito de jorro, consistiu em encher a câmara de secagem com 700 g de partículas, procurando deixar o empacotamento o mais uniforme possível. Posteriormente, acionou-se o soprador, e foi abrindo-se a válvula do tipo gaveta, de forma a aumentar a vazão do ar que chega no leito. As medições das pressões foram realizadas a cada incremento de 1 m/s na velocidade de saída do ciclone até que as partículas fossem arrastadas para fora do equipamento. Foram realizadas medições na base e no topo da câmara de secagem para determinar a queda de pressão causada pelo leito. Ao atingir a vazão máxima de operação, iniciou o processo de fechamento da válvula para se obter a curva característica da redução da velocidade. A periodicidade e os locais de medições foram a mesma da curva com o aumento da velocidade.

3.2 Abordagem Teórica

A finalidade desta secção é apresentar todas as etapas que foram realizadas para a obtenção dos resultados numéricos do presente trabalho. Na Figura 3.6 está representado um fluxograma com as principais etapas contendo a definição do problema, pré-processamento, processamento(*solver*) e pós-processamento, como discutido e apresentado no Seção 2 do Capítulo 2.

3.2.1 Definição do Problema

O presente trabalho se propõe a analisar duas diferentes metodologias de tratamento de partícula na abordagem lagrangiana, identificando qual das duas que

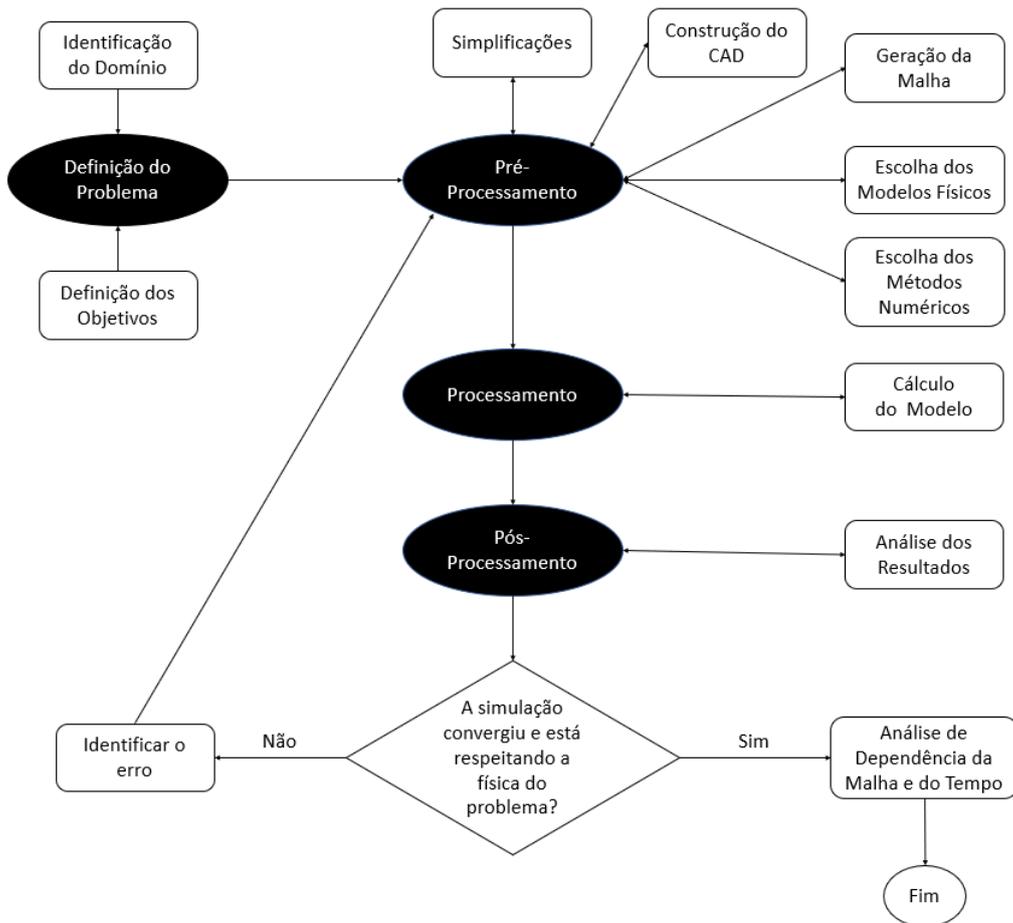


Figura 3.6: Esquema da metodologia numérica

melhor se adapta na resolução de problemas para um leito de jorro. Para tanto, tomou-se como base o aparato experimental adotado no de trabalho de XU et al. (2016), esse que esta apresentado na Figura 3.7.

Com o modelo validado e representando bem a fluidodinâmica das fases (ar e partículas) no interior do equipamento, o modelo definido, foi aplicado na reprodução da curva característica obtida nos experimentos realizados no LEB, podendo assim ajustar alguns parâmetros de difícil obtenção.

Realizou-se esse estudo da fluidodinâmica do leito de jorro empregando o software OpenFOAM®, um programa gratuito e de código aberto. O computador utilizado para efetuar a resolução numérica possui um processador Intel core i7 de 2,50 GHz com 16 GB de memória RAM, com placa de vídeo GeForce 930M de 4GB e sistema operacional Linux.

3.2.2 Domínio de Estudo

A geometria do leito de jorro retangular utilizado por XU et al. (2016) e do leito de jorro convencional utilizado na análise experimental no LEB, foram criadas

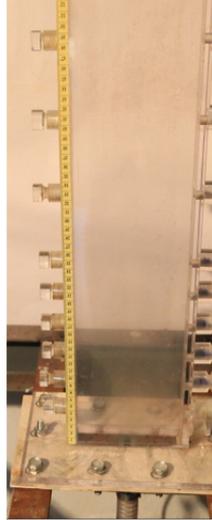


Figura 3.7: Aparato experimental.
 Fonte: XU et al. (2016)

empregado o *software* Salome Meca 2018, uma ferramenta francesa, também gratuita e de código aberto. Na Figura 3.8 está representada ambas geometrias, com suas respectivas dimensões.

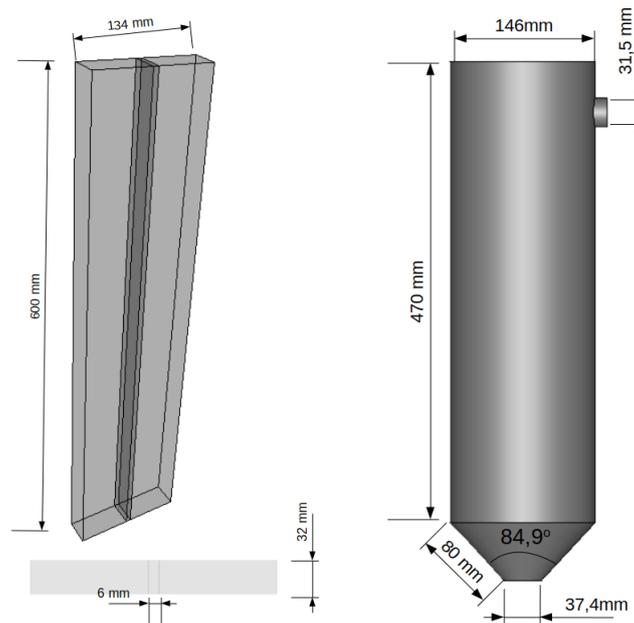


Figura 3.8: Geometrias CAD.

Como pode ser observado na Figura 3.8, o leito de jorro retangular possui uma altura de 600 mm, com 134 mm de comprimento e 32 mm de espessura. A seção de entrada do ar está localizada no centro do equipamento, com largura de 6 mm. Construiu-se a geometria utilizando o conceito de blocagem, onde consiste em dividir o domínio de estudo em blocos, facilitando assim a geração de malhas hexaédricas. Para o leito de jorro convencional, as dimensões foram apresentadas no Tópico 1.2

do Capítulo 3. Nessa geometria, não foi utilizada o conceito de blocagem, devido a geometria apresentar uma maior dificuldade para realizar esse procedimento e o Salome não conter ferramentas que auxiliem essa tarefa.

3.2.3 Domínio Computacional: Malha

A malha do domínio de estudo do aparato experimental de Xu et al. (2016) também foi gerada no software Salome Meca 2018, enquanto que a malha do aparato experimental do LEB foi construída no software cfMesh, uma ferramenta que também é gratuito e de código fonte aberto. Devido ao sistema de blocagem utilizado no leito de jorro retangular gerou-se uma malha hexaédrica conforme apresentado na Figura 3.9(a). Para o leito de jorro convencional, o uso do cfMesh foi motivado justamente por utilizar o conceito de malha cartesiana, onde o código de geração introduz o maior número possível de elementos hexaédricos, e nas regiões onde não se é possível, introduz elementos tetraédricos, o resultado da malha esta apresentado na Figura 3.9(b).

