

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
VICTOR NASCIMENTO DA SILVA

**ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO OPERANDO COM
SEMENTE DE LINHAÇA UTILIZANDO CFD**

São Bernardo do Campo

2025

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
VICTOR NASCIMENTO DA SILVA

**ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO OPERANDO COM
SEMENTE DE LINHAÇA UTILIZANDO CFD**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Centro
Universitário FEI, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Química. Orientado pela Prof. Dr.
Rodrigo Condotta.

São Bernardo do Campo

2025

Silva, Victor Nascimento da .

Análise da fluidodinâmica em leito de jorro operando com semente de linhaça utilizando CFD / Victor Nascimento da Silva. São Bernardo do Campo, 2025.

84 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Condotta.

1. leito de jorro. 2. CFD. 3. fluidodinâmica computacional. 4. dinâmica de escoamento. 5. linhaça. I. Condotta, Rodrigo, orient. II. Título.



APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Química

Mestrado

PGQ-10

Aluno(a): Victor Nascimento da Silva

Matrícula: 422.106-5

Título do Trabalho: ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO OPERANDO COM SEMENTE DE LINHAÇA UTILIZANDO CFD

Área de Concentração: Engenharia Química

Orientador(a): Prof. Dr. Rodrigo Condotta

Data da realização da defesa: 25/02/2025

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

Trabalho cumpre os requisitos para obtenção do título de Mestre. Aprovado por unanimidade.

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo Condotta

Prof. Dr. Gabriel Angelo

Prof. Dr. Rodrigo Béttega

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Ricardo Belchior Torres

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Condotta, por sua orientação, paciência e apoio constante ao longo desta jornada. Sua sabedoria e conselhos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e profissional.

À minha família, meu sincero agradecimento pelo amor, paciência e encorajamento em todos esses anos de estudos. Aos meus pais, Juracir Manoel da Silva e Maria da Conceição Nascimento da Silva, obrigado por acreditarem em mim e me incentivarem a seguir em frente.

Não poderia deixar de expressar minha gratidão aos meus colegas e amigos de sala, que compartilharam comigo momentos de estudo, dificuldades e conquistas, em especial, ao Mestre Engenheiro Gusthavo Trevisan Silva, que me ajudou no desenvolvimento em toda a parte computacional.

Agradeço também ao Centro Universitário FEI, pela oportunidade de realizar este mestrado e pela infraestrutura e recursos acadêmicos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

“Veni, Vindi, Vici.”

Júlio César

RESUMO

A secagem de sementes é essencial para garantir a preservação e a qualidade dos grãos, uma vez que a elevada umidade presente nas sementes recém-colhidas pode favorecer o desenvolvimento de microrganismos e fungos, comprometendo sua integridade e vida útil. Entre as tecnologias disponíveis, o leito de jorro destaca-se como uma alternativa eficiente para a secagem, devido às altas taxas de transferência de calor e massa promovidas pelo intenso contato fluido-partícula, embora seu uso em larga escala ainda enfrente desafios relacionados ao *scale-up*. Este trabalho avaliou a fluidodinâmica do leito de jorro aplicado à secagem de sementes de linhaça, combinando simulações de Computational Fluid Dynamics (CFD) e experimentos conduzidos em escala laboratorial. Nas simulações, foram utilizados modelos bidimensionais cartesianos não simétricos, focando-se na avaliação da influência da geometria não esférica das sementes de linhaça sobre o comportamento do escoamento. Diversos parâmetros de modelagem foram ajustados, alguns a partir da literatura e outros segundo observações dos perfis de fluidização obtidos experimentalmente. As simulações permitiram prever o comportamento do leito, evidenciando a importância da escolha apropriada do coeficiente de restituição, sendo o valor de 0,90 o que melhor capturou as forças resistivas ao movimento das partículas, conforme validado pela literatura. Embora modelos axissimétricos simplificados tenham sido inicialmente considerados para representar o sistema em caráter exploratório, os resultados indicaram que, devido à geometria irregular das sementes, a aplicação da suposição de simetria radial deve ser feita com cautela. Perturbações fluidodinâmicas e interações multifásicas, resultantes da forma não uniforme das partículas, não são plenamente capturadas sob essa hipótese. Portanto, as simulações CFD utilizando geometria bidimensional cartesiana e configurações de parâmetros apropriadas mostraram-se eficazes para prever o comportamento do leito de jorro na secagem de sementes de linhaça. A pesquisa reforça a importância da validação experimental no desenvolvimento de modelos numéricos robustos, especialmente em sistemas multifásicos compostos por partículas de geometria irregular.

Palavras-chave: leito de jorro; CFD; fluidodinâmica computacional; dinâmica de escoamento; linhaça.

ABSTRACT

Seed drying is essential to ensure the preservation and quality of grains, as the high moisture content present in freshly harvested seeds can promote the development of microorganisms and fungi, compromising their integrity and shelf life. Among the available technologies, the spouted bed stands out as an efficient alternative for drying, due to its high rates of heat and mass transfer promoted by the intense fluid-particle contact, although its large-scale application still faces challenges related to scale-up. This study evaluated the fluid dynamics of a spouted bed applied to flaxseed drying by combining Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations with laboratory-scale experiments. In the simulations, non-symmetric two-dimensional Cartesian models were employed, focusing on assessing the influence of the non-spherical geometry of flaxseeds on the flow behavior. Several modeling parameters were adjusted, some based on values from the literature and others through the fluidization profiles obtained experimentally. The simulations enabled the prediction of bed behavior, highlighting the importance of the appropriate selection of the restitution coefficient, with a value of 0.9 found to best capture the resistive forces against particle movement, as supported by the literature. Although simplified axisymmetric models were initially considered for exploratory purposes, the results indicated that, due to the irregular geometry of the seeds, the assumption of radial symmetry should be applied with caution. Fluid dynamic disturbances and multiphase interactions arising from the non-uniform particle shape are not fully captured under this assumption. Therefore, CFD simulations using two-dimensional Cartesian geometries with properly configured parameters proved to be effective in predicting the behavior of the spouted bed during the flaxseed drying process. This research highlights the importance of experimental validation in the development of robust numerical models, particularly for multiphase systems composed of irregularly shaped particles.

Keywords: Spouted bed; CFD; Computational fluid dynamics; Flow dynamics; Flaxseed.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sementes de linhaça.....	18
Figura 2 - Diagrama de Geldart.....	20
Figura 3 - Estrutura de um leito de Jorro.....	21
Figura 4 - Regimes Fluidodinâmicos de um Leito de Jorro.	23
Figura 5 - Curvas típicas de queda de pressão em função da velocidade.....	24
Figura 6 - Simulação em CFD com sementes de sorgo.....	29
Figura 7 - Contorno da fração volumétrica da (a) areia, (b) casca de coco.....	30
Figura 8 - Descrição das dimensões dos leitos de jorros utilizados: (a) sistema de Artur et al. (2018) e (b) leito piloto.....	47
Figura 9 - Representação de posições axiais analisadas do equipamento estudado.....	48
Figura 10 - Leito de jorro utilizado na parte experimental.....	52
Figura 11 - Fração volumétrica da linhaça estudada em diferentes velocidades para um leito de semente de linhaças com 0,20 m de altura a partir da base.	54
Figura 12 - Fração volumétrica da linhaça em diferentes velocidades do ar para um leito de semente de linhaças com 0,20m de altura a partir da base.	55
Figura 13 - Velocidade da linhaça ao longo do eixo para diferentes malhas	57
Figura 14 - Características da malha utilizada.....	58
Figura 15 - Resultado visual experimental com sementes de linhaça durante a desfluidização do leito de 0,25m de altura estática inicial.	58
Figura 16 - Resultado da simulação experimental com sementes de linhaça utilizando o e_{ss} de 0,50 com H_L de 250mm.	59
Figura 17 - Resultado da simulação experimental com sementes de linhaça utilizando o e_{ss} de 0,90 com H_L de 250mm.	60
Figura 18 - Resultado da simulação experimental com sementes de linhaça utilizando o e_{ss} de 0,50 com H_L de 250mm.	61
Figura 19 - Fração volumétrica da linhaça estudada a velocidade de 4 m/s com H_L de 250mm.	62
Figura 20 - Fração volumétrica da linhaça estudada a velocidade de 4,5 m/s com H_L de 250mm.	62
Figura 21 - Fração volumétrica da linhaça estudada a velocidade de 5 m/s com H_L de 250mm.	63

Figura 22 - Velocidade do ar em três posições de alturas diferentes para um leito com H_L de 250 mm.	64
Figura 23 - Fração volumétrica da linhaça estudada a velocidade de 5 m/s e e_{ss} de 0,90.	65
Figura 24 - Fração volumétrica da linhaça estudada com e_{ss} de 0,90 com H_L de 290mm.	66
Figura 25 – Resultado dos regimes da simulação axissimétrica com sementes de linhaça utilizando o e_{ss} de 0,90 com H_L de 250 mm.	69
Figura 26 - Queda de pressão simulada do leito com semente de linhaça e H_L de 250 mm	72
Figura 27 – Perfil da queda de pressão obtido experimentalmente para o leito 250 mm.	72
Figura 28 – Posição da queda de pressão mensurada.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhamento dos componentes utilizados nos computadores	45
Tabela 2 - Parâmetros e propriedades das fases aplicadas às simulações.	49
Tabela 3 - Modelos e parâmetros utilizados na solução numérica aplicados às simulações para investigar a fluidodinâmica do leito de jorro com sementes de linhaça.	50
Tabela 4 - Critérios desconhecidos.....	56
Tabela 5 - Características das malhas simuladas.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

C_D	Coeficiente de arraste
$C_\mu, C_1, C_2, C_3, C_\beta, C_V$	Coeficientes do modelo de turbulência
d_s	Diâmetro da partícula [m]
D_i	Diâmetro entrada região cônica [m]
D_c	Diâmetro da coluna cilíndrica [m]
$D_{t, sf}, D_s$	Parâmetros do modelo de turbulência
e_{ss}	Coeficiente de restituição
$\vec{F}_q$	Forças de campo [N/m ³]
$\vec{F}_{lift, q}$	Força de ascensão [N/m ³]
$\vec{F}_{vm, q}$	Força de massa virtual [N/m ³]
g	Aceleração gravitacional [m/s ²]
g_0	Função de distribuição radial
H_L	Altura do leito estático [m]
k_{θ_s}	Coeficiente de difusão da temperatura granular
K_{fs}	Coeficiente de troca de momento entre fases [kg/m ³ s]
κ_s	Parâmetros da turbulência da fase sólida [m ² /s ²]
κ_f	Parâmetros da turbulência da fase fluida [m ² /s ²]
p	Pressão [N/m ²]
p_s	Pressão do sólido [N/m ²]
Re_s	Número de Reynolds de partícula
$\vec{v}_q$	Velocidade da fase q [m/s]
$\vec{v}_f$	Velocidade da fase fluida [m/s]
$\vec{v}_s$	Velocidade da fase particulada [m/s]
ΔP	Queda de pressão [Pa]

LETRAS GREGAS

α_f	Fração volumétrica do fluido
α_q	Fração volumétrica da fase q
$\alpha_{s,max}$	Fração volumétrica de sólidos máxima
α_s	Fração volumétrica de sólidos no empacotamento
γ_{θ_s}	Dissipação de energia por efeitos de colisão
ε_f	Dissipação de energia de turbulência na fase fluida [m^2/s^3]
η_{sf}	Parâmetro de turbulência
θ_s	Temperatura granular [m^2/s^2]
λ_s	Viscosidade de <i>bulk</i> dos sólidos [Pa. s]
μ_f	Viscosidade do fluido [Pa. s]
$\mu_{t,f}$	Viscosidade turbulenta da fase fluida [Pa. s]
$\Pi_{k,f}, \Pi_{\varepsilon,f}$	Influência da fase particulada na fase contínua
ρ_s	Massa específica do sólido [kg/m^3]
ρ_f	Massa específica do fluido [kg/m^3]
$\bar{\bar{\tau}}_s$	Tensor de tensões da fase sólida [N/m^2]
$\tau_{F,fs}$	Tempo de relaxação da partícula [s]
$\tau_{t,fs}$	Tempo de escala integral lagrangiano
φ	Esfericidade
ϕ_s	Troca de energia entre a fase fluida e particulada

SUBSCRITOS

f	Fluido
s	Sólidos
q	Fase

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.2	FLUIDIZAÇÃO	19
2.2.1	Determinação do tipo de leito	20
2.2.2	Leito de jorro	21
2.2.3	Propriedades da fluidodinâmica do leito de jorro	22
2.2.3.1	<i>Queda de pressão</i>	<i>24</i>
2.2.3.2	<i>Velocidade mínima de jorro</i>	<i>25</i>
2.3	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	26
2.3.1	Simulação de leitos de jorro empregando partículas esféricas	28
2.3.2	Simulação de leitos de jorro empregando partículas não esféricas	29
2.3.3	Simulação de leitos de jorro em geometria 2D	30
3	MODELOS MATEMÁTICOS	32
3.1	MODELAGEM MATEMÁTICA DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO EM LEITO DE JORRO.....	32
3.1.1	Conservação de massa.....	32
3.1.2	Conservação de movimento	33
3.1.3	Arraste entre fases	35
3.1.4	Tensão de cisalhamento	36
3.1.5	Teoria cinética granular.....	36
3.1.5.1	<i>Temperatura granular.....</i>	<i>36</i>
3.1.5.2	<i>Pressão da fase sólida.....</i>	<i>38</i>
3.1.5.3	<i>Viscosidade da fase sólida</i>	<i>39</i>
3.1.6	Turbulência	40
3.1.6.1	<i>Turbulência na fase fluida</i>	<i>41</i>
3.1.6.2	<i>Turbulência na fase particulada</i>	<i>42</i>
4	METODOLOGIA	45

4.1	INFRAESTRUTURA COMPUTACIONAL E O SOFTWARE EMPREGADO	45
4.2	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	46
4.2.1	Malha computacional.....	48
4.2.2	Parâmetros e propriedades do modelo	48
4.2.3	Modelagem matemática e solução numérica.....	49
4.2.4	Mecanismo experimental	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES DISPONÍVEIS NA LITERATURA	53
5.2	CONCORDÂNCIA DAS SIMULAÇÕES COM A LITERATURA	54
5.3	SIMULAÇÕES DO LEITO DE JORRO PILOTO	56
5.3.1	Refinamento da malha	56
5.3.2	Comparação dos resultados simulados e experimentais.....	58
5.3.3	Avaliação da altura do leito estático	65
5.3.4	Simulações axissimétricas	68
5.4	QUEDA DE PRESSÃO	71
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, observa-se um aumento na demanda por alimentos funcionais, o que tem estimulado a pesquisa e o desenvolvimento de técnicas eficazes de processamento. Dentre estes, tem-se a linhaça, um alimento funcional conhecido por seus benefícios à saúde, incluindo a prevenção de doenças cardiovasculares e degenerativas. Para assegurar a qualidade e a preservação de alimentos, principalmente os comercializados na forma de grãos, a secagem é considerada uma das operações unitárias mais importantes no processamento deste tipo de alimentos. Este processo tem como objetivo eliminar a água, impedindo o crescimento de microrganismos e prevenindo reações químicas indesejadas, sendo fundamental para a manutenção da qualidade do produto (Rasi *et al.*, 2021).

O leito de jorro, criado por Mathur e Gishler (1954), tem se provado particularmente eficiente na secagem de grãos e sementes. Este equipamento é apreciado por sua habilidade de promover um movimento eficaz das partículas e um alto contato entre o fluido e as partículas, resultando em altas taxas de transferência de calor e massa. Composto por três regiões distintas - o jorro, a fonte e a região anular -, o leito de jorro permite uma secagem eficiente devido à sua estrutura e ao seu funcionamento dinâmico. Contudo, a compreensão detalhada da fluidodinâmica para operação desse processo é complexa, porém, essencial para otimizar seu uso (Santos, 2011).

A complexidade do leito de jorro e a necessidade de uma análise detalhada dos mecanismos de transferência de calor e massa podem ser efetivamente abordadas através da simulação numérica computacional, especificamente a fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD). O CFD permite uma análise aprofundada do comportamento térmico e fluidodinâmico de diversos sistemas de escoamento sem a necessidade de medidas intrusivas e custosas. No caso de escoamento granular, esta ferramenta possibilita prever a distribuição de partículas, a velocidade das fases, a distribuição de temperatura e a queda de pressão em qualquer ponto do leito, oferecendo uma visão completa e detalhada do processo com menor custo e tempo de projeto (Mineto, 2009).

Apesar da ampla aplicação do CFD em estudos sobre as características fluidodinâmicas do leito de jorro, ainda existe uma lacuna significativa na literatura no que diz respeito à fluidodinâmica e transferência de calor, particularmente no contexto da secagem de sementes de geometria irregular como a linhaça. A modelagem Euleriana Granular Multifásica, implementada computacionalmente, fornece uma descrição da fluidodinâmica das partículas e do gás dentro do equipamento (Hamidipour, 2012).

No entanto, para maximizar a precisão sem comprometer a eficiência computacional, a escolha dos diversos modelos matemáticos e a entrada dos parâmetros físicos devem ser os mais condizentes para se chegar a resultados realistas. Outro fator que influencia significativamente a qualidade dos resultados das simulações em leito de jorro é o refinamento da malha computacional. A malha é uma rede de elementos discretos que divide o domínio de simulação em pequenas partes, permitindo a resolução das equações de fluxo em cada uma dessas partes. O refinamento da malha é especialmente crucial nas regiões de maior interesse, onde o fluxo de partículas é menos previsível e mais complexo. Nessas áreas, uma malha mais fina pode capturar melhor as variações sutis do fluxo, resultando em simulações mais detalhadas (Mills, 2016).

A integração de técnicas avançadas de secagem com simulações numéricas representa um progresso significativo para a indústria alimentícia, especialmente na produção de alimentos funcionais. Processos de secagem otimizados podem melhorar a qualidade e a conservação de produtos como a linhaça, garantindo que seus benefícios à saúde sejam plenamente aproveitados pelos consumidores. Além disso, a aplicação de tecnologias como o CFD pode reduzir custos e tempo de desenvolvimento, tornando os processos industriais mais eficientes e sustentáveis.

Assim, o objetivo deste trabalho é a análise da fluidodinâmica de um leito de jorro em escala piloto, realizado através de uma modelagem multifásica Euleriana no *software* FLUENT, e sua comparação com os resultados experimentais de fluidização em laboratório. Uma vez estabelecida uma fluidização representativa e com os métodos computacionais adequados, a mesma poderá ser utilizada em simulações futuras contemplando a troca térmica para análise do processo de secagem propriamente dito.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção foram apresentados os conceitos teóricos que embasam o trabalho.