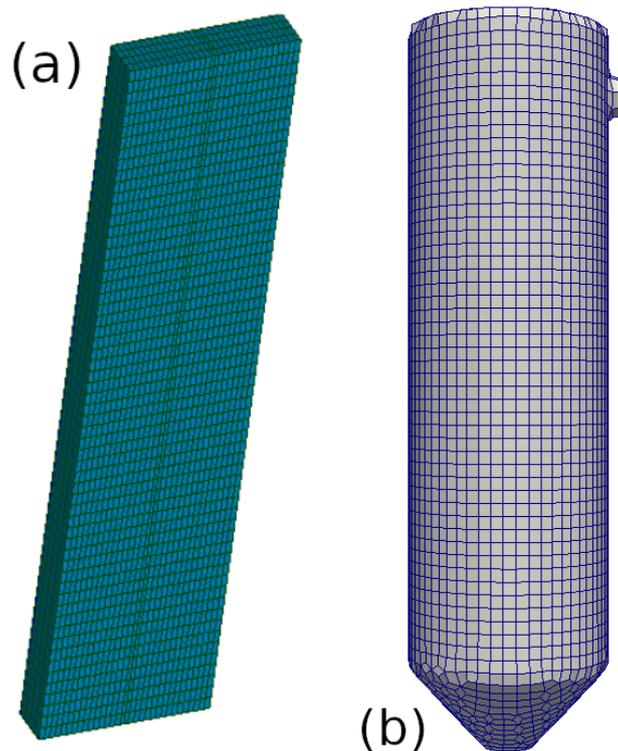


Figura 3.9: Malha computacional.

Nas simulações numéricas em CFD que envolve o tratamento lagrangiano, o tamanho da malha tem uma grande influência nos resultados das simulações, tendo ela que ser pequena o suficiente para ter acurácia, e em contrapartida, tem que ser grande o suficiente para garantir uma boa variação temporal e espacial das frações

das partículas sólidas. Com o objetivo de comprovar que a malha não está influenciando nos resultados, utilizou-se a metodologia convergência de malha, onde criaram-se quatro malhas com diferentes refinamentos para o leito de jorro retangular, como apresentadas na Tabela 3.1

Tabela 3.1: Tamanho dos elementos.

Malha	Tamanho dos Elementos [m]	Número de Elementos	Número de Nós
Malha 1	0,02	900	1488
Malha 2	0,01	7680	10065
Malha 3	0,008	17640	21371
Malha 4	0,007	26880	31347

3.2.4 Modelagem Matemática

Com base na abordagem Euleriana-Lagrangiana e nas características particulares de um escoamento gás-partícula, na modelagem do leito de jorro foram adotadas as seguintes considerações:

- Regime transiente com o número de Courant máximo fixo em 0.5;
- Partículas esféricas;
- Escoamento multifásico composto por uma fase contínua e uma fase discreta;
- Transporte de quantidade de movimento tridimensional (x , y e z), com as seguintes contribuições para cada uma das fases envolvidas: taxa de acúmulo de quantidade de movimento por mecanismo convectivo, gradiente de pressão no escoamento, transferência de quantidade de movimento pelo mecanismo molecular, força de campo gravitacional, transferência de momento entre as fases;
 - O ar foi considerado um fluido incompressível;
 - Escoamento turbulento da fase gasosa (Modelo $\kappa - \varepsilon$);
 - A temperatura é desprezada;
 - Sem reação química.

A partir dessas considerações apresentadas para a simulação, as equações governantes da fase gasosa representada pelo modelo euleriano e as equações governantes da fase particulada, na qual se faz o uso de modelos lagrangianos (MP-PIC e DPM), bem como o modelo responsável pela turbulência, $\kappa - \varepsilon$ são mostradas na Tabela 3.2

A Equação T2-1 corresponde a equação da continuidade, e é responsável para realizar o balanço de massa no volume de controle. Como está apresentada, nos diz que a massa da fase fluida que entra no volume de controle menos a massa

Tabela 3.2: Equações governantes.

Equações Governantes			
1. Equação da Continuidade			
(a)	Fase Fluida	$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f)}{\partial t} + \nabla(\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) = 0$	(T2-1)
2. Equação da Momento			
(a)	Fase Fluida	$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f)}{\partial t} + \nabla(\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f \mathbf{u}_f) = -\alpha_f \nabla P + \nabla \cdot (\alpha_f \boldsymbol{\tau}) + \alpha_f \rho_f \mathbf{g} + \mathbf{F}$	(T2-2)
(b)	MP-PIC	$\frac{Du_p}{Dt} = \beta(u_f - u_p) - \frac{\nabla P}{\rho_p} - \frac{\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_p}{\theta p \rho_p} + g$	(T2-3)
(c)	DPM	$m_p \frac{Du_p}{Dt} = \frac{V_p \beta}{1 - \alpha_c} (u_f - u_p) + m_p g \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_p}\right) + F_C$	(T2-4)
3. Equação da Turbulência			
	κ	$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \nabla(\rho \kappa \mathbf{u}) = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \nabla \kappa \right) + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon$	(T2-5)
	ε	$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \varepsilon \mathbf{u}) = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa}$	(T2-6)

fluida que sai dele, é igual a massa fluida que acumula, pois as partículas não sofrem evaporação e nem absorção da fase gasosa. Nesta situação não se resolve a equação da continuidade para a fase particulada.

Os modelos matemáticos representados pelas equações T2-2 a T2-4 da Tabela 3.2 são referentes as equações de momento tanto da fase fluida quanto da fase particulada, onde desse último foram utilizados os modelos MP-PIC e DPM.

A T2-2 é o modelo de conservação de momento da fase fluida. O primeiro termo dessa equação é a parte transiente da quantidade de movimento, o segundo termo é responsável pela transferência de momento devido ao mecanismo de convecção, ∇P calcula as variações de pressão ao longo do domínio computacional, o quarto termo é responsável pela transferência pelo mecanismo de condução, nesse termo é onde o efeito da turbulência é atribuído, o quinto e o sexto termo são o efeito da gravidade na massa fluida e os efeitos que a movimentação das partículas causam no fluido (equações constitutivas), respectivamente.

Na equação de momento da fase particulada MP-PIC (T2-3), o primeiro termo representa o deslocamento da partícula ao longo do tempo, o segundo termo é a aceleração da partícula devido ao arraste, o terceiro termo apresentado é um gradiente de pressão, o quarto termo denota as tensões entre as partículas no volume de controle e o ultimo termo representa a força gravitacional atuando nas partículas.

Na equação T2-4, o primeiro e o segundo termo do modelo DPM também representam, respectivamente, o deslocamento da partícula ao longo do tempo e a aceleração da partícula devido ao arraste. O terceiro termo diz respeito ao efeito da

aceleração da gravidade, enquanto o último termo é responsável pelas demais forças que possam atuar em uma partícula.

As Equações T2-5 e T2-6 corresponde às equações do modelo de turbulência $\kappa-\varepsilon$, a primeira equação é a responsável pela produção de energia cinética turbulenta e a segunda equação calcula a dissipação dessa energia.

O fechamento entre as equações de momento linear e de turbulência é dada pelo cálculo da viscosidade trbulenta dada por:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

onde C_μ corresponde a uma constante igual a 0.09.

Para escoamentos multifásicos são necessárias modelos que comunique ambas as fases, esses são chamados de equações constitutivas, e para o presente trabalho, foi utilizados as equações constitutivas apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Equações constitutivas.

Equações Constitutivas	
4. Força de Arraste	$\vec{F}_{arraste} = \frac{\pi}{8} \rho^f d_p^2 \beta \left(\vec{V}_{ins}^f - \vec{V}_{ins}^p \right) \left \vec{V}_{ins}^f - \vec{V}_{ins}^p \right $
Ergun-WenYu	$\beta = \frac{\mu(1-\varepsilon)}{\varepsilon d_p^2} [150(1-\varepsilon) + 1.75 Re_p], \text{ para } (\varepsilon \leq 0.8) \quad (T3-1)$ $\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\mu(1-\varepsilon)}{d_p^2} \varepsilon^{-2.7} Re_p, \text{ para } (\varepsilon > 0.8)$
5. Força de Sustentação	
Saffman	$\vec{F}_{sustentação} = K_L \mu^f d_p^2 \left(\vec{V}_{ins}^f - \vec{V}_{ins}^p \right) \sqrt{\frac{\rho^f G}{\mu^f}} \quad (T3-2)$
6. Força da Gravidade	$\vec{F}_{gravity} = \rho^p V_p \vec{g} \quad (T3-3)$
7. Gradiente de Pressão	
	$\vec{F}_{pressão} = -\rho^f V_p \frac{D \vec{V}_{ins}^f}{Dt} \quad (T3-4)$

As propriedades físicas do ar e das partículas utilizadas nessa simulação estão disponíveis na Tabela 3.4, e foram recomendadas por XU et al. (2016)

Tabela 3.4: Propriedades físicas da simulação.

Propriedades	Valores
Diâmetro da Partícula, d_p [mm]	2,6
Densidade da Partícula, ρ_p [kg/m ³]	2600
Densidade do Gás, ρ_g [kg/m ³]	1,205
Viscosidade do Gás, μ_g [Pa.s]	$18,1 \times 10^{-6}$
Altura inicial do leito, H_o [mm]	100
Número de Partícula, N	29110
Coefficiente de Restituição, e	0,9
Coefficiente de Fricção (partícula-partícula), μ_p	0,1
Coefficiente de Fricção (partícula-parede), μ_w	0,1
Razão de Poisson, γ	0,3
Modulo de Young, G	3×10^6
Tensão das Partículas	Harris Crighton

3.2.5 Condições Iniciais e de Contorno

As equações governantes são diferenciais parciais, necessitando assim a utilização das condições de contorno e das condições iniciais para poderem ser resolvidas. Portanto, para o leito de jorro retangular, definiu-se as seguintes condições como:

(1) Inicial:

- Velocidade do fluido no interior câmara de secagem é zero;
- Pressão manométrica no interior da câmara é 0;
- Produção de energia cinética turbulenta é 0;
- Dissipação de energia cinética turbulenta 0;
- A viscosidade turbulenta é 0;

(2) Entrada:

- O fluido entra com uma velocidade de 46,9 m/s na direção z;
- O gradiente de pressão é nulo;
- A produção da energia cinética turbulenta é $32.9 \text{ m}^2/\text{s}^2$;
- A dissipação da energia cinética turbulenta é $65316.83 \text{ m}^2/\text{s}^3$;

(3) Saída:

- O gradiente de velocidade é nulo;
- A pressão manométrica é 0;
- O gradiente de κ é nulo;
- O gradiente de ε é nulo;

(4) Parede:

- Não possui deslizamento;
- O gradiente da pressão é nula;
- Função de parede de κ para altos números de Reynolds;
- Função de parede de ε para altos números de Reynolds;
- Função de parede para ν_t em altos números de Reynolds;

Para o leito de jorro cônico, as condições utilizadas foram:

(1) Inicial:

- Velocidade do fluido no interior câmara de secagem é zero;
- Pressão manométrica no interior da câmara é 0;
- Produção de energia cinética turbulenta é 0;
- Dissipação de energia cinética turbulenta 0;
- A viscosidade turbulenta é 0;

(2) Entrada:

- O fluido entra com as velocidades usadas no experimento na direção z ;
- O gradiente de pressão é nulo;
- A produção da energia cinética turbulenta é dada por $\kappa = \frac{2}{3}(U_{ref}T_i)^2$;
- A dissipação da energia cinética turbulenta é dada por $\epsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{\kappa^{3/2}}{0,07L}$;

(3) Saída:

- O gradiente de velocidade é nulo;
- A pressão manométrica é 0;
- O gradiente de κ é nulo;
- O gradiente de ε é nulo;

(4) Parede:

- Não possui deslizamento;
- O gradiente da pressão é nula;
- Função de parede de κ para altos números de Reynolds;
- Função de parede de ε para altos números de Reynolds;
- Função de parede para ν_t em altos números de Reynolds;

3.2.6 Modelagem Numérica

As simulações foram realizadas por meio no OpenFoam. O *software* resolve o conjunto das equações de balanço e equações constitutivas pelo método de volumes

finitos. Tal método, requer o uso de algoritmo de acoplamento pressão-velocidade, de esquema de interpolação aplicado para cada termo das equações, além de apontar os critério de convergência estabelecidos. Como a resolução das equações dependem dos métodos numéricos utilizados, portanto, foram analisados alguns dos métodos mais conhecidos, afim de identificar o que melhor se adequa a modelagem proposta. A Tabela 3.5 apresenta os métodos de discretização para o termo transientes, para o gradiente, para o laplaciano e o divergente das equações utilizadas. Esses métodos auxiliam na transformação das equações parciais em equações algébricas, que serão resolvidas por métodos numéricos, e que no presente trabalho foram analisadas os métodos que também são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Métodos numéricos - Discretização e resolução das matrizes.

Métodos Numéricos	
1. Métodos de Discretização	
(a)	Termos Transiente
	Método Backward Método de CrankNicolson Método CrankNicolson 0.5 Método de Euler
(b)	Gradiente
	Esquema de Diferença Central (CDS)
(c)	Laplaciano
	Esquema de Diferença Central (CDS)
(d)	Divergente
	Esquema Downwind Esquema da Diferença Central (CDS) Esquema Upwind Esquema Minmod Esquema MUSCL Esquema QUICK Esquema SuperBee Esquema VanLeer
2. Método de Resolução da Matriz	
	solver
	GAMG GAMGSim smoothSolver
	p, U, ε , κ
	tolerance relTol
	1e-06 0
	smoother
	GaussSeidel symGaussSeidel

A equação de conservação de Navier Stokes(Equação T2-1) apresenta a pressão

e a velocidade nas três direções como incógnitas a serem encontradas, porém ao decompor vetorialmente essa equação, tem-se quatro variáveis para três equações e portanto necessitamos que a equação da continuidade se comunique com a equação do momento para que o sistema apresente solução, e isso é feito através do algoritmo de acoplamento pressão-velocidade. Nesse trabalho foi utilizado o algoritmo PIMPLE (*Pressure Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), em que consiste obter a solução correta de um problema de transporte de quantidade de movimento quando o campo de pressões introduzido nas equações de Navier-Stokes gerar velocidades que satisfaçam a equação da continuidade. Os parâmetros desse algoritmo são apresentados na Tabela 3.6.

Em solução iterativas de sistema de equações algébricas, as vezes se faz necessário retardar as mudanças dos valores das variáveis de iteração para iteração. Essa abordagem é utilizada para melhorar a convergência de problemas não-lineares, mas também para evitar divergência ao simular com condições iniciais estimadas e que portanto, podem estar longe da solução exata. Segundo Moukalled et al. (2016), um método comumente usado para promover a convergência “desacelerando” as alterações (às vezes excessivas) feitas aos valores da variável durante a solução é o método de relaxamento, no qual consiste em atribuir pesos as variáveis, variando de 0 a 1. Para analisar o efeito desses fatores foram simulados duas situações como o apresentado na Tabela 3.6. Uma situação recomendada pela literatura ($p = 0,6$ e $U = 0,9$) e uma situação com os coeficientes menores ($p = 0,3$ e $0,7$), ou seja, com um maior retardamento.

Tabela 3.6: Métodos Numéricos - Relaxamento e acoplamento pressão-velocidade.

Métodos Numéricos		
3.	Fator de Relaxamento	
(a)	p	0.6 0.3
(b)	U (x,y,z)	0.9 0.7
4.	Acoplamento Pressão-Velocidade	
		nOuterCorrectors 2
		nCorrectors 3
(a)	PIMPLE	momentumPredictor yes
		nNonOrthogonalCorrectors 1
		pRefCell 0
		pRefValue 0

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo, são inicialmente apresentados e discutidos os resultados do experimento realizado para obtenção da curva característica, em seguida os resultados referentes às simulações numéricas empregando a fluidodinâmica computacional.

4.1 Experimental

4.1.1 Caracterização do Inerte

Na Tabela 4.1 estão representados os valores médios da massa, densidade, diâmetro e esfericidade das partículas e os desvios padrão obtidos. Essas propriedades foram usadas na simulação do leito de jorro cônico.

Tabela 4.1: Propriedades físicas das partículas.