2.1 LINHAÇA

A linhaça, Figura 1, extraída das sementes da planta *Linum usitatissimum L.*, tem despertado crescente interesse tanto na indústria alimentícia quanto na área de processos industriais. Rica em ácidos graxos essenciais, ômega-3, fibras alimentares e compostos antioxidantes, a linhaça tem sido reconhecida por seus diversos benefícios à saúde, incluindo a redução do risco de doenças cardiovasculares, controle do diabetes e melhora da saúde intestinal (Kristensen *et al.*, 2012).

Figura 1 - Sementes de linhaça



Fonte: Santana, 2011

Essa composição nutricional faz da linhaça um ingrediente altamente valorizado na indústria de alimentos, onde é frequentemente utilizada em produtos como pães, barras de cereais, iogurtes e suplementos nutricionais (Prasad, 2009).

Além de seus reconhecidos benefícios nutricionais, a linhaça também vem sendo amplamente estudada na área de processos industriais, especialmente em sua aplicação na secagem por leito de jorro. Segundo Santana (2011), a escolha adequada da temperatura é um fator determinante para a remoção da umidade, influenciando diretamente a qualidade final das sementes. Nesse contexto, o leito de jorro se destaca como uma tecnologia promissora, promovendo maior eficiência energética e garantindo a preservação das propriedades do grão.

A linhaça é um grão que possui uma forma caracteristicamente alongada e achatada, contribuindo para um comportamento de fluidização altamente irregular, semelhante ao alpiste. Pesquisas realizadas por Straatmann (2023) demonstram que a forma irregular da linhaça resulta em um empacotamento não uniforme e um comportamento de jorro complexo, onde as partículas exibem uma grande variação na trajetória e na velocidade.

A caracterização física da linhaça utilizada no presente estudo seguiu os dados de Arrotéia (2017), que apontou uma esfericidade de 0,605, massa específica de 1.105 kg/m^3 e diâmetro médio de 2,19 mm. Esses parâmetros são essenciais para entender o comportamento da semente em processos industriais, influenciando sua fluidez e eficiência na secagem.

Apesar de sua relevância, a produção brasileira de linhaça ainda é modesta, totalizando 12,9 mil toneladas, com a maior parte concentrada no estado do Rio Grande do Sul. Esse volume é pequeno quando comparado à produção mundial, que atingiu 3,06 milhões de toneladas em 2020 (Rauch et al., 2022). Além disso, o custo variável da cultura no Brasil gira em torno de R\$ 1.750,00 por hectare, o equivalente a aproximadamente sete sacas de 60 quilos (Rural, 2023), o que impacta sua competitividade no mercado agrícola.

2.2 FLUIDIZAÇÃO

A fluidização é uma operação unitária em que um fluido ascendente escoar através de um leito de partículas sólidas, atingindo uma velocidade suficiente para contrabalançar seu peso. Nesse estado, a força de arraste do fluido se equilibra com a força gravitacional das partículas, permitindo sua movimentação e interação dentro do leito. Em sistemas de alta concentração de sólidos, as partículas se comportam de forma coletiva, conferindo ao conjunto características semelhantes às de um fluido. No entanto, à medida que a fase sólida se torna mais diluída, essa aproximação se torna menos precisa, e as partículas tendem a se mover de forma independente, reduzindo a homogeneidade do escoamento e tornando predominantes as interações fluido-partícula.

A fluidização tem como características importantes altos coeficientes de transferência de calor e massa, e a promoção de um bom contato entre as fases. Consequentemente, há uma grande aplicabilidade de fluidização, sendo elas:

- a) secagem;
- b) mistura de sólidos;
- c) reações químicas;
- d) revestimento de partículas;

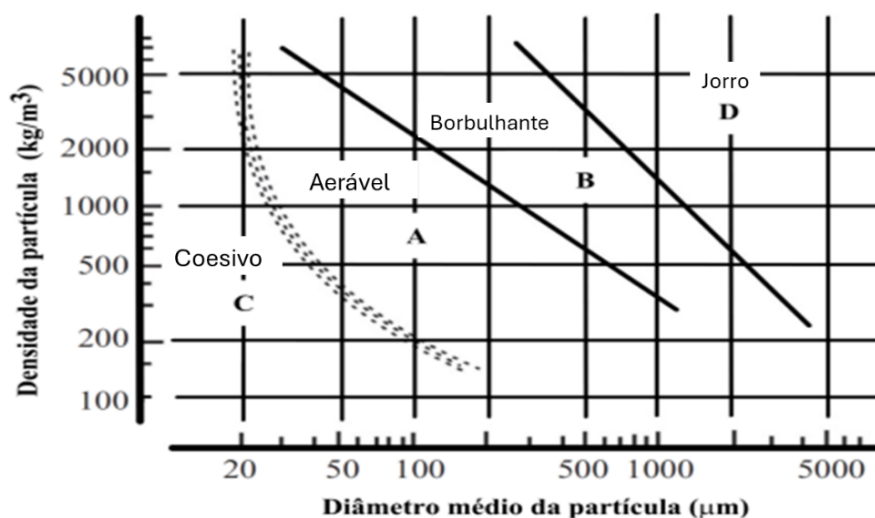
- e) aquecimento ou resfriamento de sólidos.

2.2.1 Determinação do tipo de leito

A interação entre as partículas e o fluido é determinada pela densidade e granulometria do material particulado, conforme ilustrado na Figura 2. Derek Geldart (1972) classificou as partículas em quatro categorias:

- Classe A: Composta por partículas finas que fluidizam facilmente. Essas partículas não apresentam borbulhamento e exibem um regime de fluidização homogêneo;
- Classe B: Essas partículas não possuem forças coesivas e apresentam fluidização caracterizada pela formação de bolhas bem definidas dentro do leito, sem que ocorra o efeito de aglomeração ou canalização comuns em outras classes;
- Classe C: São partículas muito finas e pequenas, caracterizadas por alta coesividade, o que torna a fluidização desafiadora. Nesse caso, recursos adicionais, como vibração do leito ou aditivos, são necessários para promover a fluidização;
- Classe D: Composta por partículas de diâmetro grande e/ou alta densidade. Essas partículas não fluidizam facilmente de maneira convencional e podem formar caminhos preferenciais. No entanto, no leito de jorro, as partículas dessa classe apresentam melhor desempenho.

Figura 2 - Diagrama de Geldart



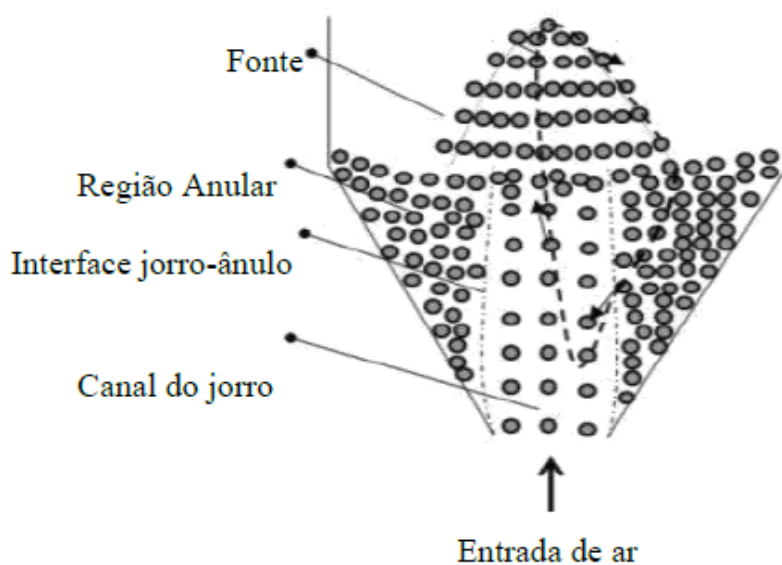
Fonte: Autor “adaptado de” Echevarria, 2015, p. 03.

2.2.2 Leito de jorro

Leito de jorro é um equipamento composto por um recipiente aberto no topo, onde são contidas as partículas sólidas. Na base do recipiente, há um orifício central por onde é injetado um fluido no estado gasoso. Quando a vazão de entrada do ar é suficientemente alta, a ponto de vencer a queda de pressão formada pelas partículas nele contidas, elas são carregadas pneumáticamente de forma ascendente pelo centro, região denominada jorro, ao atingirem uma certa altura, as partículas desaceleram devido à diminuição da força ascendente e começam a cair na região anular, entre o jorro e a parede do leito. Em um fluxo lento, são levadas por meio da ação da gravidade novamente para a região de jorro (Mathur; Gishler, 1955).

Desta forma, desenvolve-se um movimento cíclico e contínuo, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Estrutura de um leito de Jorro.



Fonte: Batista, 2017.

Na região de jorro (ou região central), o fluido é injetado na base do leito com uma velocidade suficientemente alta, para que as partículas sólidas sejam arrastadas ou empurradas para cima, formando uma “nuvem” de partículas suspensas. Esta área é caracterizada pela alta turbulência, transferência de calor e de massa entre o fluido e as partículas sólidas.

Na região de fonte, a "nuvem" de partículas sólidas em suspensão começa a cair sob a influência da gravidade, formando um cone no fundo do leito. Nesta região, tanto a turbulência como a transferência de calor são reduzidas.

Tratando-se da região da fonte, as partículas sólidas atingem a velocidade de equilíbrio junto com o fluido e permanecem em suspensão devido ao fluxo ascendente. Nesta região, a turbulência é mínima e a transferência de calor e de massa são determinadas pela difusão molecular.

Este tipo de leito pode proporcionar altas taxas de transferência de calor e de massa, devido ao movimento cíclico das partículas formado pelo jorro que permite alcançar um elevado grau de contato entre o fluido e a partícula (Mathur; Epstein, 1974).

A queda de pressão em leitos de jorro é causada pela resistência do fluido em se mover através dos poros do leito, gerando uma queda de pressão. A magnitude da queda de pressão depende de fatores como a vazão do fluido, o tamanho e o formato das partículas no leito, a densidade do material do leito e as propriedades do próprio fluido, bem como a altura do leito estático.

Estudos mostram que a linhaça seca e estabilizada pode ser incorporada em pães, cereais, barras de proteína e suplementos alimentares, aumentando o valor nutricional desses produtos (Lúcio *et al.*, 2021). Além disso, a técnica de leito de jorro permite o revestimento de grãos com micronutrientes, como vitaminas e minerais, sem comprometer sua qualidade (Pereira *et al.*, 2022).

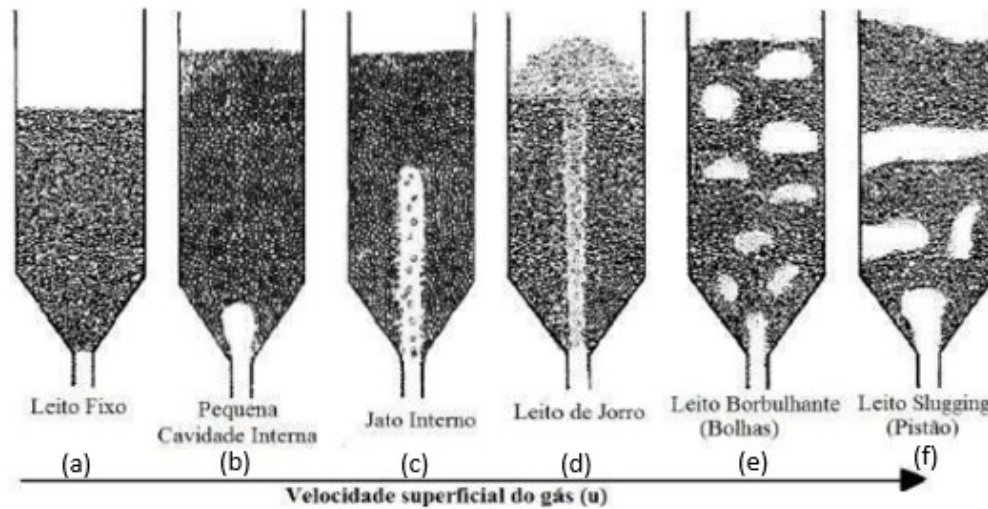
Outro exemplo relevante é o uso do leito de jorro para a granulação de grãos integrais. Esse processo melhora a solubilidade e a digestibilidade dos grãos, tornando-os mais adequados para a produção de alimentos funcionais e nutracêuticos (Singh; Heldman, 2014).

2.2.3 Propriedades da fluidodinâmica do leito de jorro

A partir de um equipamento com dimensões e configurações estabelecidas, é possível aumentar a velocidade do fluido utilizado e observar a zona hidrodinâmica.

A Figura 4 representa os regimes fluidodinâmicos de um leito de jorro conforme o aumento da velocidade superficial do gás.

Figura 4 - Regimes Fluidodinâmicos de um Leito de Jorro.



Fonte: Mathur e Epstein, 1974.

Em sistemas de leito fixo (a), a velocidade do fluido ainda não é suficiente para movimentar as partículas no leito e o ar penetra apenas pelos espaços vazios entre as partículas (Butzge, 2012).

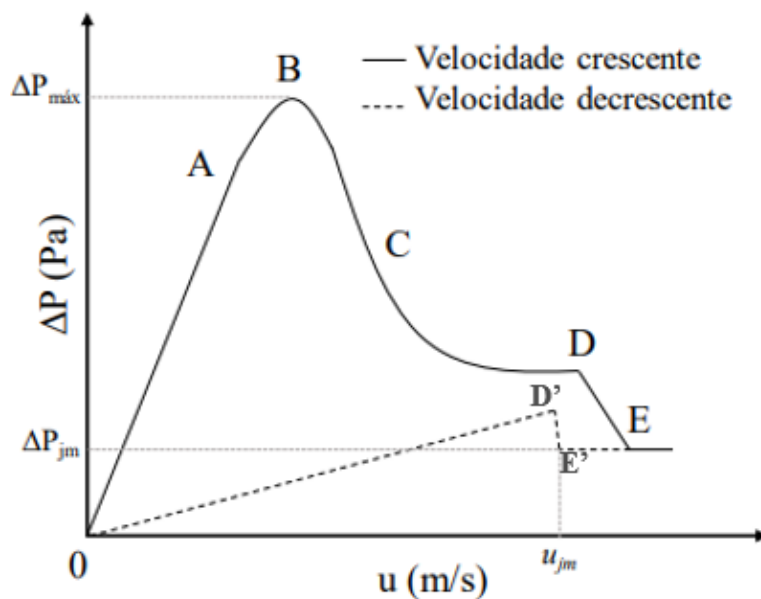
A transição em velocidades inferiores à de fluidização, há a formação de uma cavidade interna (b) e em seguida para o jato interno (c) onde ainda não é possível visualizar o jorro. Em velocidades de fluido acima do jorro mínimo (d), chega-se à região do jato onde ocorre o movimento intermitente das partículas. Esse fenômeno ocorre em uma certa faixa de velocidades do fluido (gás) e depende de uma combinação de propriedades das partículas (sólidas) e da configuração do equipamento utilizado. A estabilidade do jorro depende da altura do leito fixo de partículas. Essa altura pode ser relacionada à velocidade superficial do gás usando diagramas existentes, como regimes hidrodinâmicos e diagramas de fase (Butzge, 2012).

A instabilidade de regime ocorre quando a velocidade do fluido excede a faixa estabelecida para obter um leito de jorro, transformando-o em um leito borbulhante (e), que é considerado um leito fluidizado de baixa qualidade. Aumentos adicionais na velocidade retardam o movimento das partículas no leito e podem levar a um regime indesejável de 'slugging' (f) na maioria dos processos (Mathur; Epstein, 1974; Epstein; Grace, 2011).

2.2.3.1 Queda de pressão

Através do gráfico da curva de queda de pressão em função da velocidade superficial do gás, ilustrado na Figura 5, pode-se facilmente analisar o mecanismo de transição dos regimes fluidodinâmicos.

Figura 5 - Curvas típicas de queda de pressão em função da velocidade.



Fonte: Souza, 2019

Mathur e Epstein (1974) determinaram em seus estudos que, na região entre os pontos “A” e “B”, quando a vazão de ar é baixa, o gás passa sem perturbar as partículas, portanto a queda de pressão aumenta com o incremento da velocidade do gás.

Quando a velocidade do gás é alta o suficiente para empurrar as partículas para fora, uma cavidade se forma na região central relativamente vazia. As partículas ao redor desse vazio são comprimidas contra o material sobrejacente, formando um arco compacto que aumenta a resistência ao fluxo. No entanto, apesar da presença destas cavidades, a queda de pressão total do leito continua a aumentar.

A altura do leito estático influencia diretamente a distribuição das partículas e a resistência ao fluxo de ar. Ao se aumentar ainda mais a velocidade dos gases, a cavidade é alongada até que um jorro interno se forme, mas o arco de compressão acima do jorro interno ainda é mantido, de modo que a queda de pressão no leito atinge um valor máximo (ponto B).

À medida que a velocidade do fluxo aumenta além do ponto B, a altura da cavidade aumenta em comparação com o material comprimido acima. Portanto, a queda de pressão ao longo da curva BCD começa a diminuir.

No ponto C, há partículas fora do centro o suficiente para causar uma expansão significativa do leito, e a redução da queda de pressão é impedida pela pequena região de fluxo de gás mostrada entre os pontos C e D. A região entre os pontos C e D, quando se tem o jorro interno, é instável, podendo se observar esta expansão e contração alternadamente ao longo do leito.

A partir deste momento, mesmo um pequeno aumento no fluxo de ar romperá a superfície do leito e reduzirá a concentração de sólidos acima do jorro. Como resultado, a queda de pressão é reduzida para o ponto E, onde há um jorro móvel e estável no leito.

Um aumento adicional no fluxo de gás atravessa apenas o caminho de menor resistência, formando-se um caminho preferencial, a região de jorro, e aumenta em altura, sem alteração na perda de pressão geral. Portanto, a queda de pressão no ponto E, na qual permanece constante.

A partir deste ponto, reduções na vazão de fluido levam a queda de pressão para o ponto E', que é a vazão mínima de jorro. A partir daí o jato colapsa mantendo um fluxo decrescente, e a queda de pressão aumenta acentuadamente até o ponto D', depois diminui continuamente com a diminuição da velocidade do fluxo (Mathur; Epstein, 1974).

2.2.3.2 Velocidade mínima de jorro

A velocidade mínima de jorro é um parâmetro importante para otimizar os processos de secagem e granulação do material. Segundo diversos estudos, essa velocidade representa a menor velocidade do ar necessário para manter um regime de jorro estável.

Vários estudos exploraram a importância da velocidade mínima de jorro em diferentes contextos. De acordo com Banožić *et al.* (2023), a determinação da velocidade mínima de jorro é essencial para otimizar os processos de secagem de alimentos, pois essa velocidade afeta diretamente a taxa de transferência de calor e a umidade final do produto.