Propriedades	Valores Obtidos	Desvio Padrão
Massa da Partícula [g]	0,0204	0,0009
Densidade da Partícula [g ml^{-1}]	0,9512	0,1212
Diâmetro da Partícula [mm]	3,5427	0,2627
Esfericidade	0,3612	0,1336

4.1.2 Obtenção da Curva Característica

Na Tabela 4.2 estão representados os valores das velocidades corrigidas levando-se em consideração o material posicionado na seção de entrada do leito de jorro (Figura 3.5) para reter as partículas no interior do dispositivo quando a velocidade de entrada é nula. Esta tela reduz a área da seção transversal ao escoamento do gás e, assim, aumenta-se o valor da velocidade medida experimentalmente.

Na Tabela 4.3 estão representados os valores médios dos três experimentos realizados ao aumentar gradativamente os valores da velocidade na seção de entrada e,

Tabela 4.2: Velocidade medida e velocidade real.

Velocidade Medida [m/s]	Velocidade Real [m/s]
1	1,75
2	3,51
3	5,26
4	7,02
5	8,77
6	10,53
7	12,28

em seguida, a redução gradual desta velocidade.

Os resultados experimentais indicam que o ar conseguiu vencer a resistência do leito de partículas ao atingir a velocidade média na seção de entrada igual a 10,53 m/s e, assim foi observado a formação da fonte e o jorro das partículas.

Ao diminuir a velocidade na entrada no leito de jorro, a fonte se desfez em 8,77 m/s. São igualmente apresentados na Tabela 4.3 os valores dos desvio padrão para as curvas de crescimento e decrescimento da velocidade do ar.

Tabela 4.3: Médias e desvios padrões do experimento.

Resultados Experimentais					
Aumento de Uz			Diminuição de Uz		
Velocidade [m/s]	ΔP [Pa]	Desvio Padrão	Velocidade [m/s]	ΔP [Pa]	Desvio Padrão
1,75	170	17,3	12,28	110	10
3,51	300	69,3	10,53	143,3	20,8
5,26	436,7	225,9	8,77	223	11,5
7,02	640	55,7	7,02	220	10
8,77	570	50	5,26	210	10
10,53	280	242,7	3,51	326,7	11,5
12,28	126,7	15,3	1,75	176,7	5,8

Ao analisar a Tabela 4.3, observa-se um alto desvio padrão nas velocidades de 5,26 e 10,53 no quadro do aumento da velocidade de entrada, enquanto que o desvio padrão na tabela da diminuição da velocidade estão mais próximas.

Com posse desses dados, foi representado graficamente a curva característica do leito de jorro e ao se comparar com as curvas características reportada na literatura ilustrada na Figura 2.2, observa-se um comportamento semelhante.

Na Figura 4.1 estão representados os valores da queda de pressão em função da velocidade na seção de entrada do leito de jorro apresentados na Tabela 4.3. Observa-se que com o aumento da vazão, observa-se um aumento na queda de pressão até atingir o ΔP_{max} na velocidade de 7,02 m/s, esse aumento da pressão é devido a formação de uma cavidade em decorrência do deslocamento das partículas. Quando a queda pressão atinge seu valor máximo, ela tende a cair com o aumento da velocidade, pois ocorre um deslocamento na altura do leito, diminuindo assim, o grau de

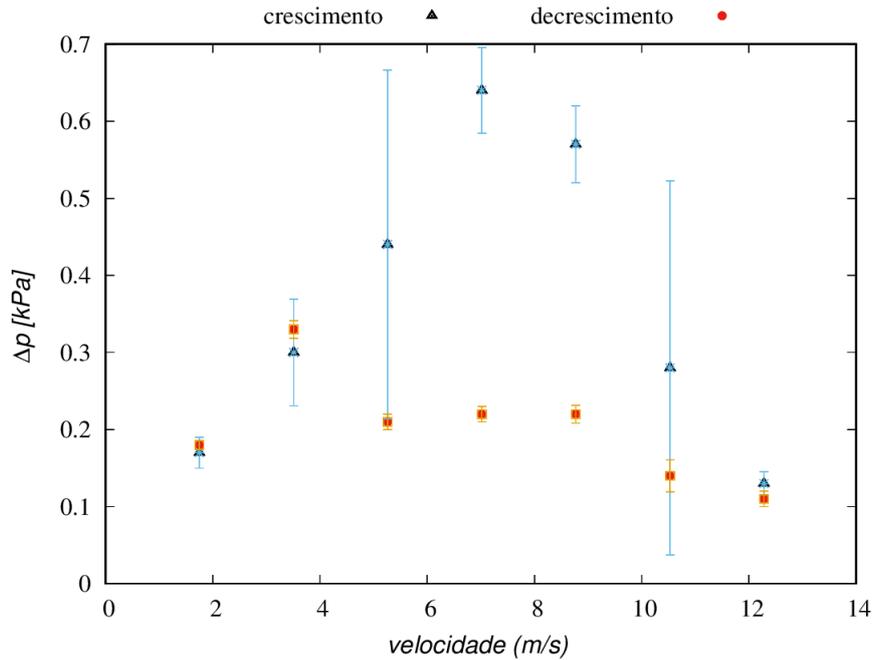


Figura 4.1: Curva característica experimental do leito de jorro cônico

empacotamento das partículas e posteriormente o jorro, onde ocorre a queda brusca na pressão.

No processo inverso, onde se diminui a vazão de ar, a curva atinge valores de queda de pressão bem menores, pois nesse caso a pressão é devido a interação fluido-gás, não havendo ruptura do jato de fluido através do leito.

4.2 Resultados Numérico

4.2.1 Convergência da Malha

As malhas 3 e 4, apresentadas na Tabela 3.1, causaram a divergência durante o processamento dos cálculos. Segundo MULLER et al. (2009), em modelagem lagrangianas, o tamanho da malha não deve ser próximo ao tamanho da partícula e para satisfazer a resolução das equações de momento da fase particulada e do fluido, o tamanho do elemento da malha deve ter o comprimento de aproximadamente 3-4 vezes o diâmetro da partícula, justificando assim, o erro nas maiores malhas. A malha 1 e 2 apresenta a sugestão de MULLER et al. (2009), tendo a simulação foi realizada sem problemas de divergência, e portanto, usou-se o tamanho de elemento da malha de 0,01 m para o estudo do leito de jorro retangular e cônico.

4.2.2 Resíduos

Nos processos numéricos em que a solução é iterativa, é de suma importância ser capaz de determinar quando a solução pode ser considerada boa o suficiente, ou quando o erro pode ser estimado abaixo de uma certa tolerância, ou até mesmo a precisão com que as equações de conservação foram satisfeitas. Portanto, para alguns problemas em que suas variáveis envolvem valores maiores que a casa decimal (velocidade, temperatura e pressão), resíduos abaixo de 10^{-4} já são considerados bons, pois os resíduos, na maioria dos softwares, são calculados pelo métodos dos mínimos quadrados, e quando se atinge essa tolerância, essas grandezas apresentam uma pequena diferença entre iteração atual e a iteração anterior.

Diante do exposto, os resíduos da velocidade, da pressão, do κ e do ε , quando utilizados os modelos de discretização de Euler para o termo temporal, o modelo CDS para o termo divergente e o método de resolução de matriz GAMG, com os fatores de relaxamento para pressão de 0.6 e para velocidade 0.9 são apresentadas na Figura 4.2 para o método do MP-PIC e a Figura 4.3 para o método DPM.

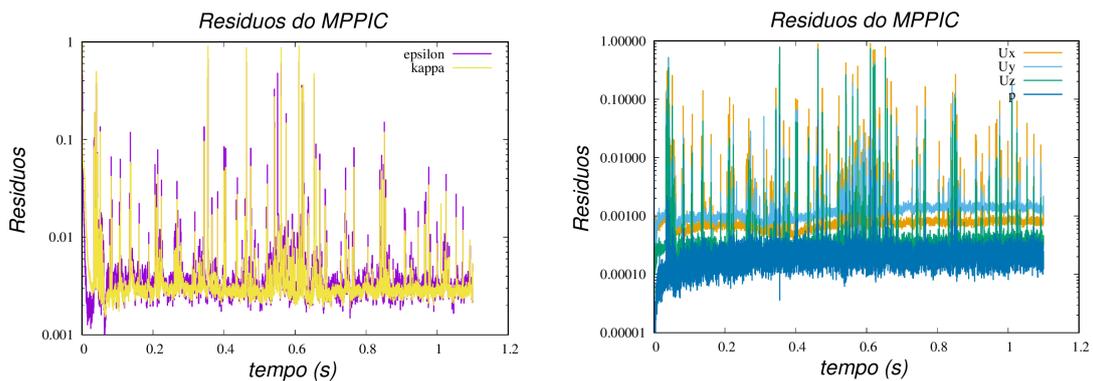


Figura 4.2: Resíduos da simulação do MP-PIC

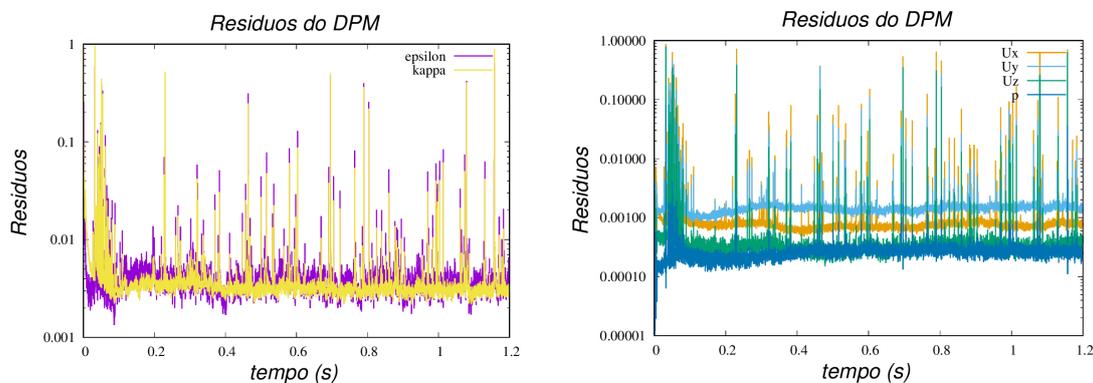


Figura 4.3: Resíduos da simulação do DPM

Uma vez que o problema é tratado de forma transiente, os resíduos devem ser

acompanhados ao longo do tempo, e deve-se garantir que o seus valores fiquem dentro de um erro aceitável, abaixo de 10^{-2} para a turbulência e abaixo de 10^{-4} para U_z e P, portanto, ao se analisar as Figuras 4.2 e 4.3, observa-se que os resíduos do κ e do ε estão variando entre 10^{-2} e 1, valores acima dos consideráveis aceitáveis, enquanto que os resíduos da pressão e da velocidade estão em entre 10^{-4} e 1, também estão acima dos valores aceitáveis.

Em ambos os casos (DPM e MP-PIC), percebe-se alguns picos de altos resíduos. Esses picos levam um erro naquele tempo, e influenciam nos resultados dos tempos subsequentes. O motivo desse comportamento foi o uso de alguns métodos numéricos que não conseguem capturar alguns fenômenos na modelagem, e levam a esse erro. A fim de minimizar esses resíduos, analisou-se os métodos numéricos apresentados nas Tabelas 3.5 e 3.6, encontrando no método de Euler para a discretização do tempo, no método upwind para a discretização do divergente, no método de GAMG para a resolução da matriz e no relaxamento de $p = 0.6$ e $U = 0.9$, os melhores parâmetros para minimizar os resíduos ao longo do tempo. Os novos comportamentos dos resíduos são apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5, para os métodos MP-PIC e DPM, respectivamente.

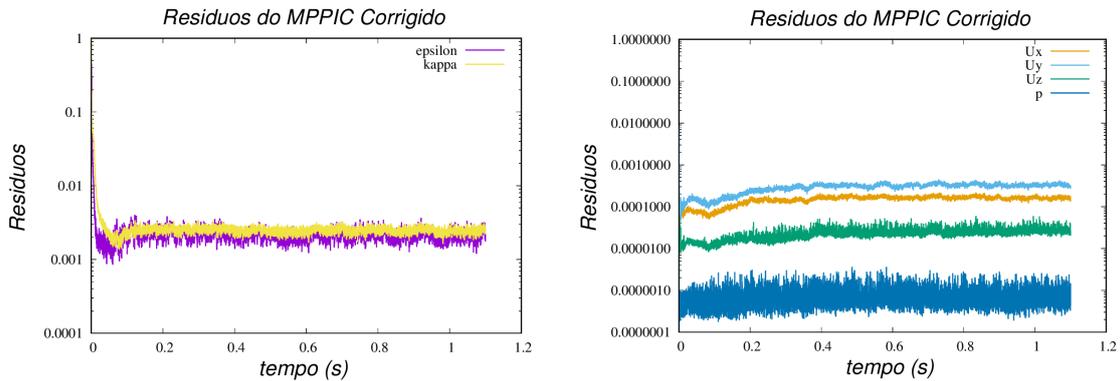


Figura 4.4: Resíduos da simulação do MPP-IC corrigido

Ao se analisar as Figuras 4.4 e 4.5, percebe-se a significativa melhora nos resíduos das simulações e o efeito que os métodos numéricos não adequados podem causar na convergência da simulação.

4.2.3 Avaliação dos Modelos DPM e MP-PIC

Com os métodos numéricos ajustados e com base na modelagem numérica apresentada no Capítulo 3, realizou-se a análise da fluidodinâmica das partículas de um leito de jorro utilizando a abordagem *Discrete Phase Modeling* (DPM) e *Multiphase particle-in-cell* (MP-PIC), ambas presentes no software OpenFOAM. Comparou-se visualmente os resultados obtidos com o experimento e a modelagem em *Discrete*

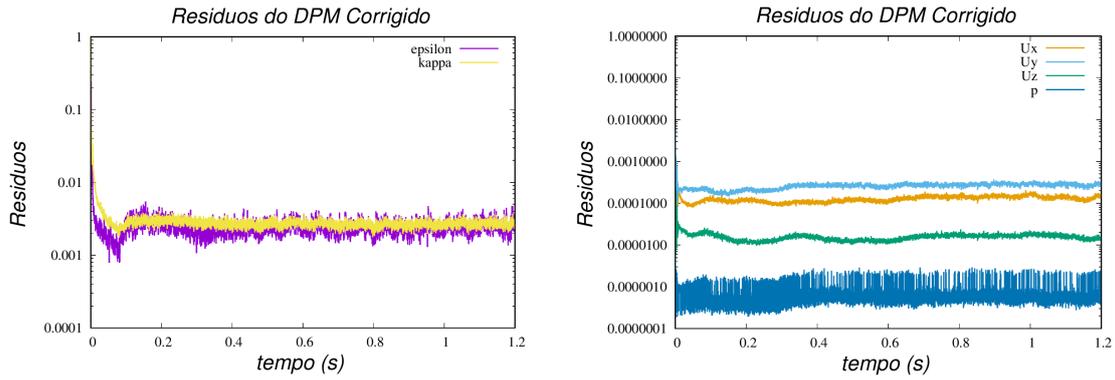


Figura 4.5: Resíduos da simulação do DPM corrigido

Elements Methods (CFD-DEM) realizado por XU et al. (2016). Na Figura 4.6 estão representados o comportamento do leito de jorro obtidos por XU et al. (2016), Figura 4.6(a) e Figura 4.6(b), e os obtidos nas simulações numéricas do presente trabalho usando o método DPM, Figura 4.6(c), e o MP-PIC, Figura 4.6(d).

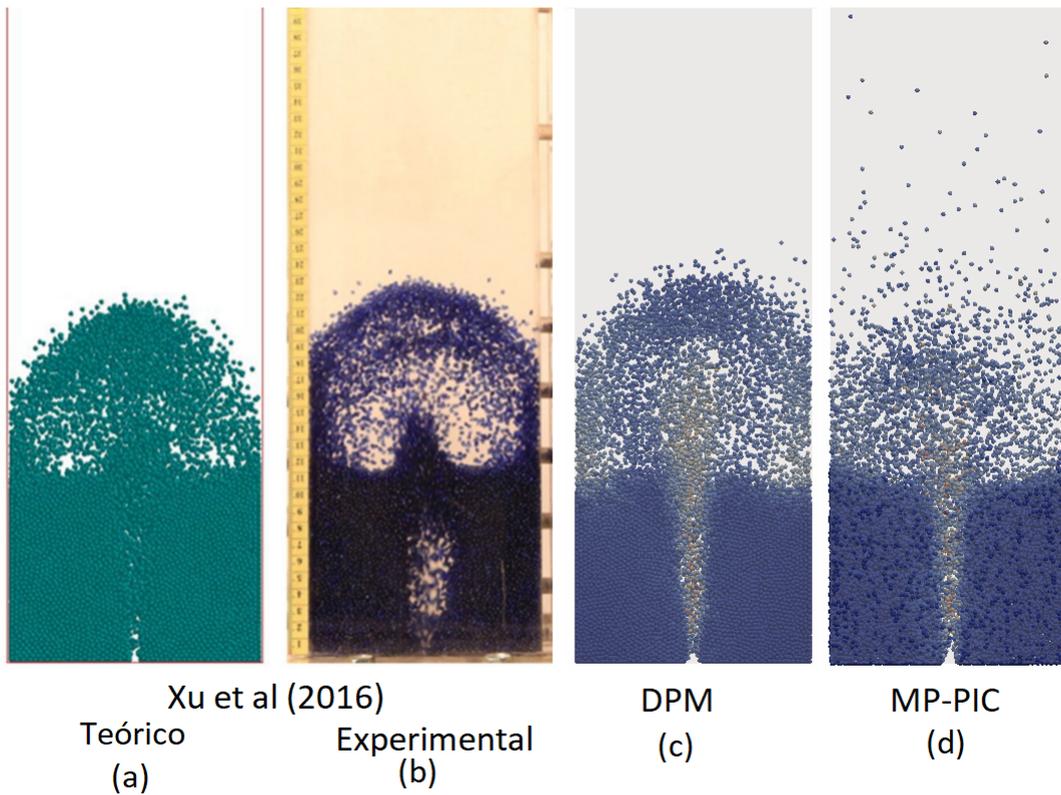


Figura 4.6: Comparativo dos modelos avaliados.