Diante desses resultados, fica evidente a importância da determinação da velocidade mínima de jorro (v_m) para a otimização dos processos de secagem, granulação e controle ambiental. Essa variável pode influenciar diretamente na qualidade do produto na eficiência energética e no controle da emissão de partículas no ar. Consequentemente, a determinação

criteriosa da velocidade mínima de jorro é uma etapa fundamental na otimização de processos industriais cuja equação pode ser expressa da seguinte forma (Mathur; Gishler, 1955):

$$v_m = \left(\frac{D_p}{D_c}\right) \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{\frac{1}{3}} \left(2gH_L \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

onde:

v_m é a velocidade mínima de jorro;

D_p é o diâmetro da partícula;

D_c é o diâmetro da seção cilíndrica do leito (coluna do leito);

D_i é o diâmetro do orifício de entrada do ar;

g é a aceleração da gravidade;

H_L é a altura do leito;

ρ_p é a massa específica da partícula;

ρ é a massa específica do fluido (ar).

2.3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) tem se destacado como uma ferramenta essencial na engenharia contemporânea, proporcionando uma abordagem poderosa para modelar, analisar e otimizar uma ampla gama de fenômenos fluidodinâmicos.

A crescente demanda por eficiência e inovação na indústria tem impulsionado o desenvolvimento e adoção do CFD. Esta ferramenta, baseado em modelos matemáticos e técnicas computacionais avançadas, permite simular virtualmente o comportamento dos fluidos em sistemas reais. Como afirmado por Anderson (1995), o CFD é uma poderosa ferramenta para análise e projeto de sistemas fluidodinâmicos complexos, preenchendo lacunas entre teoria e experimentação.

Uma das principais vantagens do CFD é sua capacidade de oferecer *insights* detalhados e precisos sobre o comportamento dos fluidos em diferentes condições e geometrias. Essas simulações permitem otimizar o *design* de equipamentos e processos, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento.

De acordo com Costa e Ribeiro (2010), o CFD tem sido usado em uma variedade de fluxos, incluindo ar, água, multifásicos entre outros. Isso permite uma investigação completa

dos parâmetros de fluxo em várias geometrias e configurações operacionais, permitindo a captura de informações precisas e detalhadas sobre o comportamento do sistema em diversas situações.

O CFD é amplamente reconhecido como uma ferramenta poderosa para a análise de fenômenos de transporte, como a transferência de calor e o movimento de massa, essenciais em diversos processos industriais. Peres (2002) utilizou técnicas de CFD para estudar escoamentos em ciclones industriais, destacando a importância dessa ferramenta na previsão de desempenho e eficiência de equipamentos utilizados em processos químicos.

O procedimento de simulação numérica envolve a resolução de equações diferenciais parciais (PDE) que regem o comportamento do fluido em um determinado domínio. Para resolver essas equações, várias técnicas numéricas podem ser utilizadas, incluindo o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Volumes Finitos (MFV) (Batista, 2017).

O MDF é consiste em discretizar a região de interesse em pequenos volumes nos quais são estabelecidas as equações de conservação de massa, momento e energia. Essas equações são resolvidas numericamente usando operadores diferenciais discretos, que aproximam as derivadas em cada ponto do domínio. O MDF é comumente utilizado na solução de problemas envolvendo escoamentos incompressíveis e turbulentos, como modelagem de escoamento de ar em torno de asas de aviões ou simulação de escoamentos em tubulações (Anderson, 2017).

Por outro lado, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica utilizada para resolver problemas envolvendo a interação de sólidos e fluidos. O domínio de interesse é discretizado em pequenos elementos finitos nos quais o equilíbrio mecânico e as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são formuladas. Essas equações são resolvidas numericamente por meio de funções de interpolação que aproximam as variáveis de interesse em cada ponto do domínio. O MEF é comumente utilizado para resolver problemas de mecânica dos fluidos que incluem a interação de sólidos e fluidos, como a modelagem de fluxos em torno de um veículo em movimento (Ferziger; Peric, 2002).

Por sua vez, o MVF baseia-se na discretização do domínio físico em volumes de controle (ou células), que são as menores regiões que compõem a malha computacional. Cada volume de controle é responsável por armazenar a quantidade de uma grandeza (como a velocidade ou a temperatura) e, em seguida, realizar a conversão das equações diferenciais contínuas para um sistema de equações algébricas. A integral das equações diferenciais é realizada sobre o volume de controle, levando em consideração a conservação das grandezas

no interior do volume e suas trocas de fluxo através das faces do volume (Versteeg & Malalasekera, 2007).

A principal vantagem do MVF é que ele garante a conservação local de propriedades físicas, como massa, energia e quantidade de movimento, já que as equações de conservação são formuladas de maneira integral. Isso torna o método particularmente útil em problemas envolvendo fluxos complexos, como escoamentos turbulentos e multi-fásicos. O método também pode ser facilmente adaptado para diferentes tipos de malhas, incluindo malhas não estruturadas, o que a torna ideal para geometrias complexas (Patankar, 1980). Segundo Anderson (2017), as equações de conservação de massa, momento e energia para cada fase são resolvidas numericamente usando métodos como o Método dos Volumes Finitos, permitindo que a dinâmica de dois ou mais fluidos interagindo dentro de um mesmo sistema seja modelada.

No entanto, como apontam Versteeg e Malalasekera (2007), a técnica de Euler-Euler apresenta algumas desvantagens em algumas circunstâncias, como a existência de partículas sólidas em suspensão. Em alguns casos, uma técnica diferente, como a abordagem de Euler-Lagrange, pode ser adequada.

2.3.1 Simulação de leitos de jorro empregando partículas esféricas

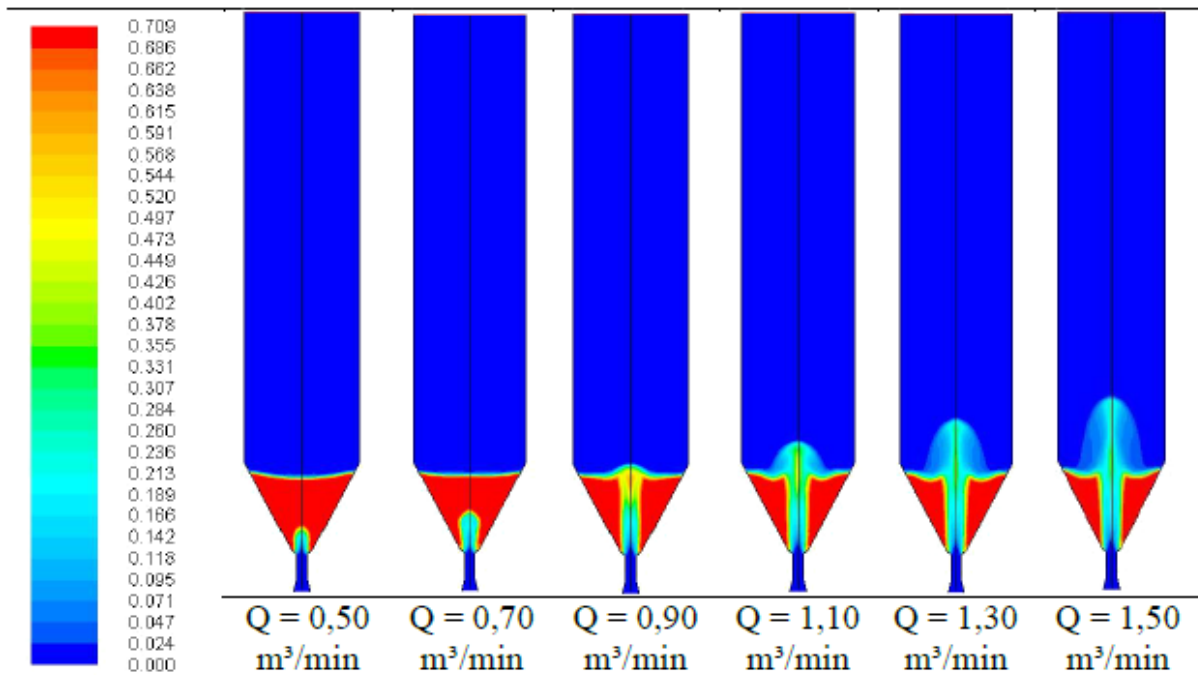
A simulação eixo simétrica simplifica a modelagem tridimensional completa ao assumir simetria em torno de um eixo, reduzindo a complexidade computacional sem comprometer significativamente a precisão dos resultados. Segundo estudos de Yang *et al.* (2016), essa abordagem é particularmente vantajosa para partículas esféricas, onde a simetria geométrica pode ser explorada para reduzir o esforço computacional enquanto ainda captura adequadamente os padrões de fluxo e interação entre as partículas e o fluido.

Trabalhos de Lathouwers e Bellan (2001) demonstram que a simulação axissimétrica (com eixo de simetria) é capaz de replicar fielmente os perfis de velocidade e pressão em leitos de jorro de partículas esféricas, proporcionando uma boa correlação com os dados experimentais. Isso se deve à natureza homogênea das partículas esféricas, que facilita a manutenção de uma distribuição simétrica de forças e fluxos dentro do leito de jorro.

Pesquisas de Deen *et al.* (2007) indicam que a modelagem com eixo de simetria em CFD-DEM pode replicar com alta fidelidade os padrões de comportamento de partículas esféricas em leitos de jorro, incluindo a formação de bolhas e os perfis de velocidade.

A Figura 6 exemplifica uma simulação realizada em um leito de jorro utilizando partículas esféricas. O comportamento das partículas é fielmente descrito conforme Mathur; Gishler, (1955).

Figura 6 - Simulação em CFD com sementes de sorgo.



Fonte: Batista, 2017, p. 46.

2.3.2 Simulação de leitos de jorro empregando partículas não esféricas

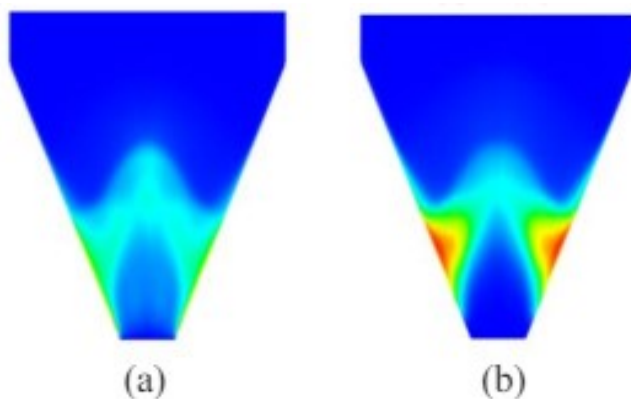
Muitos materiais processados em leitos de jorro, como a linhaça, podem ser constituídos de partículas esféricas. As simulações CFD-DEM tendem a exibir resultados simétricos quando aplicadas a partículas esféricas, mas essa simetria não reflete a realidade observada em partículas irregulares. A forma irregular das partículas de linhaça, por exemplo, provoca padrões de movimento e distribuição de velocidade que são altamente anisotrópicos e imprevisíveis. Costa e Ribeiro (2010) também destacam que métodos híbridos atomístico-contínuo podem ser utilizados para simular propriedades dinâmicas de fluidos, oferecendo uma perspectiva complementar sobre a complexidade dos fluxos de partículas irregulares.

As discrepâncias entre os resultados simulados e a realidade observada na fluidização de partículas irregulares têm implicações significativas para o design e a otimização de processos industriais. Em processos de secagem, granulação ou revestimento, a incapacidade

de prever com precisão o comportamento das partículas pode levar a ineficiências operacionais e à produção de produtos de qualidade não desejada.

A Figura 7 exemplifica uma simulação axi-simétrica realizada em um leito de jorro utilizando partículas não-esféricas, na qual o comportamento destas não são similares devido a diferença das dimensões de cada partícula. Porém, ainda que as simulações tenham apresentado resultados distintos, não houve comparação com experimentos para comprovar a simetria da fluidização.

Figura 7 - Contorno da fração volumétrica da (a) areia, (b) casca de coco



Fonte: Ferreira *et al*, 2017

2.3.3 Simulação de leitos de jorro em geometria 2D

A simulação 2D tem provado ser uma ferramenta fundamental na análise e otimização de processos de engenharia química, especialmente para a compreensão da dinâmica de fluidos e da transferência de calor em sistemas complexos como leitos de jorro.

Estudos recentes, como os realizados por Batista (2017), Souza (2019), Artur *et al.* (2018) e Santana (2011), destacam a relevância e aplicabilidade destas simulações em contextos acadêmicos e industriais.

Batista (2017) explorou o comportamento da dinâmica de fluidos e a transferência de calor em leitos de jorro usando CFD. O estudo concentrou-se no grão de sorgo e descobriu que simulações 2D podem fornecer informações detalhadas sobre padrões de fluxo e distribuição de temperatura no leito. Esses resultados são importantes para otimizar o processo de secagem, aumentando assim a eficiência e a uniformidade do tratamento térmico das sementes.

Souza (2019) complementa este entendimento ao avaliar como diferentes ângulos da base cônica dos leitos de jorro afetam a dinâmica dos fluidos e a transferência de calor. Usando

simulações 2D, o estudo demonstrou que as mudanças geométricas podem ter um impacto significativo no desempenho do sistema. Esta análise permite o ajuste preciso do projeto do equipamento, impulsionando melhorias no processo de secagem e reduzindo custos operacionais.

Artur *et al.* (2018) focaram no estudo da dinâmica de fluidos em leito de jorro para materiais orgânicos. Graças às simulações foi possível observar como diferentes tipos de partículas interagem com o fluxo de ar no interior do leito. Esses resultados são essenciais para o desenvolvimento de processos voltados tanto para secagem quanto para granulação, fornecendo uma base sólida para otimização futura e aplicações em larga escala.

Santana (2011) realizou uma análise experimental das propriedades fluidodinâmicas e de secagem de semente de linhaça em leito de jorro. Este estudo experimental complementa os métodos de simulação 2D, fornecendo dados experimentais para validar e melhorar modelos computacionais. A combinação de dados experimentais com simulação proporciona uma visão mais completa e precisa do processo, permitindo uma otimização mais eficaz.

3 MODELOS MATEMÁTICOS

Nesta seção foram apresentados os modelos matemáticos que embasam o trabalho.

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO EM LEITO DE JORRO

Quando se estuda a interação de diferentes fases em um fluido usando o método Euler-Euler, é importante considerar que essas fases são contínuas e se miscíveis entre si. Para isso, a fração volumétrica (α_q) de cada fase é essencial para modelar o fluxo de forma correta. Com base nesse conceito, as leis de conservação da massa e do momento são aplicadas individualmente a cada fase do sistema. Dessa forma, o volume ocupado pode ser definido como:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (2)$$

onde:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (3)$$

A densidade efetiva da fase q é definida pela equação:

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad (4)$$

onde:

ρ_q é a massa específica da fase q .

3.1.1 Conservação de massa

A equação da conservação de massa para uma fase q do escoamento é apresentada de maneira generalizada na equação:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (5)$$

onde:

$\vec{V}_q$ - velocidade da fase q ;

$\dot{m}_{pq}$ - transferência de massa da fase p para a fase q ;

$\dot{m}_{qp}$ - transferência de massa da fase q para a fase p ;

S_q - termo de geração de massa para a fase q ;

n - número de fases presente no escoamento.

Na equação 5 o primeiro termo da esquerda representa o acúmulo de massa por unidade de volume e o segundo termo é a o fluxo de massa convectivo. O primeiro termo da direita representa a transferência de massa entre fases e a geração de massa é representada pelo segundo termo do lado direito da equação.

Considerando-se a transferência de massa nula entre as fases e que não ocorre reações químicas no sistema, e definindo-se a fase primária (fluido: $p = f$) e secundária (granular: $q = s$), as equações da continuidade para um escoamento em leito de jorro podem ser escritas na fase fluida como:

$$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{V}_f) = 0 \quad (6)$$

e para a fase sólida como:

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{V}_s) = 0 \quad (7)$$

3.1.2 Conservação de movimento

O balanço geral de conservação de quantidade de movimento para as fases fluida e sólida são apresentadas nas equações:

- para fase fluida:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \bar{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + R_{fs} + \dot{m}_{fs} \vec{v}_{fs} + \vec{F}_f + \vec{F}_{lift,f} + \vec{F}_{vm,f} \quad (8)$$

- e para fase sólida:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \bar{\tau}_f + \alpha_s \rho_s \vec{g} - R_{fs} - \dot{m}_{fs} \vec{v}_{fs} + \vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{vm,s} \quad (9)$$

onde:

$\overline{\tau}_q$ - tensor das tensões ($q=f,s$);

$\overrightarrow{v}_{fs}$ - velocidade relativa entre fases ($\overrightarrow{v}_f - \overrightarrow{v}_s$);

$\vec{R}_{fs}$ - força de interação entre as fases;

$\vec{F}_q$ - força de campo ($q=f,s$);

$\vec{F}_{lift,q}$ - força de ascensão ($q=f,s$);

$\vec{F}_{vm,q}$ - força de massa virtual ($q=f,s$);

p - pressão compartilhada pelas fases;

p_s - pressão da fase sólida.

Os elementos à esquerda das equações 8 e 9 representam, em ordem, a taxa global de acúmulo de momento e a transferência de momento por convecção. Os componentes à direita das equações indicam a contribuição do gradiente de pressão no fluxo, a transferência de momento através do mecanismo molecular, a influência da força gravitacional, a força de interação entre as fases, as forças resultantes da transferência de momento devido à troca de massa entre as fases e as forças que são dependentes do meio no qual a fase q está inserida (força de campo, ascensão e massa virtual), respectivamente.

Neste estudo, a única força de campo presente é a força gravitacional, portanto, o termo associado às forças externas é nulo. Na maioria dos fluxos gás-sólido, a contribuição da força de ascensão é insignificante em comparação com a força de arrasto, sendo esta última negligenciada neste estudo. A força de massa virtual é relevante quando a densidade da fase secundária é muito menor que a da fase primária, o que não ocorre neste estudo, portanto, este efeito também é desconsiderado no modelo.

A força de interação entre as fases é influenciada pelo atrito e pressão, entre outros fatores. Impondo a condição que $\vec{R}_{fs} = -\vec{R}_{sf}$, a interação será representada pela equação 10:

$$\vec{R}_{fs} = K_{fs}(\overrightarrow{v}_f - \overrightarrow{v}_s) \quad (10)$$

onde:

K_{fs} - coeficiente de troca de quantidade de movimento entre fases.