Ao se comparar os resultados das simulações do presente trabalho, Figura 4.6(c) e (d), com o comportamento do leito de jorro obtido experimentalmente por XU et al. (2016), ilustrado na Figura 4.6(b), percebe-se que os resultados empregando o modelo de fase discreta (DPM) apresentou uma nítida formação da região da fonte e foi a que mais se aproximou do comportamento experimental, enquanto que ao uti-

lizar o modelo multifásico de partículas em células, observou-se a formação da fonte de partículas, mas há um espalhamento das partículas logo acima do leito na região da fonte e uma dispersão a uma altura superior ao observado experimentalmente.

Na Figura 4.7 estão representados os gráficos do perfil de concentração de partículas em função da posição radial (x), nas alturas de 60 mm (Figura 4.7(a)) e 140 mm (Figura 4.7(b)).

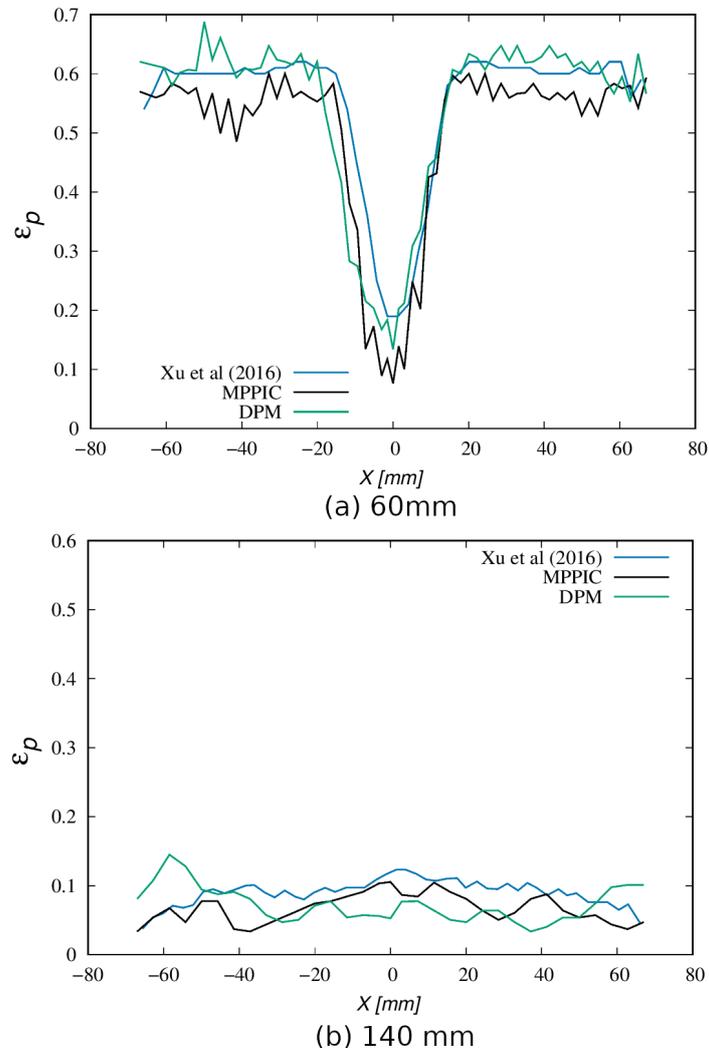


Figura 4.7: Distribuição radial da concentração de partícula

Com base na Figura 4.7, pode-se observar que a distribuição das concentrações das partículas em relação a coordenada x nos modelos de MP-PIC e DPM se assemelham com o comportamento apresentado por XU et al. (2016). Para as curvas apresentadas na altura de 60 mm (Figura 4.7(a)), o modelo DPM representa melhor a região anular, enquanto que o modelo MP-PIC apresenta um comportamento mais próximo na região de jorro. Na altura de 140 mm (Figura 4.7(b)), referente a região do jorro, observa-se valores próximos e comportamento parecidos.

Diante das análises qualitativa e quantitativa realizadas, pode ser concluído que o modelo DPM representou o melhor comportamento das partículas no leito de jorro retangular e, portanto, esse modelo foi o empregado na simulação do leito de jorro cônico.

4.2.4 Leito de Jorro Cônico

Para realizar a simulação do leito de jorro cônico, usou-se o modelo de fase discreta (DPM), com os métodos numéricos que forneceram o melhor comportamento dos resíduos na Seção 4.2.1. Na entrada utilizou-se a velocidade em que o leito jorrou, ou seja, 10,53 m/s e na saída considerou-se a pressão medida no topo do leito (959,2 hPa). Simulou-se por 0.9 segundos e o comportamento das partículas estão representado na Figura 4.8.

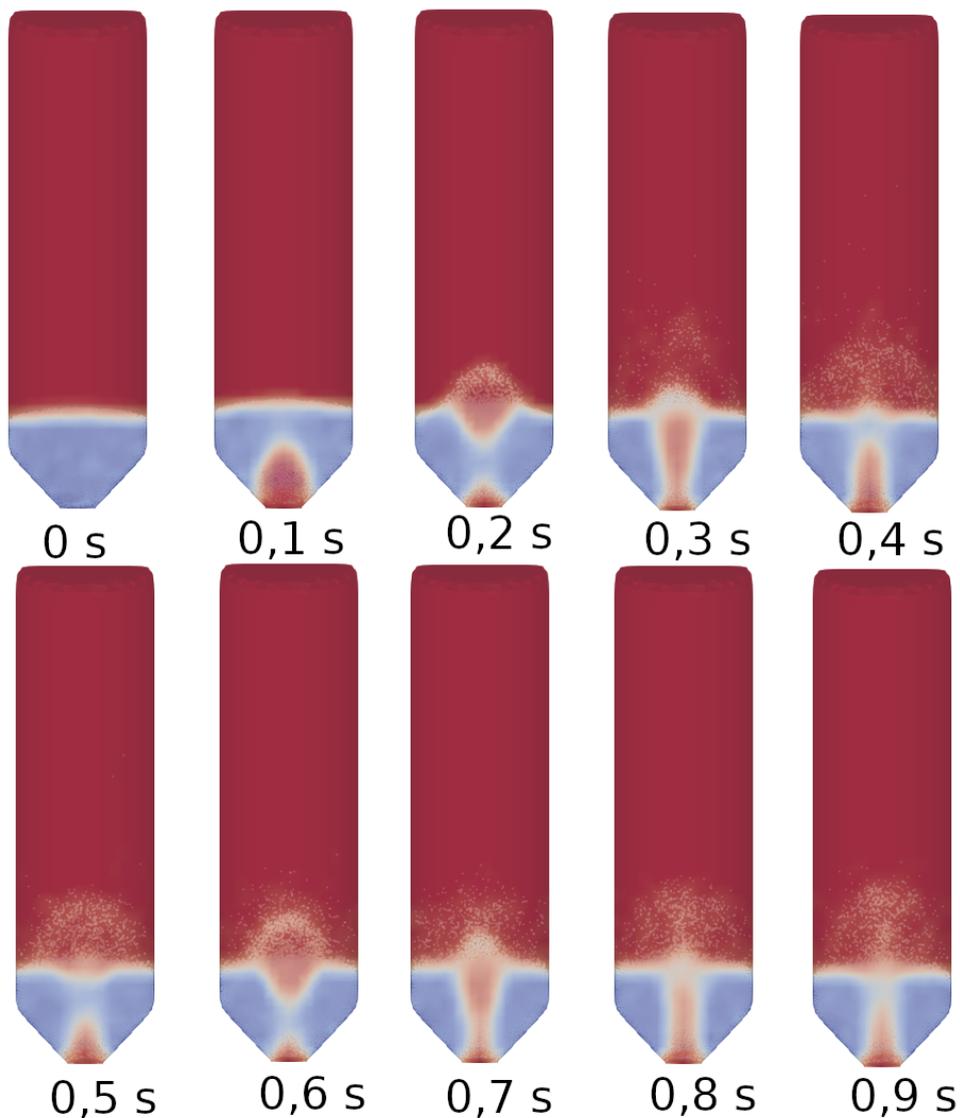


Figura 4.8: Comportamento das partículas no leito de jorro cônico.