A força de interação entre as fases corresponde ao efeito de arraste entre as fases no escoamento. Em leitos de jorro, esse efeito é particularmente relevante devido aos gradientes acentuados de fração volumétrica das fases no sistema. Esses gradientes (alta porosidade na

região do canal de jorro e baixa porosidade na região anular) tornam essencial uma descrição precisa desse fenômeno para simulações fiéis à realidade.

Após as considerações realizadas, aplicando simplificações às equações 8 e 9, obtemos as equações de conservação da quantidade de movimento para ambas as fases:

- para fase fluida:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \bar{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + K_{fs}(\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (11)$$

- e para a fase sólida:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \bar{\tau}_f + \alpha_s \rho_s \vec{g} - K_{fs}(\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (12)$$

As equações 11 e 12, combinadas com as equações de continuidade, formam o conjunto de equações que regem o sistema de fluidodinâmica de um leito de jorro.

3.1.3 Arraste entre fases

O modelo proposto por Gidaspow *et al.* (1992) é frequentemente empregado para descrever a transferência de quantidade movimento entre as fases em um leito de jorro. Esse modelo é uma combinação do trabalho de Wen e Yu (1966) para a região de fase diluída (expressa pela Equação 13) e da equação desenvolvida por Ergun (1949) para a região de fase densa (representada pela Equação 14).

$$K_{sf} = K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{a_s a_f \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} a_f^{2,65}, \quad a_f > 0,8 \quad (13)$$

$$K_{sf} = K_{fs} = 150 \frac{a_s(1-a_f)\mu_f}{a_f d_s^2} + 1,75 \frac{a_s \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s}, \quad a_f \leq 0,8 \quad (14)$$

O coeficiente de arraste C_D na equação 13 é calculado por:

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

onde o número de Reynolds (Re_s) é definido por:

$$Re_s = \frac{\rho_f d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{\mu_f} \quad (16)$$

3.1.4 Tensão de cisalhamento

O tensor das tensões viscosas é expresso de acordo com o modelo newtoniano para as fases fluida e granular, através das equações:

- para a fase fluida:

$$\bar{\tau}_f = \alpha_f \mu_f (\nabla \vec{v}_f + \nabla \vec{v}_f^T) + \alpha_f \left(\lambda_f - \frac{2}{3} \mu_f \right) \nabla \cdot \vec{v}_f \bar{I} \quad (17)$$

- para a fase sólida:

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (18)$$

onde:

μ_s - viscosidade da fase q (s,f);

λ_s - viscosidade bulk da fase q (s,f);

$\bar{I}$ - tensor unitário.

A descrição das propriedades da fase particulada é baseada na Teoria Cinética Granular.

3.1.5 Teoria cinética granular

A teoria cinética granular, descrita detalhadamente por Lun *et al.* (1984), é uma comparação com a teoria cinética dos gases e aborda os conceitos de temperatura granular, viscosidade e pressão nos sólidos.

3.1.5.1 Temperatura granular

A temperatura granular está relacionada à energia cinética associada às flutuações de velocidade na fase sólida. Essa temperatura “pseudotérmica” da fase de partículas é proporcional ao quadrado do movimento aleatório das partículas, conforme expresso na equação 19:

$$\theta_s = \frac{1}{3} \langle c^2 \rangle \quad (19)$$

onde:

c é a flutuação da velocidade da fase sólida e θ_s é a temperatura granular.

A equação da conservação da temperatura granular é representada pela equação 20:

$$\frac{3}{2} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \theta_s \vec{v}_s) \right) = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{f_s} \quad (20)$$

onde:

$(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s$ - geração de energia pelo tensor tensão da fase sólida;

k_{θ_s} - coeficiente de difusão da temperatura granular;

γ_{θ_s} - dissipação de energia ocasionada pelas colisões;

ϕ_{f_s} - troca de energia entre a fase sólida e fluida.

O coeficiente de difusão é obtido a partir da equação proposta por Gidaspow *et al.* (1992), através da equação 21:

$$k_{\theta_s} = \frac{150 \rho_d d_s \sqrt{(\theta \pi)}}{384(1+e_{ss})g_{0,ss}} \left[1 + \frac{6}{5} a_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2 \alpha_s^2 \rho_s d_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss} \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (21)$$

A dissipação de energia devido às colisões pode ser descrita pela expressão de Lun *et al.* (1984) representada pela equação 22:

$$\gamma_{\theta_p} = \frac{12(1-e_{ss}^2)g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \theta_s^{\frac{3}{2}} \quad (22)$$

onde:

e_{ss} - coeficiente de restituição;

$g_{0,ss}$ - função de distribuição radial.

A transferência de energia cinética das flutuações aleatórias da velocidade das partículas para a fase fluida é dada por (Gidaspow *et al.*, 1992):

$$\phi_{qp} = K_{fs} \theta_s \quad (23)$$

A viscosidade *bulk* é um importante parâmetro para determinar a dinâmica de fluidos onde efeitos de compressibilidade estão presentes. Para a fase particulada este parâmetro

compreende a resistência da fase granular à compressão e expansão. A equação 24 apresenta a formulação proposta por Lun *et al.* (1984):

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

O coeficiente de restituição é um parâmetro da fase particulada que depende da elasticidade do choque entre as partículas. A função de distribuição radial é um fator de correção que altera a probabilidade de colisão entre partículas quando a fase granular é densa, podendo ser interpretada como uma distância adimensional entre partículas:

$$g_0 = \frac{s+d_s}{s} \quad (25)$$

onde: s é a distância entre as partículas.

A partir da equação 25, observa-se que, para uma fase sólida diluída, quando $s \rightarrow \infty$, a função de distribuição radial g_0 tende a 1. Por outro lado, quando a fase sólida se aproxima do limite de empacotamento $s \rightarrow 0$ e $g_0 \rightarrow \infty$. A função de distribuição radial desempenha um papel fundamental na análise da distribuição de partículas em sistemas não uniformes. Sua conexão com a teoria de Chapman e Cowling (1990) auxilia na modelagem do comportamento de gases complexos. É importante mencionar que a literatura apresenta diferentes correlações para essa função. Neste trabalho, utilizou-se a formulação proposta por Lun *et al.* (1984):

$$g_{0,ss} = \left(1 - \frac{a_s}{a_{s,max}} \right)^{-2.5a_{s,max}} \quad (26)$$

onde:

$a_{s,max}$ - limite de empacotamento máximo do leito.

3.1.5.2 Pressão da fase sólida

Para escoamentos granulares em regime compressível (ou seja, quando a fração volumétrica de sólidos é menor que o valor máximo permitido), a pressão da fase sólida deve ser calculada individualmente e incorporada à equação de conservação de quantidade de movimento para a fase granular (∇p_s). A pressão do sólido, proposta por Lun *et al.* (1984), é

composta por um termo cinético e um segundo termo relacionado à colisão das partículas, conforme apresentado na equação 27:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (27)$$

3.1.5.3 Viscosidade da fase sólida

A tensão de cisalhamento da fase particulada inclui a viscosidade molecular e a viscosidade *bulk*, relacionadas à translação e colisões entre partículas. Os efeitos de colisão, cinético e de atrito são combinados para estimar a viscosidade da fase sólida, conforme apresentado na equação 28

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (28)$$

A contribuição para a viscosidade devido à colisão das partículas e à contribuição cinética foram formuladas por Gidaspow *et al.* (1992) e são expressas nas equações 29 e 30 respectivamente:

$$\mu_{s,c} = \frac{4}{5} a_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

$$\mu_{s,k} = \frac{10\rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{g_{0,ss}(1+e_{ss})g_{0,ss}} \left(1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} a_s (1 + e_{ss}) \right)^2 \quad (30)$$

Em escoamentos granulares em fase densa, quando a fração volumétrica de sólidos se aproxima do limite máximo de empacotamento, as colisões instantâneas tornam-se menos relevantes. A aplicação da teoria cinética granular a esses escoamentos não é significativa, uma vez que as partículas estão em contato direto. Portanto, as tensões resultantes do atrito entre as partículas devem ser consideradas. Para analisar esse efeito, a equação de viscosidade friccional é proposta por Schaeffer (1987) foi utilizada:

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \sin \phi}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (31)$$

onde:

ϕ - ângulo de fricção interna;

I_{2D} - segunda invariante do tensor das tensões.

3.1.6 Turbulência

A modelagem de escoamentos turbulentos em leitos de jorro é uma tarefa complexa, que exige a utilização de modelos de turbulência precisos. A eficiência desses processos depende de uma compreensão detalhada das dinâmicas de escoamento dentro do leito. Modelos de turbulência, como os modelos k- ϵ e k- ω , desempenham um papel fundamental nas simulações dessas dinâmicas, permitindo a otimização do desempenho computacional.

O modelo de turbulência k- ϵ é um dos mais utilizados devido à sua simplicidade e robustez. Desenvolvido por Jones e Launder (1972), esse modelo utiliza duas equações de transporte: uma para a energia cinética turbulenta (k) e outra para a taxa de dissipação de energia turbulenta (ϵ). Launder e Spalding (1974) demonstraram que o modelo k- ϵ é eficaz na captura de grandes escalas de turbulência e na previsão de fenômenos de mistura, essenciais para a operação de leitos de jorro. Estudos como os de Takeuchi *et al* (2004) indicam que o modelo k- ϵ pode prever com precisão a distribuição de velocidades e a formação de zonas de recirculação dentro do leito, fornecendo uma base sólida para a otimização de parâmetros operacionais.

O modelo k- ω , por sua vez, desenvolvido por Wilcox (1988), é conhecido por sua precisão em regiões próximas às paredes e em condições de fluxo em regime transitório. Esse modelo utiliza as equações de energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação específica (ω), permitindo uma simulação detalhada das interações turbulentas. Estudos posteriores de Wilcox (2008) mostraram que o modelo k- ω consegue prever com precisão a distribuição de velocidades e a formação de vórtices dentro do leito, proporcionando uma base sólida para a otimização do processo.

Dentre os diversos modelos que podem ser utilizados e disponíveis no software FLUENT, neste estudo optou-se pelo modelo k- ϵ . Tal decisão baseia-se na natureza específica do fluxo em questão, os fenômenos nas regiões próximas à parede não são o foco principal. Batista (2017) corrobora essa escolha, indicando que o modelo k- ϵ é mais adequado quando a concentração da fase secundária é baixa, como ocorre no canal de jorro. Nessas condições, as colisões entre partículas são menos significativas, e a turbulência da fase primária predomina no comportamento do escoamento. O modelo k- ϵ padrão é utilizado para descrever a turbulência da fase primária, com termos adicionais que capturam a transferência de momento entre as fases.

A teoria de Tchen, (Hinze,1975), caracteriza-se pela abordagem da dispersão de partículas em fluxos turbulentos. Essencialmente, a teoria propõe que a energia cinética das partículas está diretamente ligada à agitação do fluido.

3.1.6.1 Turbulência na fase fluida

No modelo padrão de turbulência para a fase dispersa, a equação que descreve o tensor de tensões de Reynolds, que é inserido na equação de conservação do momento para a fase fluida, corresponde à equação 32:

$$\bar{\tau}_f = -\frac{2}{3}(\rho_f \alpha_f \kappa_f + \alpha_f \rho_f \mu_{f,t} \nabla \cdot \vec{v}_f) \bar{I} + \alpha_f \rho_f \mu_{f,t} (\nabla \vec{v}_f + (\nabla \vec{v}_f^T)) \quad (32)$$

onde:

κ_f - energia cinética turbulenta;

$\mu_{f,t}$ - viscosidade turbulenta.

A viscosidade turbulenta é função da energia cinética da fase fluida:

$$\mu_{f,t} = \rho_f C_\mu \frac{\kappa_f^2}{\varepsilon_f} \quad (33)$$

onde:

ε_f - taxa de dissipação de energia;

C_μ - parâmetro da turbulência ($C_\mu=0,09$).

Os efeitos da turbulência na fase fluida são obtidos através das equações 34 e 35:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \alpha_f \kappa_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \kappa_f \vec{v}_f) = \nabla \cdot \left(\alpha_f \frac{\mu_{f,t}}{\sigma_k} \nabla \kappa_f \right) + \alpha_f G_{\kappa,f} - \rho_f \alpha_f \varepsilon_f + \rho_f \alpha_f \Pi_{\kappa,f} \quad (34)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \alpha_f \varepsilon_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \varepsilon_f \vec{v}_f) = \nabla \cdot \left(\alpha_f \frac{\mu_{f,t}}{\sigma_k} \nabla \varepsilon_f \right) + \alpha_f \frac{\varepsilon_f}{k_f} (C_1 G_{\kappa,f} - C_2 \rho_f \varepsilon_f) + \rho_f \alpha_f \Pi_{\varepsilon,f} \quad (35)$$

onde:

$\Pi_{\kappa,f}$ - influência da fase dispersa na propriedade κ fase fluida;

$\Pi_{\varepsilon,f}$ - influência da fase dispersa na propriedade ε fase fluida, e

$G_{\kappa,f}$ - termo de geração de energia cinética turbulenta.

C_1 - parâmetro da turbulência ($C_1=1,44$).

C_2 - parâmetro da turbulência ($C_2=1,92$).

Os termos $\Pi_{\kappa,f}$, $\Pi_{\varepsilon,f}$ e $G_{\kappa,f}$ são obtidos a partir das equações:

$$\Pi_{\kappa,f} = \frac{K_{fs}}{\alpha_f \rho_f} (\kappa_{fs} - 2\kappa_f + \vec{v}_{fs} \cdot \vec{v}_{dr}) \quad (36)$$

$$\Pi_{\varepsilon,f} = C_3 \frac{\varepsilon_f}{\kappa_f} \Pi_{\kappa,f} \quad (37)$$

$$G_{\kappa,f} = \frac{\mu_{f,t} (\nabla \vec{v}_f + (\nabla \vec{v}_f)^T)}{\nabla \vec{v}_f} \quad (38)$$

onde:

K_{fs} - coeficiente de troca de quantidade de movimento entre fases;

κ_{fs} - covariância entre a velocidade de flutuação das duas fases;

$\vec{v}_{fs}$ - velocidade relativa;

$\vec{v}_{dr}$ - velocidade *drift*;

C_3 - parâmetro da turbulência ($C_3=1,3$).

3.1.6.2 Turbulência na fase particulada

Os coeficientes que descrevem a dispersão das partículas, bem como as funções que correlacionam essas partículas e a energia cinética associada à sua turbulência, são analisados com base no comportamento turbulento da fase contínua principal. Isso é feito utilizando escalas temporais específicas para entender como os movimentos oscilatórios das partículas interagem com o fluxo contínuo.

O tempo típico necessário para uma partícula ser capturada em um vórtice, devido ao movimento fluido contínuo e considerando a inércia da fase dispersa, é expresso pela equação:

$$\tau_{F,sf} = a_s \rho_s K_{fs}^{-1} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} + C_V \right) \quad (39)$$

onde:

C_V - parâmetro da turbulência ($C_V = 0,5$).

O tempo de interação entre o vórtice e a partícula é definido pela equação:

$$\tau_{t,sf} = \frac{\tau_{t,s}}{\sqrt{(1+C_\beta \xi^2)}} \quad (40)$$

sendo:

$$\xi = \frac{|\vec{v}_{fs}| t_s}{L_{t,f}} \quad (41)$$

$$C_\beta = 1,8 - 1,35 \cos^2 \theta \quad (42)$$

onde:

θ - ângulo entre a velocidade média da partícula e a velocidade relativa.

A razão entre o tempo de interação vórtice-partícula e o tempo de entrada da partícula é definida como:

$$\eta_{sf} = \frac{\tau_{t,fs}}{\tau_{F,fs}} \quad (43)$$

Simonin e Viollet (1990) estabeleceram as previsões para as quantidades turbulentas na fase dispersa. Essas previsões são demonstradas nas seguintes equações:

$$\kappa_s = \kappa_f \left(\frac{b^2 + \eta_{sf}}{1 + \eta_{sf}} \right) \quad (44)$$

$$\kappa_{sf} = 2\kappa_f \left(\frac{b+1}{1+\eta_{sf}} \right) \quad (45)$$

$$D_{t,sf} = \frac{1}{3} \kappa_{sf} \tau_{t,sf} \quad (46)$$

$$D_s = D_{t,sf} + \left(\frac{2}{3} \kappa_s - b \frac{1}{3} \kappa_{sf} \right) \tau_{F,sf} \quad (47)$$

$$b = (1 + C_v) \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} + C_v \right)^{-1} \quad (48)$$

4 METODOLOGIA

Nesta seção, foram descritas as etapas de execução do trabalho. Primeiramente, realizou-se a análise da fluidodinâmica do leito de jorro, na qual são avaliados aspectos geométricos do equipamento e o efeito da altura de leito estático sobre a fluidodinâmica do leito (parâmetros das simulações e refino da malha). Em seguida, para o estudo fluidodinâmico do leito de jorro, utilizou-se os dados reais obtidos na literatura, essencialmente nos trabalhos de Arrotéia *et al.* (2017), Batista (2017) e Artur *et al.* (2018). O domínio e a malha computacional adotados foram aplicados em todas as etapas do trabalho, o qual foi desenvolvido na sua totalidade no Centro Universitário FEI.

4.1 INFRAESTRUTURA COMPUTACIONAL E O SOFTWARE EMPREGADO

Neste estudo, as simulações de (CFD) foram conduzidas com o software FLUENT 2023 R2. Para resolver as equações diferenciais do modelo, o software emprega a formulação do Método de Volumes Finitos. A geometria computacional foi criada utilizando o software ANSYS *SpaceClaim*, a discretização da malha foi criada no *Mesh* do ANSYS WORKBENCH que possui integração com o ANSYS FLUENT. Além disso, as simulações CFD foram executadas em dois computadores. A Tabela 1 apresenta um resumo do hardware utilizado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 1 - Detalhamento dos componentes utilizados nos computadores

Fabricante	Processador	Núcleos	Processador Gráfico	Memória RAM	Sistema operacional
SuperMicro	2 x Intel Xeon E5-2640 V4	2 x 10	Nvidia GTX 1060 8GB	128 GB - ECC	Windows 11 Education 64 bits
Razor	AMD Ryzen 5950X	16	Nvidia RTX A 2000 8GB	128 GB	Windows 11 Education 64 bits

Fonte: Autor

4.2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O estudo apresentado por Artur *et al.* (2018) emprega uma metodologia que envolveu o uso de CFD para descrever o comportamento de um leito de jorro utilizando sementes de linhaça. O estudo apresenta perfis da dinâmica do escoamento fluidodinâmico no interior do leito em função da velocidade do ar. Além disso, realizam uma análise detalhada do comportamento fluidodinâmico de leitos de jorro, utilizando o modelo Euleriano Granular Multifásico e enfatizando parâmetros como velocidade mínima de jorro, queda de pressão e porosidade do leito. Entretanto, aspectos importantes para a caracterização completa da dinâmica do sistema não foram explicitamente mencionados, como o modelo de turbulência utilizado e o coeficiente de restituição, que desempenha um papel essencial na modelagem das interações entre partículas. A ausência desses parâmetros limita a capacidade de reprodução e análise comparativa dos resultados apresentados, uma vez que tais fatores são cruciais para capturar de forma mais precisa os fenômenos de escoamento e colisão entre partículas.