Na Figura 4.8, observa-se que durante o escoamento do ar no leito das partículas, em determinados momentos (0,1 e 0,2 segundos) existem a formação de bolsões de ar, tal fenômeno ocorre quando, ao entrar no leito de jorro, o ar desloca as partículas para cima e para os lados, e devido a um aumento de massa na região do ânulo, e pelo formato cônico do leito de jorro, as partículas exercem uma maior dificuldade para ar vencer a barreira formada, fechando a região do jorro, quando as partículas se redistribuem, elas já não exercem tal resistência e o ar forma novamente uma nova fonte, repetindo assim todos esses movimentos ciclicamente.

Na Figura 4.9 está representado a evolução da pressão determinada numericamente na seção de entrada (P_{base}) e no topo do leito de jorro (P_{topo}). Seu perfil oscilante na base pode ser explicado pelo comportamento da corrente de gás no interior do leito de partículas, conduzindo a formação de um padrão de escoamento em golfadas ou pistonado.

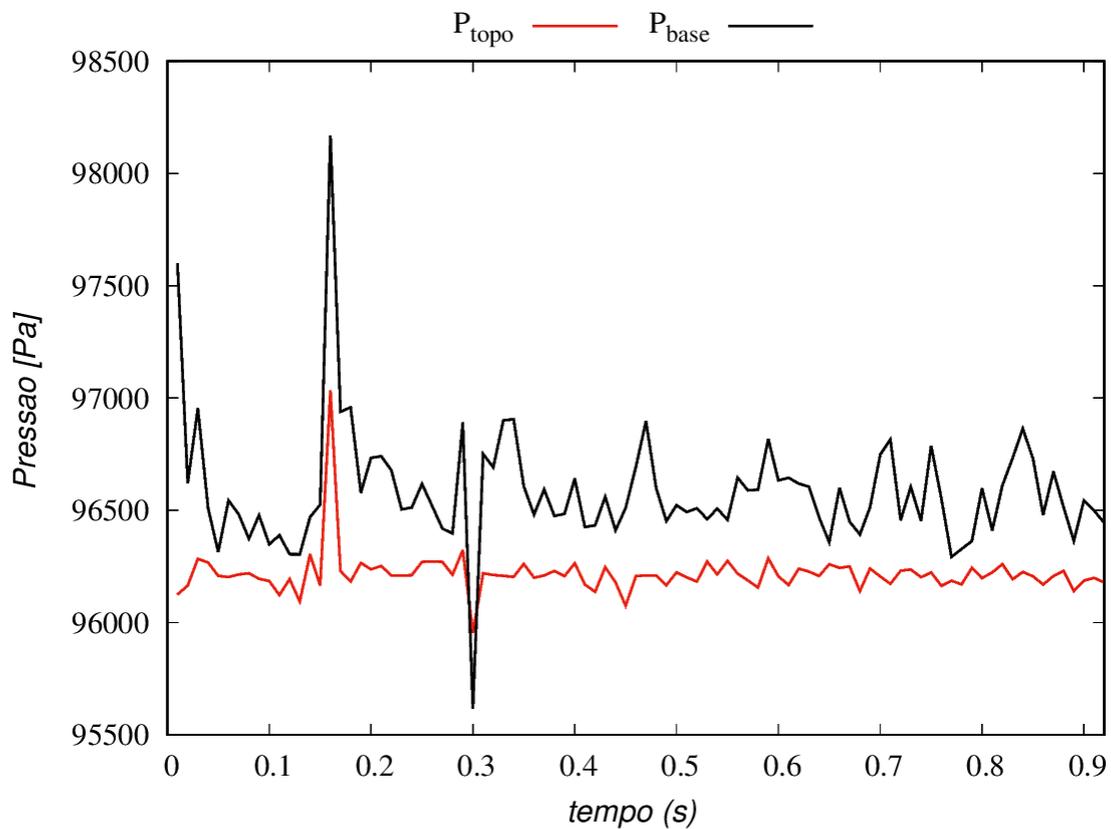


Figura 4.9: Comportamento da pressão no leito de jorro cônico.

Observando a Figura 4.9, percebe-se que devido ao movimento das partículas, no instante 0,3 s se forma um canal ligando a entrada e a região de fonte conduzindo a uma queda de pressão como pode ser observado na Figura 4.9. No instante posterior esse canal é fechado, o que conduziu ao aumento da pressão (Figura 4.9). A partir deste instante, o leito de jorro atingiu seu comportamento estacionário, pois o ciclo

se repete com o comportamento da pressão mais estável até o tempo final avaliado.

Visando comparar a queda de pressão obtida experimentalmente com a queda de pressão determinada com o auxílio da simulação numérica, foi calculado o valor médio temporal da pressão na base e no topo e, em seguida, foi calculado a diferença. Estes valores numéricos e experimentais estão representados nas Tabelas 4.4 a 4.6.

Tabela 4.4: Comparativo das pressões simuladas e medidas para o base.

Velocidade [m/s]	P_{Base} Experimental [kPa]	P_{Base} Simulado [kPa]	Erro [%]
1,75	95,88	95,90	0,02
3,51	96,03	96,07	0,04
5,26	96,19	96,31	0,13
7,02	96,44	96,46	0,02
10,53	96,10	96,50	0,37
12,28	96,06	96,06	0,00

Tabela 4.5: Comparativo das pressões simuladas e medidas para a topo.

Velocidade [m/s]	P_{Topo} Experimental [kPa]	P_{Topo} Simulado [kPa]	Erro [%]
1,75	95,71	95,71	0,02
3,51	95,73	95,74	0,04
5,26	95,75	95,82	0,13
7,02	95,80	95,91	0,02
10,53	95,88	96,20	0,34
12,28	95,93	95,93	0,00

Tabela 4.6: Comparativo da variação de pressão simulada e medida.

Velocidade [m/s]	ΔP Experimental [kPa]	ΔP Simulado [kPa]	Erro [%]
1,75	0,17	0,19	11,35
3,51	0,30	0,33	8,67
5,26	0,44	0,49	13,08
7,02	0,64	0,55	13,42
10,53	0,28	0,31	11,4
12,28	0,13	0,12	2,50

Comparou-se os resultados das quedas de pressão obtidas através das simulações das diferentes velocidades com o gráfico da curva crescente. Essa comparação está apresentada na Figura 4.10

Ao observar a Figura 4.10, observa-se que os resultados encontrados indicam um bom acordo com os valores experimentais obtidos. A queda de pressão para as velocidades 7,02 e 8,77 apresentaram uma distância maior que as demais velocidades.