Os modelos de turbulência são fundamentais para simular com precisão o comportamento dos fluidos em condições turbulentas. A escolha do modelo adequado pode ter um impacto significativo nos resultados e na sua validade. No entanto, o estudo não fornece uma explicação detalhada sobre os motivos que levaram à escolha do modelo de turbulência específico utilizado.

Outro parâmetro essencial dos estudos computacionais de leitos de partículas é o coeficiente de restituição (e_{ss}), que caracteriza a quantidade de energia perdida durante as colisões entre partículas. Este coeficiente é a base para modelar com precisão o comportamento das partículas em simulações em CFD. No entanto, determinar com precisão o coeficiente de restituição é difícil e pode variar significativamente dependendo das propriedades do material utilizado. Fatores como umidade, temperatura e a própria composição do material podem influenciar essa variação, tornando a obtenção de um valor exato ainda mais complexa.

Como mencionado anteriormente, Artur *et al.* (2018) não apresentaram o valor do coeficiente de restituição utilizado, nem forneceram uma análise detalhada sobre como esse parâmetro foi obtido ou como ele varia entre os diferentes materiais estudados. Em um estudo conduzido por Straatmann *et al.* (2017), foram analisados diferentes valores para o coeficiente de restituição, sendo eles 0,5, 0,6 e 0,7. Assim, o valor empregado nas simulações deste trabalho foi inicialmente de 0,50.

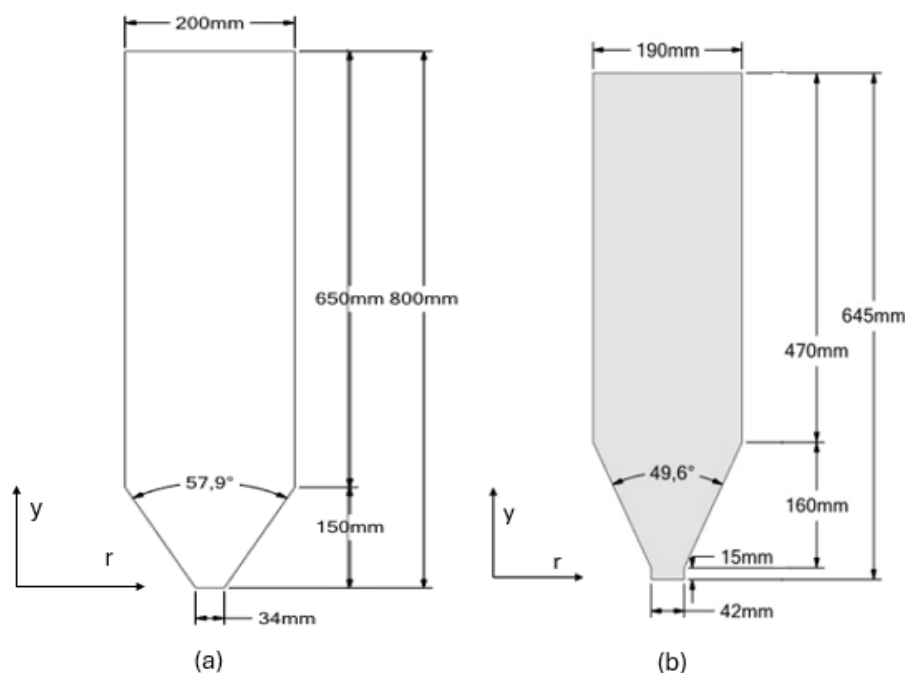
Finalmente, a geração e a qualidade da malha usada em simulações de computador também impactam na qualidade dos resultados das simulações. Assim, a malha deve ser refinada o suficiente para capturar todos os fenômenos relevantes sem tornar o problema computacionalmente inviável. Artur *et al* (2018) discutem a malha utilizada, mas não fornece detalhes completos sobre a convergência e independência da malha, aspectos fundamentais para garantir a precisão dos resultados numéricos.

Assim, as simulações realizadas nesta primeira etapa do estudo tiveram como objetivo reproduzir os por Artur *et al* (2018) e avaliar a fluidização da semente de linhaça em um leito de jorro, utilizando a abordagem Euler-Euler. Para atingir esse objetivo, foram realizadas simulações utilizando no lugar dos parâmetros não descritos por Artur *et al.* (2018) as considerações supracitadas, comparando-se os valores obtidos com os disponíveis na literatura.

Posteriormente, uma vez determinado os melhores parâmetros para descrever a fluidização da linhaça em leito de jorro, modificou-se a geometria para a do leito piloto experimental, objeto principal deste trabalho.

Todas as simulações foram realizadas considerando as geometrias básicas dos leitos de jorro, conforme ilustradas na Figura 8.

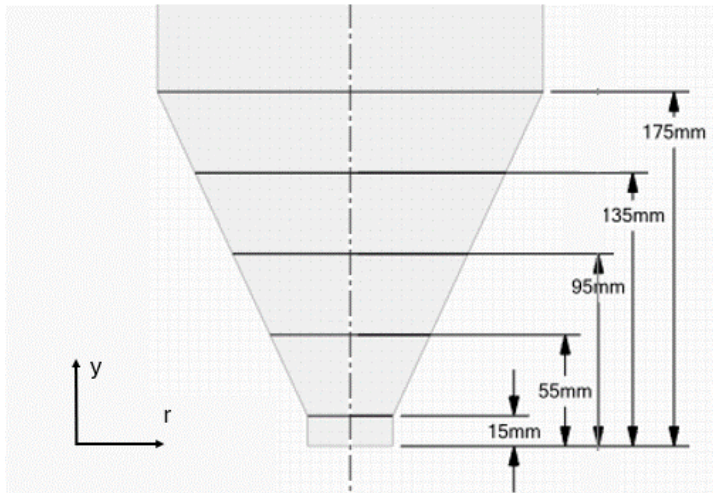
Figura 8 - Descrição das dimensões dos leitos de jorros utilizados: (a) sistema de Artur *et al.* (2018) e (b) leito piloto.



Fonte: Autor.

A Figura 9 ilustra as diferentes regiões de análise do comportamento da velocidade do ar em diferentes alturas levando em consideração um eixo de simetria.

Figura 9 - Representação de posições axiais analisadas do equipamento estudado



Fonte: Autor.

4.2.1 Malha computacional

A geometria e a malha computacional foram desenvolvidas utilizando o pacote Ansys. Primeiramente, foram realizados testes para avaliar as características das malhas, comparando os resultados simulados para diversas configurações de malha com uma velocidade de ar fixa de 5 m.s^{-1} . Na região cônica, foi utilizada uma malha bidimensional com células quadrilaterais e espaçamento entre nós de 0,0005 m.

Para analisar a independência da malha na solução numérica, foi obtido o perfil pontual de velocidade axial do ar na alimentação do leito de jorro para cada refinamento da malha.

4.2.2 Parâmetros e propriedades do modelo

Os parâmetros e propriedades da fase sólida e fluida utilizados nas simulações estão detalhados na Tabela 4.

Tabela 2 - Parâmetros e propriedades das fases aplicadas às simulações.

Parâmetros	Descrição	Fonte	Valor
α_s	Fração volumétrica de sólidos para o leito empacotado	Arrotéia, <i>et al</i> (2017)	0,55
φ	Esfericidade	Arrotéia, <i>et al</i> (2017)	0,605
ρ_s (kg m ⁻³)	Massa específica da linhaça	Arrotéia, <i>et al</i> (2017)	1.105
d_s (mm)	Diâmetro da linhaça	Arrotéia, <i>et al</i> (2017)	2,19
e_{ss}	Coeficiente de Restituição	Straatmann <i>et al.</i> (2017) – Utilizado na verificação das simulações de Artur <i>et al</i> (2018)	0,50
		Santos (2011) – utilizado na reprodução do comportamento do leito experimental.	0,9
H_L (m)	Altura do Leito	Artur <i>et al</i> (2018)	0,20
		Experimental	0,25 e 0,29
ρ_f (kg m ⁻³)	Massa específica do ar	Arrotéia, <i>et al</i> (2017)	1,194
μ_f (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Viscosidade do ar	Arrotéia, <i>et al</i> (2017)	1,81x10 ⁻⁵

Fonte: Autor

4.2.3 Modelagem matemática e solução numérica

Neste trabalho, as simulações CFD foram realizadas empregando o software FLUENT 2023 R2, na qual são disponíveis diversos modelos e parâmetros de simulação.

A Tabela 2 apresenta os modelos, parâmetros e condições de controle utilizadas na simulação para estudo da fluidodinâmica do leito de jorro com sementes de linhaça.

Tabela 3 - Modelos e parâmetros utilizados na solução numérica aplicados às simulações para investigar a fluidodinâmica do leito de jorro com sementes de linhaça.

Condições de Contorno	Entrada do sistema: condição de velocidade do ar prescrita. Posição de saída: condição de pressão prescrita. Parede: condição de não deslizamento para ambas as fases.
Método de Solução	Esquema de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE. Interpolação: Upwind 1ª ordem. Formulação Transiente: Implícita de 1ª ordem.
Critério de Convergência	Equação continuidade e movimento: 0,001
Modelo de Turbulência	κ - ϵ padrão para fase dispersa (<i>default</i>)
Modelo de Mistura	Euleriano Granular Multifásico
Viscosidade Granular	Gidaspow - (Artur <i>et al.</i> , 2018)
Viscosidade Bulk Granular	Lun <i>et al</i> - (Artur <i>et al.</i> , 2018)
Passo no tempo	0,001 s
Número de passos no tempo	8000
Número máx. de iterações por passo	200
Parâmetro de relaxação	Pressão: 0,20 Densidade: 1 Forças de Corpo: 1 Temperatura granular: 0,20 Quantidade de movimento: 0,20 Fração de volume: 0,50

Fonte: Autor.

O método de solução SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) acima descrito é reconhecido como uma abordagem eficaz e amplamente empregada para a resolução das equações de Navier-Stokes, que são essenciais na modelagem do fluxo de fluidos. Esta técnica foi proposta por Spalding e Patankar (1972) e tem desempenhado um papel fundamental na progressão das simulações de fluidos, graças à sua precisão e eficiência (Patankar, 1980).

O SIMPLE adota uma estratégia iterativa para solucionar as equações de Navier-Stokes, especialmente aquelas que associam pressão e velocidade em um campo de fluxo. Ele emprega um método semi-implícito que possibilita a divisão do problema em subproblemas menores e mais gerenciáveis. Conforme Versteeg e Malalasekera (2007), o SIMPLE é vital

para assegurar a convergência e a estabilidade das soluções numéricas, aspectos fundamentais em aplicações industriais, como no *design* aerodinâmico de veículos e aeronaves.

Uma das principais características do método SIMPLE é sua habilidade para tratar fluxos incompressíveis, onde a pressão tem um papel crucial na definição dos campos de velocidade. A técnica de correção de pressão, um dos pilares do SIMPLE, ajusta de forma iterativa os campos de pressão e velocidade até que a continuidade seja alcançada, garantindo assim a conservação da massa em cada célula do domínio de cálculo. Este processo iterativo é descrito em detalhes por Maliska (2004), que destaca a robustez e a adaptabilidade do método em diferentes tipos de malhas e condições de contorno.

Para tratamento dos resultados obtidos por meio das simulações CFD, os dados foram avaliados através de gráficos, contornos e perfis gerados pelo software FLUENT 2023 R2.

4.2.4 Mecanismo experimental

Na parte experimental deste trabalho, foi utilizado o equipamento de leito de jorro, localizado nas dependências do Centro de Laboratório de Química do Centro Universitário - FEI. As dimensões do equipamento são idênticas às utilizadas nas simulações deste estudo, conforme ilustrado na Figura 8. A Figura 10 apresenta uma visão detalhada do equipamento empregado na parte experimental, que foi essencial para avaliar as condições propostas nas simulações em CFD.

O equipamento é composto por diversos componentes que trabalham em conjunto para garantir um funcionamento eficiente e preciso. Entre eles, destaca-se o transportador helicoidal de descarga, que facilita a remoção dos materiais processados; a válvula direcionadora, que regula o fluxo para o leito de jorro; e o próprio leito de jorro, que é a estrutura central do sistema, onde ocorre a interação entre o ar e os sólidos. Outros elementos importantes incluem o frasco coletor de finos, que permite a coleta de partículas que não são aproveitadas no processo, o filtro, que assegura a remoção de impurezas do ar, e o transporte helicoidal na alimentação, que transporta o material para o sistema de forma contínua e controlada. Por fim, o silo de alimentação armazena o material a ser processado, enquanto o painel de comando proporciona o controle e monitoramento de todas as operações.

Figura 10 - Leito de jorro utilizado na parte experimental



Fonte: Autor.

Além disso, os cones em aço inox do equipamento são equipados com pontos de coleta de pressão, os quais estão conectados a sensores de pressão diferencial. Esses sensores são fundamentais para a mensuração precisa da pressão e da velocidade do ar insuflado na base do leito, permitindo um acompanhamento detalhado das condições operacionais. A coleta desses dados é crucial para a validação das simulações em CFD, pois possibilita a comparação entre os resultados experimentais e os previstos, garantindo a confiabilidade das análises realizadas neste trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados e discussões deste trabalho.

5.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES DISPONÍVEIS NA LITERATURA

Os resultados da fluidodinâmica do leito de jorro operando com sementes de linhaça são apresentados nesta seção. O estudo de Artur *et al.* (2018) apresenta uma contribuição relevante na área de estudos fluidodinâmicos, especialmente ao explorar diferentes materiais orgânicos e inertes em leitos de jorro bidimensionais. A análise detalhada de suas simulações permitiu validar as condições de operação e os resultados obtidos no presente estudo, empregando-se um leito de 0,20 m de altura e dimensões de malha de 0,5mm, reforçando a confiabilidade do modelo matemático e do procedimento numérico adotados (Tabela 2). Ademais, o enfoque de Artur *et al.* (2018) em características específicas como o comportamento fluidodinâmico e a distribuição de partículas no leito forneceu subsídios teóricos e comparativos fundamentais para a discussão dos resultados.

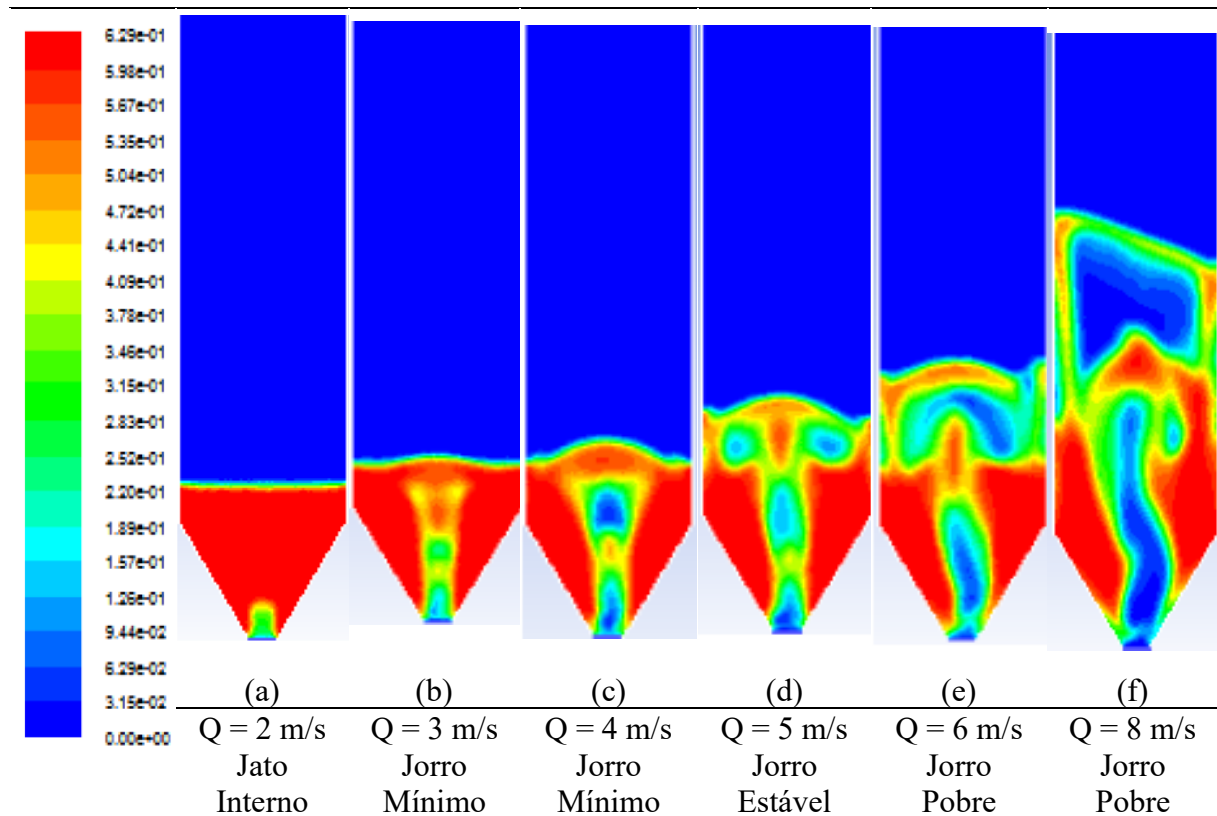
Já os parâmetros geométricos das sementes de linhaça, necessários para as simulações, foram obtidos com base nos dados experimentais descritos por Arrotéia *et al.* (2017) e apresentados na Tabela 4. Este estudo destaca-se pela investigação aprofundada do processo de secagem da linhaça em sistemas de leito fluidizado e de jorro, proporcionando informações sobre as propriedades físicas e o comportamento térmico das sementes. Apesar da diferença na geometria do leito adotada em relação ao presente estudo, os dados experimentais fornecidos por foram essenciais para parametrizar corretamente o modelo numérico e garantir a precisão das simulações. Vale ressaltar que a abordagem experimental robusta utilizada pelos autores confere alta confiabilidade aos dados empregados.

Já a validação experimental e a concordância entre os resultados disponíveis na literatura foram objetos deste estudo, realizadas com base nos experimentos conduzidos no laboratório, utilizando a altura de leito de 0,250 m, o que assegura a reprodutibilidade e a aderência aos cenários propostos.

5.2 CONCORDÂNCIA DAS SIMULAÇÕES COM A LITERATURA

A Figura 11 apresenta as condições de simulação utilizadas por Artur et al. (2018), enquanto a Figura 12 exibe os perfis de porosidade do leito de jorro com os parâmetros geométricos correspondentes a um leito de linhaça com altura de 0,20 m (Figura 8a). Com o incremento da velocidade, percebe-se a transição do leito de um estado de jorro mínimo para um jorro estável, até que, em velocidades elevadas, o leito apresente um jorro instável, em ambas as figuras.

Figura 11 - Fração volumétrica da linhaça estudada em diferentes velocidades para um leito de semente de linhaças com 0,20 m de altura a partir da base.

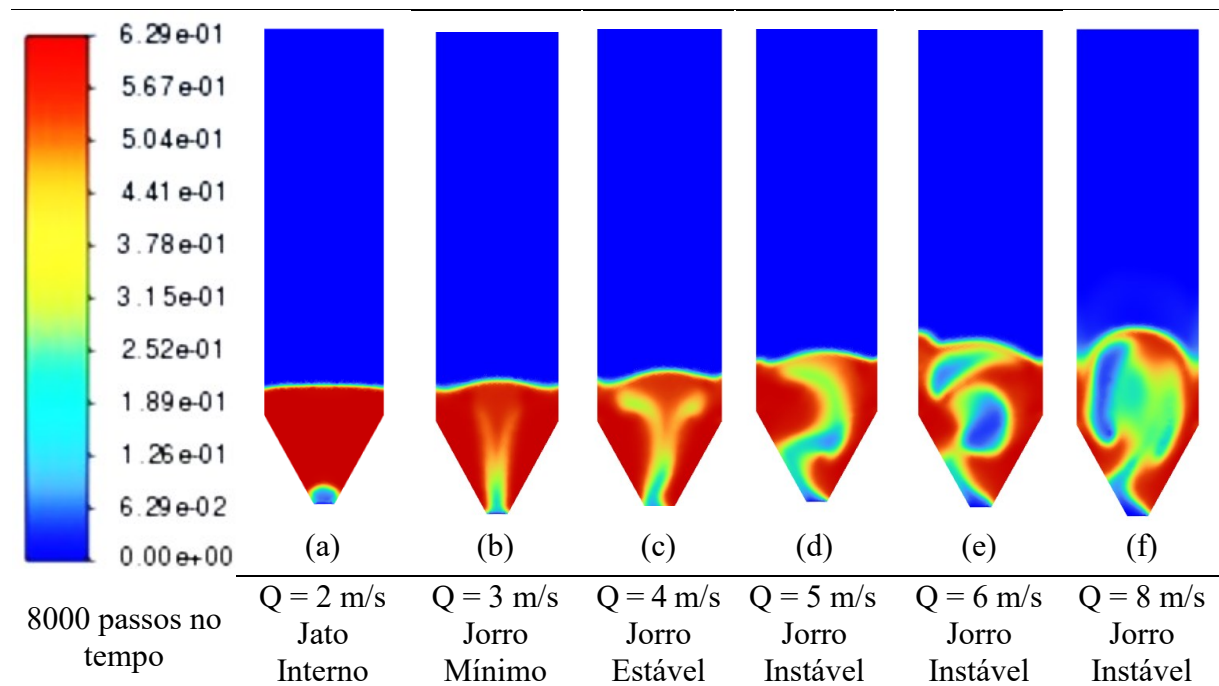


Fonte: Autor “adaptado de” de Artur, 2018, p. 06.

Apesar de a pesquisa de Artur (2018) evidenciar as transições do leito de jorro conforme a figura 11, pode-se notar uma pequena mudança no regime do leito onde a regime da Figura 11 (b) pode ser definida ainda como jato interno, (c) como jorro mínimo e (d) como jorro estável, de acordo com Mathur e Epstein, (1974), e os frames (e) e (f) como jorro instável/pobre.

Na Figura 12, pode-se observar a transição de regimes de operação do leito, iniciando pela área de jato interno (a), progredindo para a fase de jorro mínimo, evidenciada em (b). Posteriormente, há uma tentativa de formação de um jorro estável, que é indicada nos frames (b) e (c) das mesmas figuras.

Figura 12 - Fração volumétrica da linhaça em diferentes velocidades do ar para um leito de semente de linhaças com 0,20m de altura a partir da base.



Fonte: Autor.

Os resultados observados em (d), (e) e (f) são caracterizados como instáveis pois não é possível a visualização de forma precisa a região caracterizada como jorro estável.

Comparando-se os resultados com os de Artur *et al.* (2018), conclui-se que as tentativas em o reproduzir podem ser consideradas satisfatórias, pois apresentam comportamentos semelhantes na seção central do leito até a velocidade em que ocorre o escape do ar na superfície do leito, além de uma não simetria axial do leito, conforme comparação com a Figura 11.

Observa-se que, apesar das diferenças nos perfis de fluidização, a velocidade mínima de jorro em ambos os casos é similar, situando-se entre 4 e 5 m/s, e que o jorro se torna instável a partir de 6 m/s para uma altura de leito inicial de 0,20 m.

Conclui-se que os critérios necessários para realizar as simulações no FLUENT, selecionados arbitrariamente devido à ausência de detalhes em Artur *et al.* (2018), foram

conclusivos na obtenção dos resultados apresentados e serão utilizados nas simulações com o leito de jorro em escala piloto. Assim, os critérios “desconhecidos” considerados adequados para reproduzir a fluidização da linhaça estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 - Critérios desconhecidos

Descrição	Parâmetros	Valor
Modelo de turbulência	k-ε disperso	-
Coefficiente de Restituição	Interação sólido-sólido	0,50

Fonte: Autor.

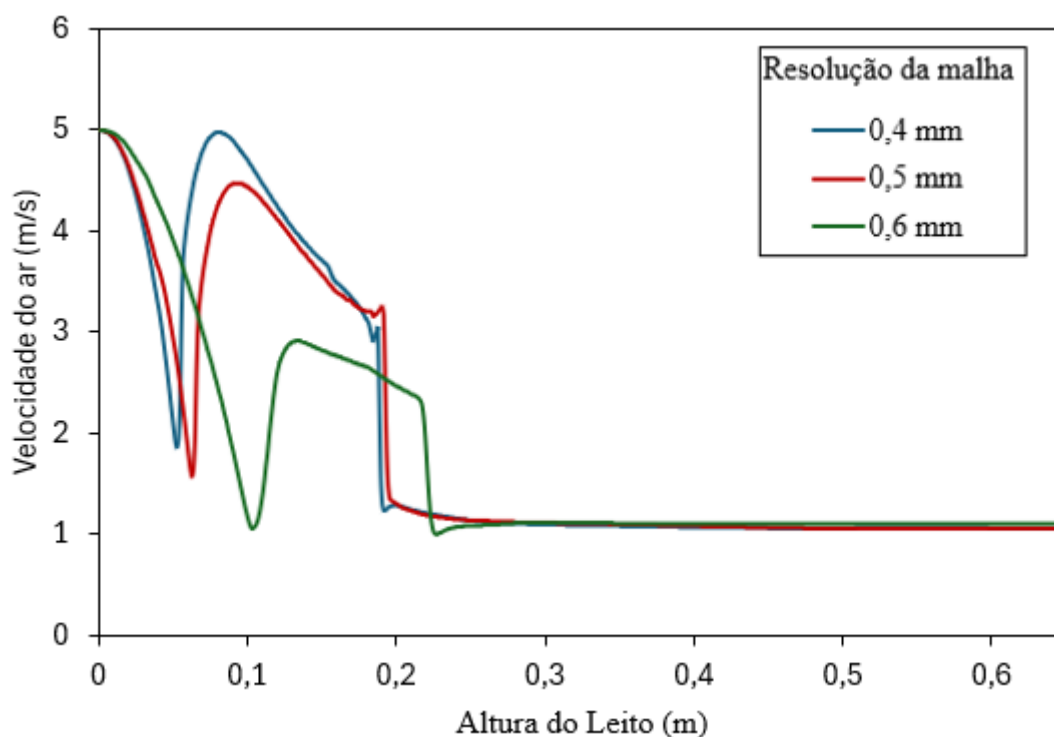
5.3 SIMULAÇÕES DO LEITO DE JORRO PILOTO

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações do leito de jorro em escala piloto.

5.3.1 Refinamento da malha

Com o objetivo de avaliar a independência da malha na solução numérica, registrou-se o perfil pontual de velocidade do ar na alimentação para cada refinamento da malha na região cilíndrica, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Velocidade da linhaça ao longo do eixo para diferentes malhas



Fonte: Autor.

Os valores de espaçamento entre nós, o número de células e o tempo de simulação estão listados na Tabela 3.

Tabela 5 - Características das malhas simuladas.

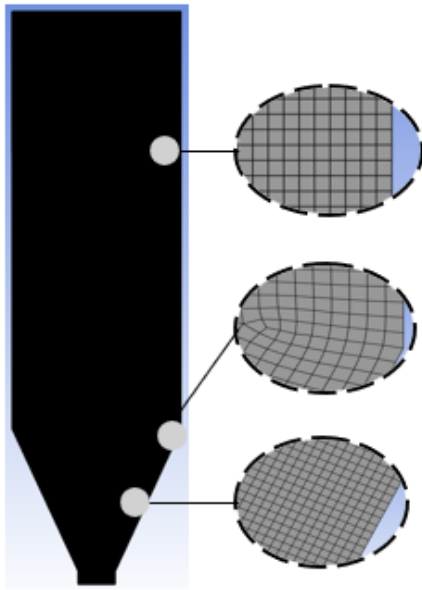
Malha	Espaçamento entre nós (m)	N Células	Tempo de simulação (h)
0,40	0,00040	678.112	46,91
0,50	0,00050	433.941	23,19
0,60	0,00060	301.562	16,28

Fonte: Autor.

A partir da Figura 13, observa-se que a malha denominada 0,50 (0,50 mm) apresenta um perfil de velocidade semelhante ao da malha mais refinada 0,40 (0,40 mm), com um tempo de simulação próximo ao das malhas menos refinadas 0,60 (Tabela 3). Portanto, a malha 0,50 foi escolhida para ser utilizada nas simulações deste trabalho.

A Figura 14 mostra as características da malha 0,50m que, devido ao seu refinamento, o dimensionamento da malha não é possível de ser observado sem ampliação da imagem.

Figura 14 - Características da malha utilizada

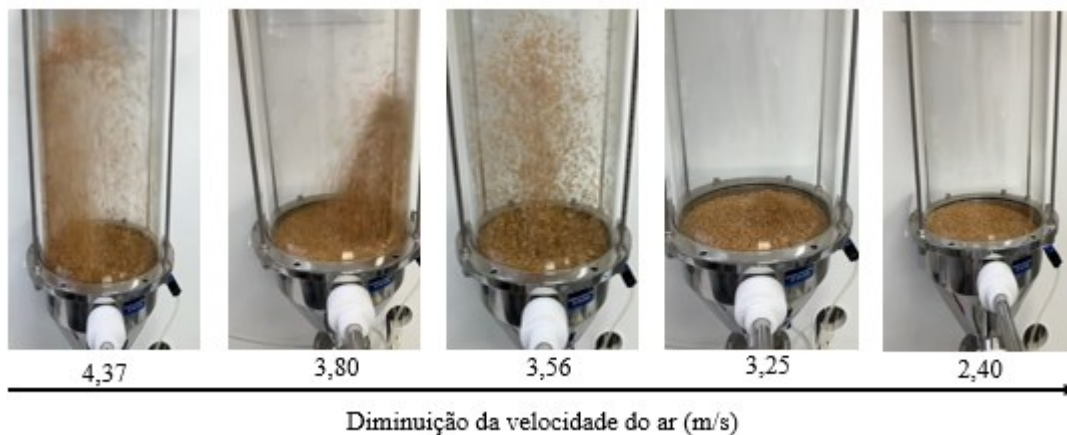


Fonte: Autor.

5.3.2 Comparação dos resultados simulados e experimentais

Experimentos práticos realizados no leito de jorro em escala piloto, cujo comportamento visual pode ser observado na Figura 15, demonstram que a fluidização não é simétrica, provavelmente devido ao formato irregular das partículas de linhaça, corroborando com os resultados das simulações anteriores apresentadas.

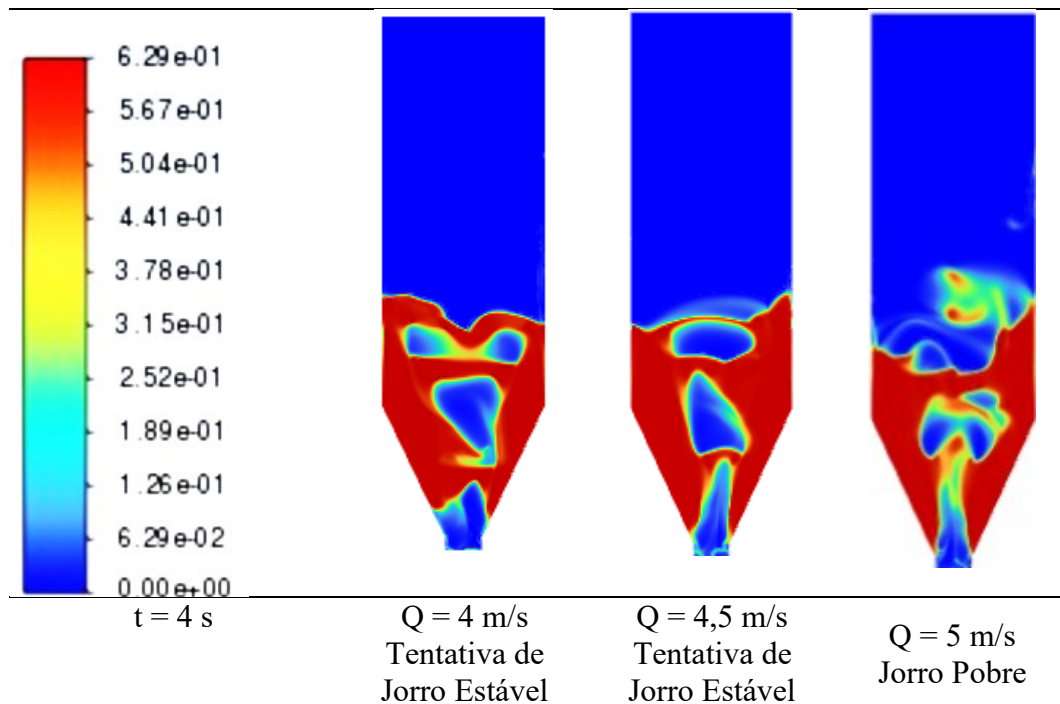
Figura 15 - Resultado visual experimental com sementes de linhaça durante a desfluidização do leito de 0,25m de altura estática inicial.



Fonte: Autor.

Já a Figura 16 mostra os resultados das simulações obtidos para a mesma altura inicial de leito de linhaça de 0,25 m e com o coeficiente de restituição de 0,5. Essa modificação da altura do leito se fez necessário para melhor visualização da fluidização devido a parte inferior do leito de jorro não ser transparente.

Figura 16 - Resultado da simulação experimental com sementes de linhaça utilizando o e_{ss} de 0,50 com H_L de 250mm.



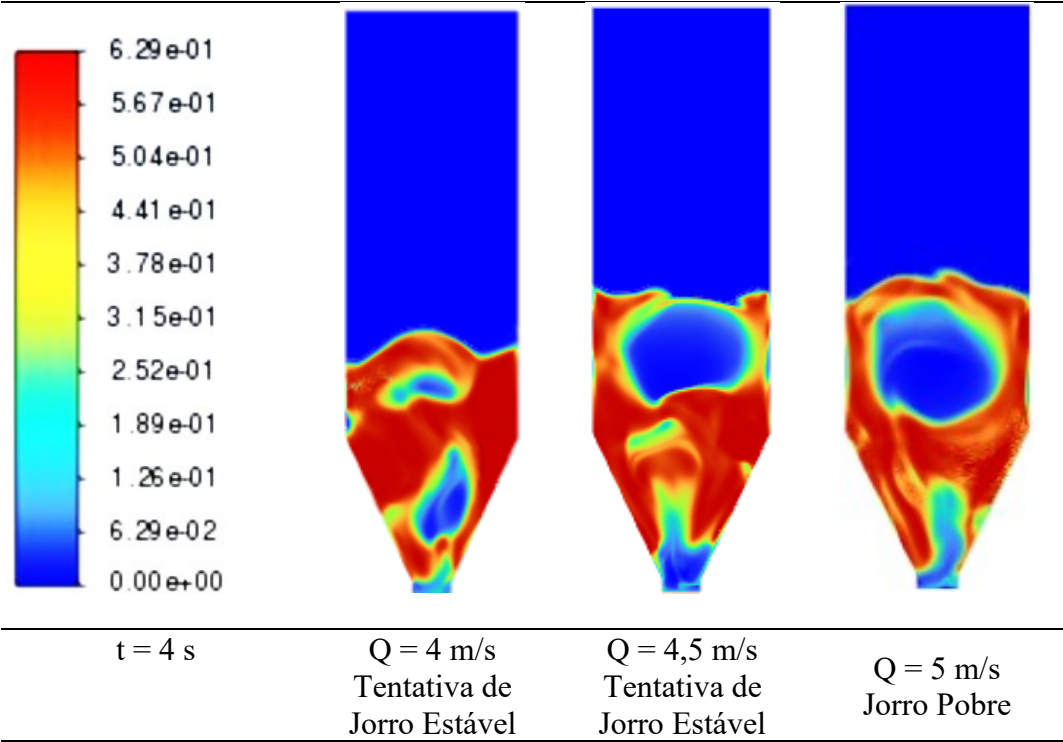
Fonte: Autor.

Ao comparar os resultados obtidos da Figura 15 (leito experimental) com os da Figura 16 (simulação), nota-se uma diferença no comportamento da fluidização (jorro) das partículas de linhaça. Diante desta observação, optou-se por realizar uma nova simulação com os mesmos parâmetros utilizados na Tabela 4, para realizar um comparativo com a parte experimental utilizando coeficiente de restituição de 0,90. A escolha de um coeficiente de restituição de 0,9 na simulações CFD é justificada por permite uma representação mais realista das colisões entre partículas, estudos experimentais, como os realizados por Santos (2011), demonstram que valores próximos a 1 são adequados para simular o comportamento de partículas em sistemas onde a perda de energia é mínima.

A Figura 17 mostra os resultados das simulações realizadas no FLUENT para o leito de jorro utilizando o coeficiente de restituição no valor de 0,90. Os resultados demonstraram uma correlação direta entre o coeficiente de restituição e a eficiência do leito de jorro. Especificamente, quando o coeficiente de restituição se aproximou de 1, observou-se uma

melhor fluidização das sementes de linhaça, resultando em uma distribuição mais uniforme e estável das partículas dentro do leito similares às observadas na parte experimental.