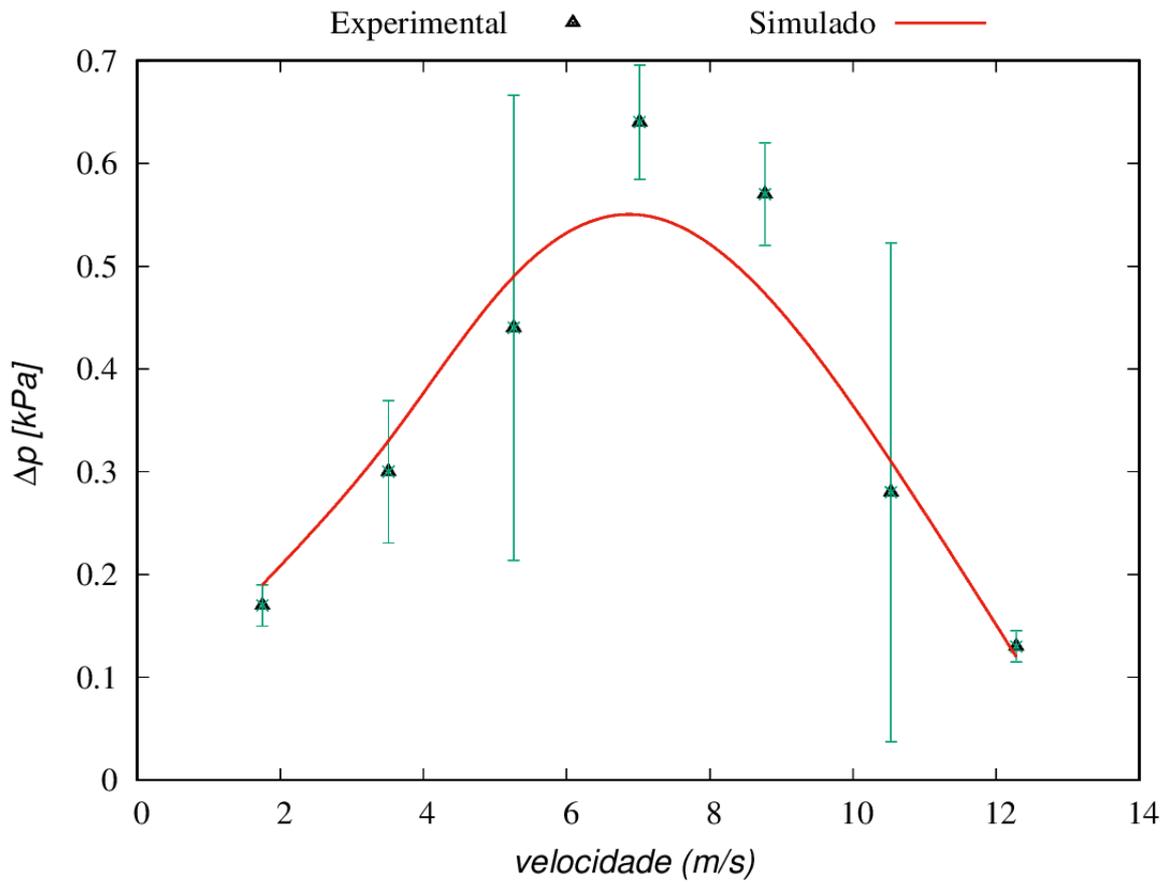


Figura 4.10: Comparação da queda de pressão experimental e simulado.

Essas velocidade (7,02 e 8,77,) representam o momento em que ocorre a maior queda de pressão, ou seja, na iminência da formação jorro, e portanto uma momento que ocorre a compressão da partículas e uma instabilidade muito alta, em que qualquer aumento de pressão, acarreta a formação da fonte, acarretando a queda brusca da pressão. Fenômenos esses que o modelo não conseguiu capturar bem.

Capítulo 5

Conclusões

A cerca dos resultados obtidos, conclui-se que o modelo de transferência de momento acoplado com modelo lagrangiano DPM se ajustou melhor que o modelo MP-PIC na reprodução no caso do leito de jorro retangular.

O modelo da fase discreta (DPM) possibilitou representar o comportamento do leito de jorro observado experimentalmente.

O leito de jorro cônico apresentou um padrão de escoamento tipo golfadas que proporcionou uma variação da pressão em função do tempo na seção de entrada e no topo do leito de partículas.

A comparação entre os resultados da pressão no topo e na seção de entrada determinados a partir da simulação numérica e os dados obtidos experimentalmente apresentaram baixa discrepância. Enquanto, que na diferença de pressão o modelo se ajustou bem, apresentando quatro pontos com um erro maior que os demais.

Referências Bibliográficas

COUTINHO, P. L. A. *Secagem de soja em leito de jorro.*, Tese de doutorado, UFRJ, 1983

CREMASCO, M. A. *Operações unitárias em sistemas particulados e fluido-mecânicos*, EDGARD BLUCHER, 2014

CROWE, C. T and SCHWARZKOPF, J. D. and SOMMERFELD, M. and TSUJI, Y. *Multiphase Flows with Droplets and Particles*, CRC Press, 2012

CONCEIÇÃO FILHO, R. S. *Recobrimento de sementes de soja com fertilizantes em leito de Jorro.*, Dissertação de mestrado, UFU, 1997

DUARTE, C. R. *Uso de Modelo de Balanço Populacional no Estudo de Inoculação de Sementes de Soja em Leito de Jorro*, Tese de doutorado, UFU, 2002

KASPER, R. *Particle Simulation with Open-Foam*, 2017 [http : //www.foamacademy.com/wp - content/uploads/2016/11/GOFUN2017_particleSimulations_slides.pdf](http://www.foamacademy.com/wp-content/uploads/2016/11/GOFUN2017_particleSimulations_slides.pdf)

MALALASEKERA, W. and VERSTEEG, H. K. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, PEARSON Education, 2007.

MARQUES, I. I. D. R. *Investigação do leito de jorro como reator em potencial de pirolise de partículas cartonadas*, Dissertação de mestrado, UFES, 2013

MATHUR, K. and EPSTEIN, N. *Spouted Beds*, Academic Press, 1974.

MELO, J. L. Z. *Análise do leito de jorro como sistema de contato para pirólise de composto PEBD/AL*, Dissertação de mestrado, UFES, 2014.

MICHAELIDES, E. E and CROWE, C. T. and SCHWARZKOPF J. D. *Multiphase Flow Handbook*, CRC Press, 2015

MOUKALLED, F. and MANGANI, L. and DARWISH, M. *The finite volume method in computational fluid dynamics: An advanced introduction with Open-FOAM and Matlab*, Springer, 2016

- MULLER, C.R. and SCOTT, S. A. and HOLLAND, D.J and CLARKE, B.C. and SEDERMAN, A. J. and DENNIS, J.S. and GLADDEN, L. F. *Validation of a discrete element model using magnetic resonance measurements.*, Particuology, Vol. 7, 297-306, 2009
- OLIVEIRA, A.G and SILVA, G. P. and GERALDELLI, W. and ROPELATO, K. *O crescimento do uso de fluidodinâmica computacional (CFD) nas tecnologias de destilação, FCC e coqueamento retardado na engenharia básica de abastecimento da Petrobras*, Relatório Técnico, 2012.
- O'ROURKE, P. J. and AMSDEN, A. A. *On particle-grid interpolation and calculating chemistry in particle-in-cell methods*, J. Comput. Phys., 1983
- O'ROURKE, P. J. and AMSDEN, A. A. *The multiphase particle-in-cell (MP-PIC) method for dense particle flow*, Int. J. Multiphase Flow, 1996
- PATANKAR, S.R. *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- ROCHA, A. P. T. *Estudo do processo de recobrimento contínuo de extratos fitoterápicos secos em leito de jorro* , Tese de doutorado, UFCG, 2006
- SANTOS, D. A and DUARTE, C. R and PETRI JÚNIOR I. *Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica de um leito de jorro operando em fase diluída*, Horizonte Científico, Vol. 9, 1-21 2015
- SANTOS JÚNIOR, S. F. *Secagem de microalgas Scenedesmus acuminatus em leito e jorro: Estudo experimental e de modelagem*, Dissertação de mestrado, UFSC, 2016
- SILVA, A. O.; SANTANA, E.B.; MACÊDO, E.N; COSTA, C; LOURENÇO, R.O. *Estudo do comportamento dinâmico de um leito de jorro convencional via técnica de cfd: avaliação da influência do modelo de arraste na qualidade dos resultados.*, XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2016
- SNIDER, D. M. and O'ROURKE, P. J. and ANDREWS, M. J. *An Incompressible Two-Dimensional Multiphase Particle-in-Cell Model for Dense Particle Flows*, Int. J. Multiphase Flow, 1997
- SOARES, A. C. *Modelagem Numérica da solidificação em moldes: Aplicação a granadas de grande calibre*, Dissertação de mestrado, UFRJ, 2017.
- TU, J. and YEOH, G. H. and LIU, C. *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.

XU, H. and ZHONG, W. and YUAN, Z. and YU, A. *CFD-DEM study on cohesive particles in a spouted bed*, Powder Technology, Vol. 314, 377-386, 2016

YEOH, G. H. and Tu, J. *Computational Techniques for Multi-Phase Flows*, IChemE, 2010

WU, F.; GAO, W.; ZHANG, J.; MA, XIAOXUM.; ZHOU, W. *Numerical analysis of gas-solid flow in a novel spouted bed structure under the longitudinal vortex effects.*, Chemical Engineering Journal, Vol 334, 2105-2114, 2018