Figura 17 - Resultado da simulação experimental com sementes de linhaça utilizando o e_{ss} de 0,90 com H_L de 250mm.

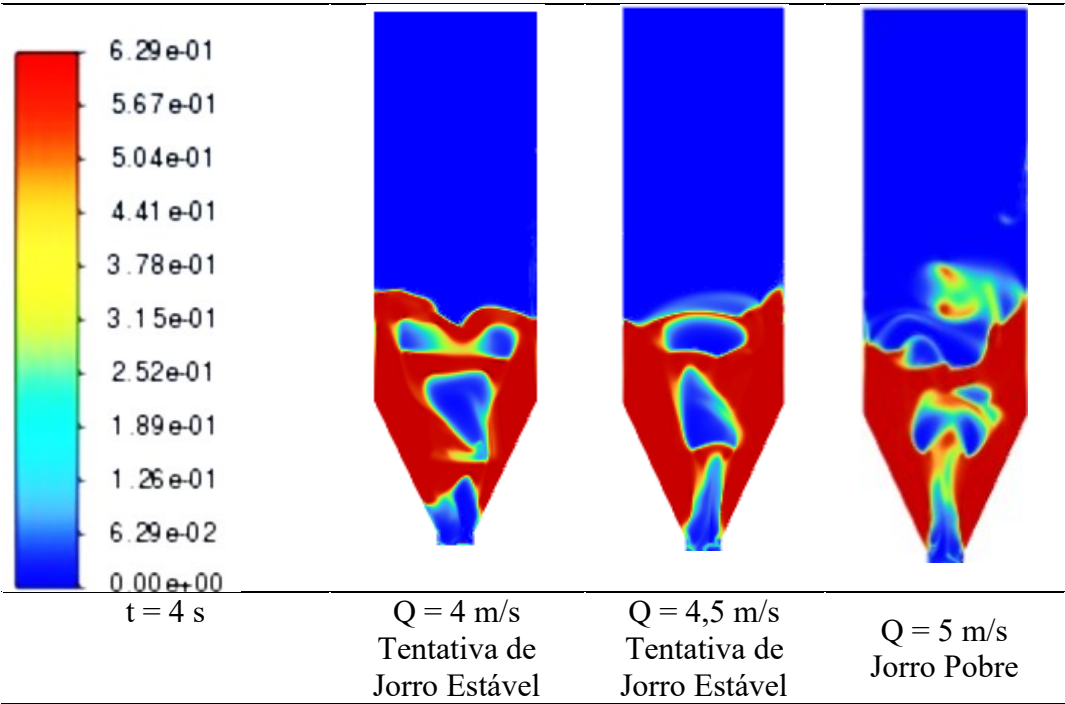


Fonte: Autor.

As sementes de linhaça exibiram trajetórias mais previsíveis e uma menor tendência à formação de canais, o que está alinhado com descobertas de autores como Kunii e Levenspiel (1991), que destacam a importância de colisões elásticas para a estabilidade do leito. Estudos adicionais de Almeida e Rocha (2002) e Reis (2011) também corroboram que colisões elásticas entre partículas melhoram a eficiência de fluidização e a estabilidade dinâmica do leito de jorro.

Já a Figura 18 mostra os resultados das simulações obtidos para a mesma altura inicial de leito de linhaça, mas com a alteração do coeficiente de restituição para o valor de 0,50.

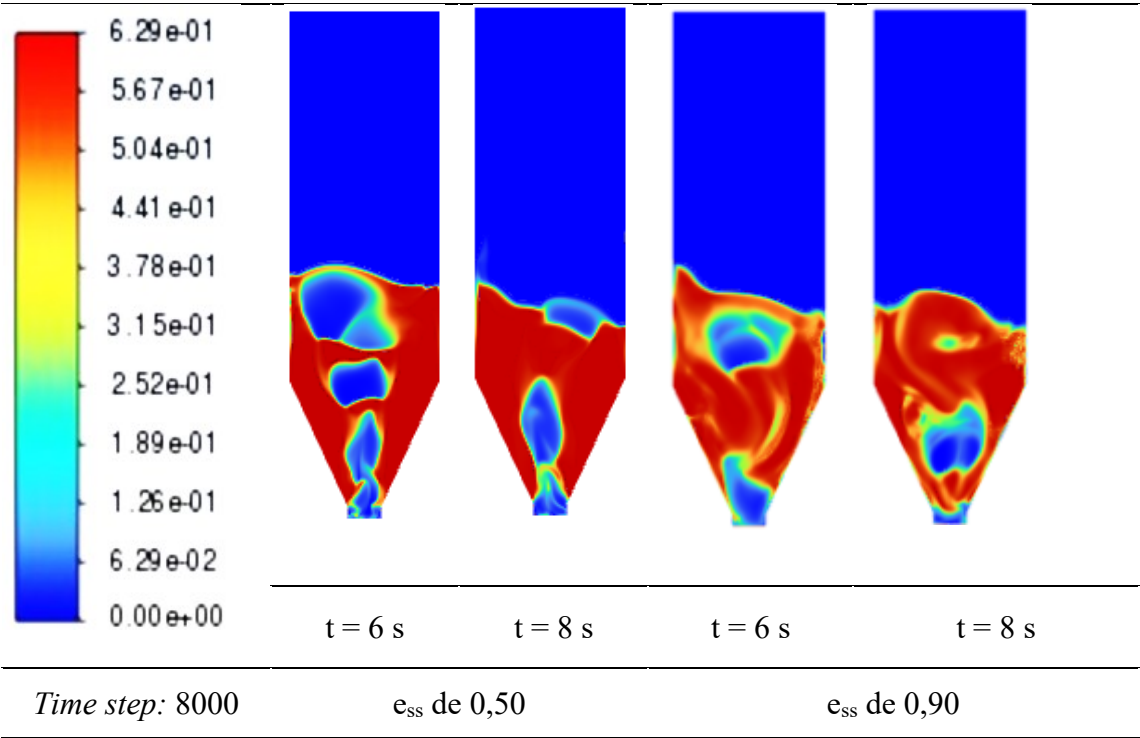
Figura 18 - Resultado da simulação experimental com sementes de linhaça utilizando o e_{ss} de 0,50 com H_L de 250mm.



Fonte: Autor.

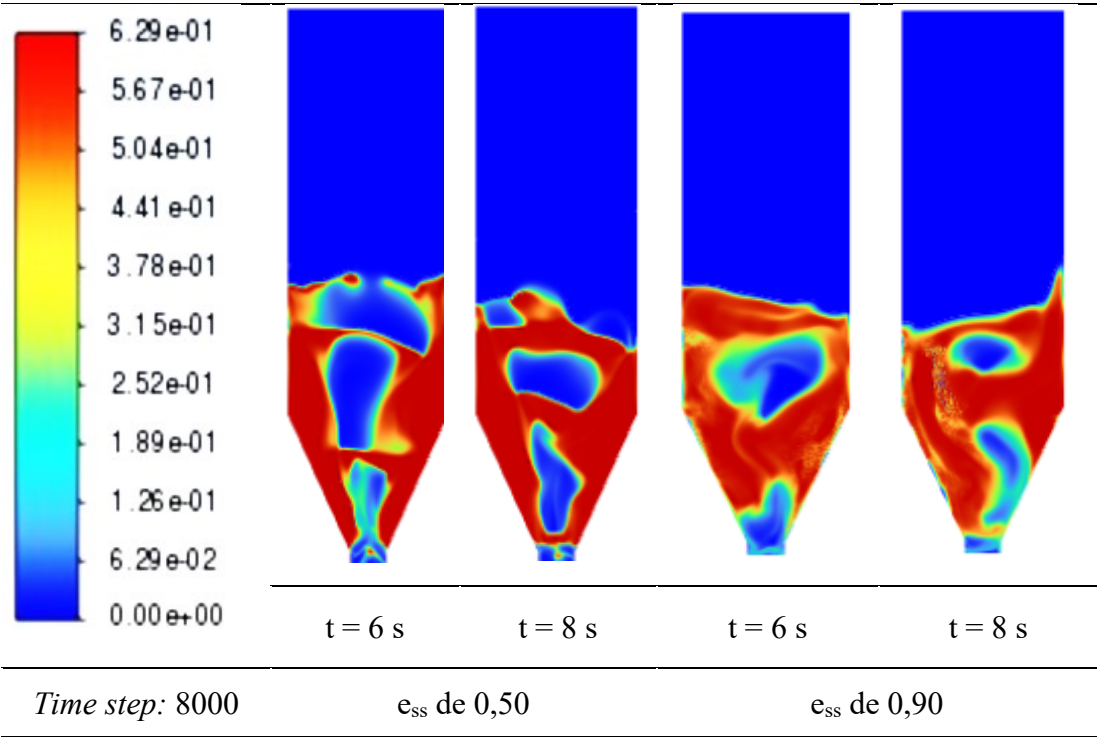
Mais detalhes destas diferenças comportamentais durante a estabilização do leito foram obtidos através da análise das Figuras 19 a 21, que representam os resultados de simulações para diferentes velocidades do ar e em diferentes períodos da simulação até o que o sistema atingisse o regime permanente.

Figura 19 - Fração volumétrica da linhaça estudada a velocidade de 4 m/s com H_L de 250mm.



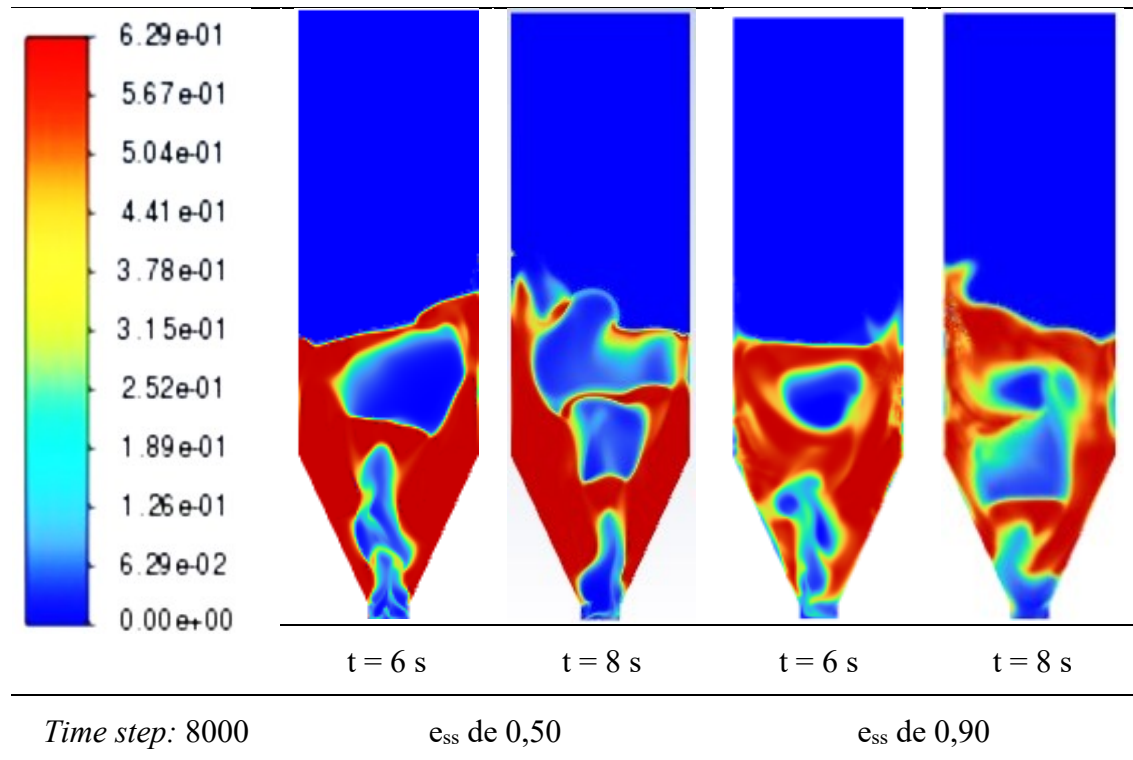
Fonte: Autor.

Figura 20 - Fração volumétrica da linhaça estudada a velocidade de 4,5 m/s com H_L de 250mm.



Fonte: Autor.

Figura 21 - Fração volumétrica da linhaça estudada a velocidade de 5 m/s com H_L de 250mm.



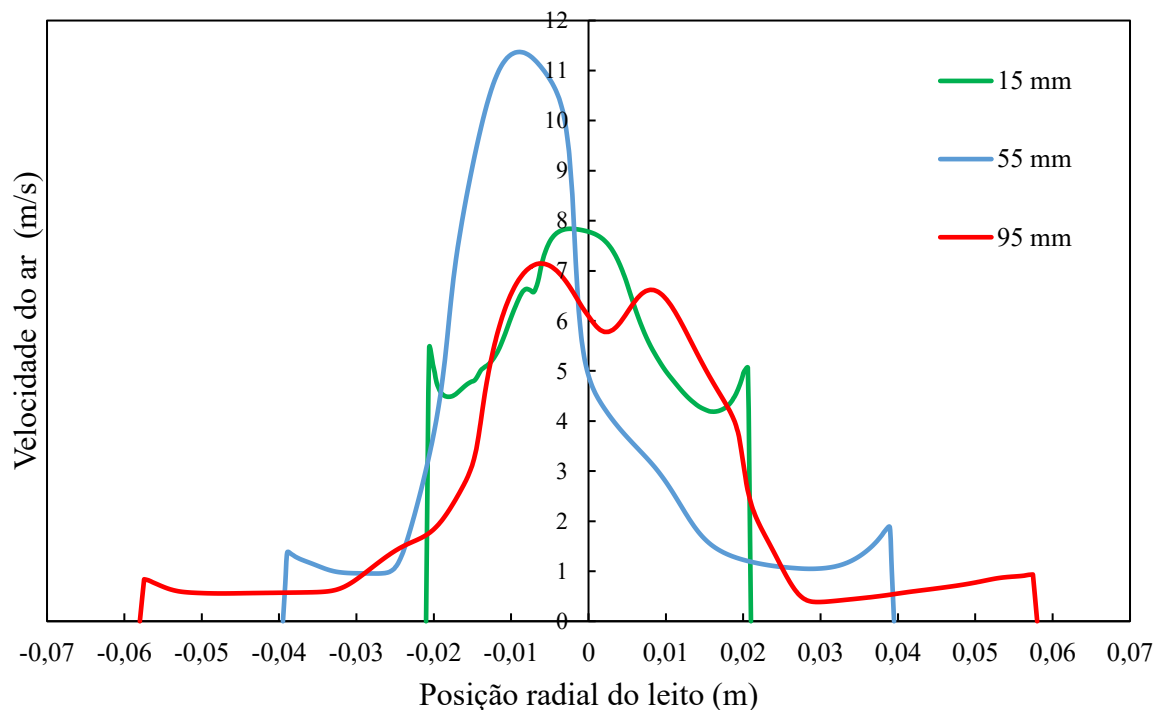
Fonte: Autor.

Os resultados obtidos por meio das simulações demonstraram fidelidade ao comportamento fluidodinâmico observado experimentalmente, com parâmetros que reproduziram consistentemente as condições reais do laboratório. Assim, o coeficiente de restituição de 0,90 se mostrou mais adequado para representar as interações entre as partículas e o fluido, capturando de maneira precisa as forças resistivas ao movimento, em especial o arraste.

Em contrapartida, o valor de 0,50 que possivelmente foi utilizado por Artur *et al.* (2018) subestimou as dinâmicas do sistema, falhando em retratar adequadamente as interações entre as partículas.

A Figura 22 corrobora com o resultado do objeto de pesquisa ilustrando a diferença de velocidade do ar que há diante das diferentes alturas da base do leito de jorro conforme simulação realizada com as alturas evidenciadas na Figura 9.

Figura 22 - Velocidade do ar em três posições de alturas diferentes para um leito com H_L de 250 mm.



Fonte: Autor.

Portanto, a obtenção de bons resultados utilizando suposições de simetria axial não é recomendada para a condução de simulações deste tipo de experimentos, especialmente quando se utilizam partículas não esféricas. Essa afirmação se fundamenta na complexidade dos fenômenos fluidodinâmicos envolvidos, que muitas vezes não se comportam de maneira idealizada em cenários reais (Altino e Ferreira, 2018; Prieto et al., 2013). Embora a simetria axial possa simplificar significativamente os cálculos e a modelagem, ela tende a ignorar variações essenciais que ocorrem em sistemas não simétricos, como a presença de perturbações externas, descontinuidades no fluxo e interações multifásicas (Artur et al., 2018).

Adicionalmente, os resultados indicam que o uso da simetria axial não é apropriado para a reprodução deste experimento, devido à complexidade dos fenômenos fluidodinâmicos envolvidos. Fenômenos como perturbações no fluxo, descontinuidades e interações multifásicas, oriundos de uma geometria e distribuição de partículas não esféricas, impactam significativamente o comportamento do sistema, como descrito por Altino e Ferreira (2018) e Prieto et al. (2013). Quando se utiliza a simetria axial, essas nuances podem ser subestimadas

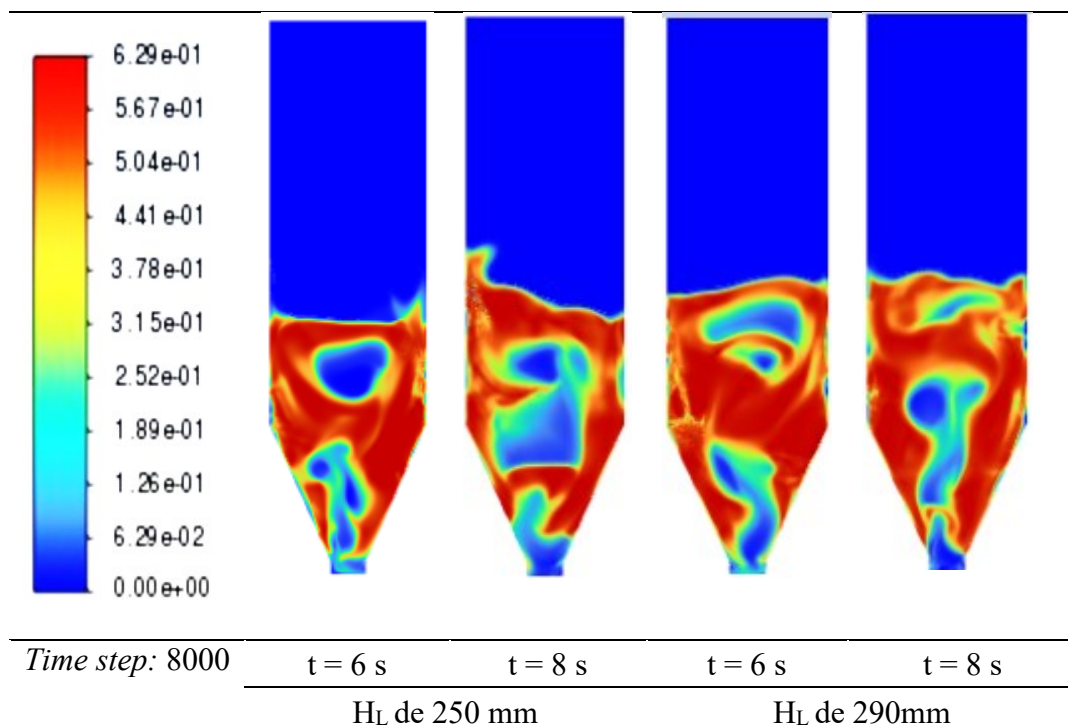
ou totalmente desconsideradas, resultando em uma representação que, embora teoricamente simplificada, falha em capturar a dinâmica real do sistema (Wang e Yu, 2006).

Com o objetivo de validar o coeficiente de restituição de 0,90 como sendo o mais indicado para a simulação do sistema piloto utilizado, foi conduzida uma nova série de simulações, mantendo os parâmetros apresentados na Tabela 4, mas ajustando a altura do leito para 290 mm. Essa modificação foi acompanhada por uma nova série de experimentos, com a finalidade de ampliar a correlação entre os dados simulados e os resultados experimentais. Os resultados obtidos permitiram avaliar de forma mais precisa os impactos da altura do leito e do coeficiente de restituição nos parâmetros fluidodinâmicos do sistema.

5.3.3 Avaliação da altura do leito estático

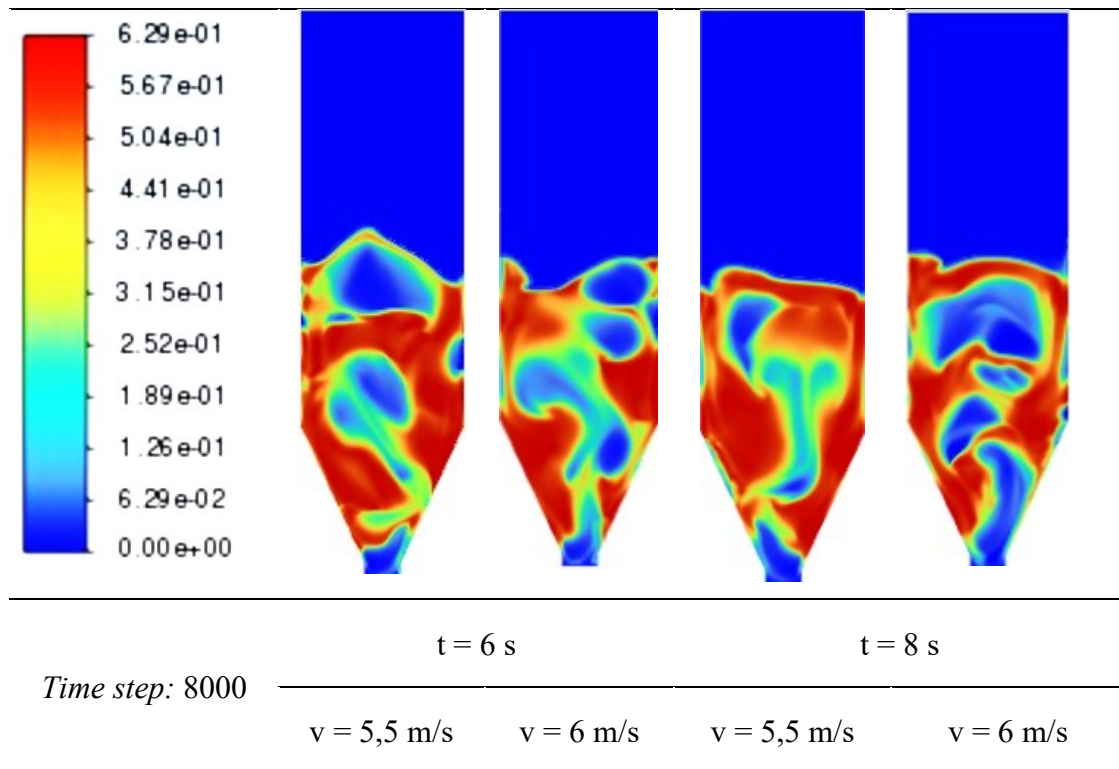
As Figuras 23 e 24 demonstram as principais tendências observadas, possibilitando verificar como a altura do leito influencia o comportamento do sistema e a transição entre os regimes fluidodinâmicos.

Figura 23 - Fração volumétrica da linhaça estudada a velocidade de 5 m/s e e_{ss} de 0,90.



Fonte: Autor.

Figura 24 - Fração volumétrica da linhaça estudada com e_{ss} de 0,90 com H_L de 290mm.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos com a simulação e os experimentos com uma altura inicial do leito de 290 mm evidenciam um impacto significativo no comportamento fluidodinâmico do sistema. Observa-se que o coeficiente de restituição de 0,90 continua a proporcionar uma melhor aproximação entre os dados simulados e experimentais, especialmente na descrição dos regimes de operação do leito e na predição das zonas de jorro estável.

As Figuras 23 e 24 mostram que, com o aumento da altura do leito, indicando alterações na estabilidade do jorro e na distribuição de partículas no sistema. A validação experimental reforça que, com essa altura de leito, os parâmetros fluidodinâmicos, como a queda de pressão e a fração volumétrica de sólidos na região anular, são fortemente influenciados pela interação entre o fluxo de ar e as partículas.

Além disso, a análise das figuras confirma que o coeficiente de restituição de 0,90 é adequado para capturar fenômenos como o colapso do jorro em velocidades críticas e a redistribuição de partículas na zona anular quando comparadas a parte experimental.

A metodologia do presente estudo se baseia fortemente em simulações de CFD, utilizando o modelo multifásico Euler-Euler para prever o comportamento fluidodinâmico em

leitos de jorro operando com sementes de linhaça. Para assegurar a precisão e validade dos resultados obtidos, a escolha dos parâmetros de simulação e a comparação com dados experimentais foram embasadas em diversos estudos relevantes da literatura.

Santos (2011) realizou um estudo abrangente sobre a fluidodinâmica de leitos de jorro, tanto de forma experimental quanto via simulações CFD, e destacou que o modelo multifásico Euler-Euler é eficaz para capturar a interação entre as fases sólida e gasosa. O presente trabalho segue essa abordagem, validando a escolha desse modelo devido à sua capacidade de descrever com precisão o comportamento das partículas em suspensão e seu movimento no leito. A adequação do coeficiente de restituição de 0,90 para representar as colisões entre as partículas também foi observada nas simulações realizadas, o que reforça sua aplicação neste estudo.

Santana *et al.* (2017) investigaram o comportamento fluidodinâmico de sementes de linhaça tanto em leitos fluidizados quanto de jorro, confirmando que as sementes apresentam características que exigem uma modelagem cuidadosa das interações fluido-partícula. O uso do coeficiente de 0,9 neste trabalho se mostrou mais adequado para capturar as forças resistivas ao movimento das sementes, em especial o arraste. Isso está alinhado com as observações de Santana *et al.* (2017), que ressaltaram a importância de ajustar corretamente os parâmetros de colisão para prever a dinâmica correta em sistemas de sementes não esféricas, como a linhaça.

Sant'Anna *et al.* (2015) conduziram um estudo comparativo sobre diferentes modelos de turbulência aplicados a leitos fluidizados e concluíram que o $k-\epsilon$ é altamente eficaz em simulações de escoamentos onde a fase gasosa domina a dinâmica, como é o caso dos leitos de jorro. O modelo consegue capturar bem os fenômenos de transferência de momento entre o fluido e as partículas, sendo amplamente utilizado devido ao seu equilíbrio entre precisão e custo computacional. No presente estudo, esse modelo foi determinante para descrever as regiões de alta turbulência observadas durante as transições de regimes no leito.

Além disso, o refinamento da malha computacional e a convergência dos resultados são aspectos cruciais em simulações CFD. O estudo de Castro (2016) sobre um leito fixo de pequena espessura utilizou um procedimento rigoroso de refinamento de malha para garantir a precisão dos resultados, e suas observações foram essenciais para justificar a abordagem adotada neste trabalho. A aplicação de uma malha refinada permitiu a captura de fenômenos locais no leito de jorro, como a formação de vórtices e a distribuição das partículas no campo fluido, garantindo a qualidade e a fidelidade dos resultados.

Outro ponto importante está relacionado aos modelos preditivos. Brandani e Zhang (2006) desenvolveram um novo modelo para prever o comportamento de leitos fluidizados, que se mostrou eficaz na análise de transições entre diferentes regimes de escoamento, como o de leito fixo, jorro mínimo e jorro estável. Este estudo ajudou a fundamentar a análise das transições observadas nas simulações do presente trabalho, permitindo uma interpretação mais robusta dos dados e garantindo que as condições experimentais foram reproduzidas de forma adequada.

Por fim, Scatena *et al.* (2015) sobre a fluidodinâmica em leitos de jorro bidimensionais com alimentação não convencional forneceu uma base importante para a análise das variações de comportamento no leito de jorro sob diferentes configurações operacionais. Ao considerar as diferentes velocidades de entrada de ar e as interações não lineares entre as partículas, este estudo permitiu que o presente trabalho explorasse com mais precisão as transições entre os regimes fluidodinâmicos, alinhando as observações experimentais com as previsões numéricas.

Assim, a metodologia adotada neste estudo, apoiada por simulações CFD e observada por experimentos, encontra amplo respaldo na literatura, tanto em termos de modelagem matemática quanto em análises comparativas. A utilização de parâmetros já testados e comprovados em estudos anteriores confere maior solidez aos resultados, assegurando que as simulações representem com precisão o comportamento fluidodinâmico das sementes de linhaça em leitos de jorro.

5.3.4 Simulações axissimétricas

Ao utilizar simulações CFD para estudar o comportamento de leitos de jorro, é comum recorrer a modelos bidimensionais com o objetivo de reduzir o custo computacional. Contudo, a simulação plana (cartesiana) e a axissimétrica podem gerar resultados significativamente distintos. Essa diferença substancial é esperada e pode ser justificada por aspectos geométricos e físicos distintos entre os dois modelos (Versteeg & Malalasekera, 2007).

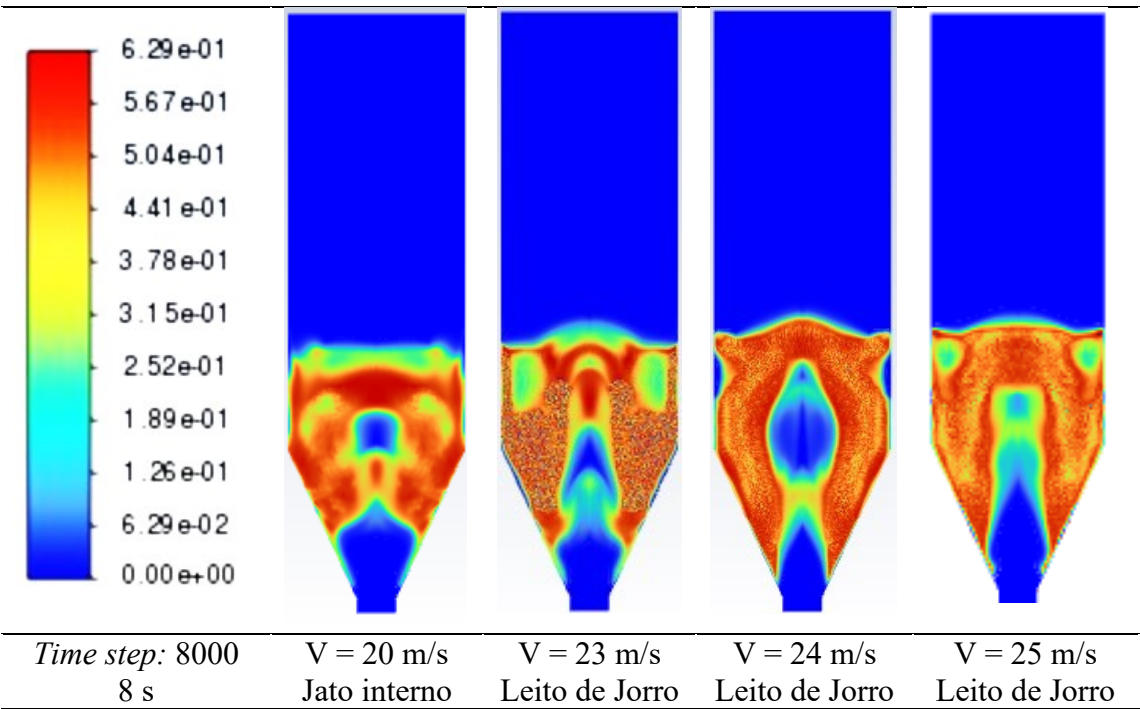
A simulação axissimétrica, embora bidimensional, representa um sistema com revolução em torno de um eixo central, ou seja, ela simula o comportamento tridimensional de um domínio circular, assumindo que o fluxo é idêntico em todas as direções angulares ao redor desse eixo. Como resultado, esse tipo de modelagem implica um volume efetivo de escoamento muito maior do que o representado em uma simulação plana, o que gera maior resistência ao

movimento das partículas e do fluido, exigindo uma velocidade de ar mais alta para alcançar e manter o jorro (Patankar, 1980).

Por outro lado, a simulação plana (cartesiana) considera apenas um "recorte" do sistema, nessa condição, as forças atuantes são menos distribuídas, o volume simulado é menor e os efeitos de confinamento radial não existem. Isso reduz o esforço necessário para fluidizar o leito e, conseqüentemente, a velocidade mínima de jorro estimada tende a ser menor (Versteeg & Malalasekera, 2007).

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos nas simulações axissimétricas, destacando as principais características do escoamento e a distribuição das partículas no domínio simulado.

Figura 25 – Resultado dos regimes da simulação axissimétrica com sementes de linhaça utilizando o e_{ss} de 0,90 com HL de 250 mm.



Fonte: Autor.

Além disso, no modelo axissimétrico na Figura 25, o ar precisa vencer uma distribuição radial de partículas, o que gera gradientes de pressão mais intensos e maior exigência energética para promover a ruptura e sustentação da coluna de partículas. Esses efeitos não estão presentes no modelo planar (cartesiano), o que subestima a complexidade tridimensional do escoamento, facilitando a fluidização aparente (Ferziger; Peric, 2002).

Portanto, a discrepância entre as velocidades mínimas de jorro observadas nas duas abordagens, Figuras 17 e 25 (velocidades próximas ao regime de leito de jorro entre 3 e 5 m/s e 23 a 25 m/s respectivamente) não se deve a erro, mas sim às características intrínsecas de cada modelagem. O modelo planar é útil para análises preliminares e qualitativas, enquanto o modelo axissimétrico, embora ainda simplificado, fornece uma representação mais próxima da realidade tridimensional.

Embora as simulações realizadas tenham fornecido importantes informações sobre a dinâmica do leito de jorro, não é possível descrever o comportamento experimental em termos de velocidades absolutas reais, devido às diferenças estruturais entre os modelos numéricos (bidimensional cartesiano e axissimétrico) e o sistema físico. No entanto, ao adimensionalizar as condições de operação utilizando a velocidade mínima de jorro como fator de escala em cada caso, simulações e experimento, é viável realizar uma análise comparativa do comportamento do perfil de fluidização e da queda de pressão relativa. Essa abordagem permite observar a coerência no padrão do escoamento, independentemente das discrepâncias nas magnitudes absolutas.

O desenvolvimento deste trabalho foi inicialmente motivado pelos estudos de Artur *et al.* (2018), que utilizaram um modelo bidimensional cartesiano simplificado para representar a fluidização de sementes de linhaça. O modelo demonstrava bom desempenho em termos de economia computacional e implementação. Contudo, ao confrontá-lo com os dados experimentais obtidos neste estudo e, sobretudo, com os resultados gerados pelas simulações axissimétricas, que assumem simetria em torno de um eixo e consideram volume efetivo rotacional, foram observadas discrepâncias substanciais, tanto nos valores de velocidade mínima de jorro quanto na distribuição da fração volumétrica das partículas e na queda de pressão. Essas diferenças expõem as limitações do modelo cartesiano quando aplicado a partículas com geometria complexa, cuja dinâmica não é plenamente capturada sem considerar os efeitos tridimensionais do sistema. Importante destacar que o estudo de Artur *et al.* (2018), não contemplou uma etapa de validação experimental, o que compromete a robustez e aplicabilidade prática do modelo proposto.

5.4 QUEDA DE PRESSÃO

A análise da queda de pressão no leito de jorro é fundamental para a compreensão do comportamento fluidodinâmico do sistema, pois está diretamente relacionada à resistência imposta pelas partículas ao escoamento do ar. Neste estudo, foram avaliados os perfis de queda de pressão obtidos por simulações bidimensionais em domínios cartesiano e axissimétrico, considerando as diferentes velocidades de jorro aplicadas.

Embora os valores absolutos obtidos pelas simulações possam divergir significativamente daqueles observados experimentalmente, sobretudo devido às simplificações geométricas dos modelos bidimensionais, os resultados ainda podem ser interpretados e comparados de forma válida por meio da adimensionalização. Ao utilizar a velocidade mínima de jorro de cada configuração como parâmetro de referência, torna-se possível representar as condições de operação em termos relativos, permitindo uma análise comportamental independente das escalas absolutas.

Essa abordagem é particularmente útil para preservar a relevância dos dados numéricos, incluindo aqueles provenientes de modelos simplificados como o bidimensional cartesiano utilizado neste trabalho e nos estudos de Artur *et al.* (2018). Apesar de o modelo cartesiano não capturar completamente os efeitos tridimensionais e radiais do escoamento e, portanto, não representar com exatidão os valores reais de velocidade e queda de pressão, ele ainda é capaz de reproduzir o comportamento típico do sistema quando os resultados são expressos em termos adimensionais.

Ao observar os perfis de queda de pressão em função da razão da velocidade e velocidade mínima de jorro, nota-se a presença de um ponto de inflexão que marca a transição entre o regime de leito fixo e a formação do jorro. Esse comportamento é compatível com a literatura e com os dados experimentais, ainda que os valores absolutos se diferenciem entre os modelos. Dessa forma, reforça-se que a adimensionalização dos resultados é uma estratégia eficaz para possibilitar comparações consistentes entre simulações distintas ou mesmo entre simulações e experimentos.

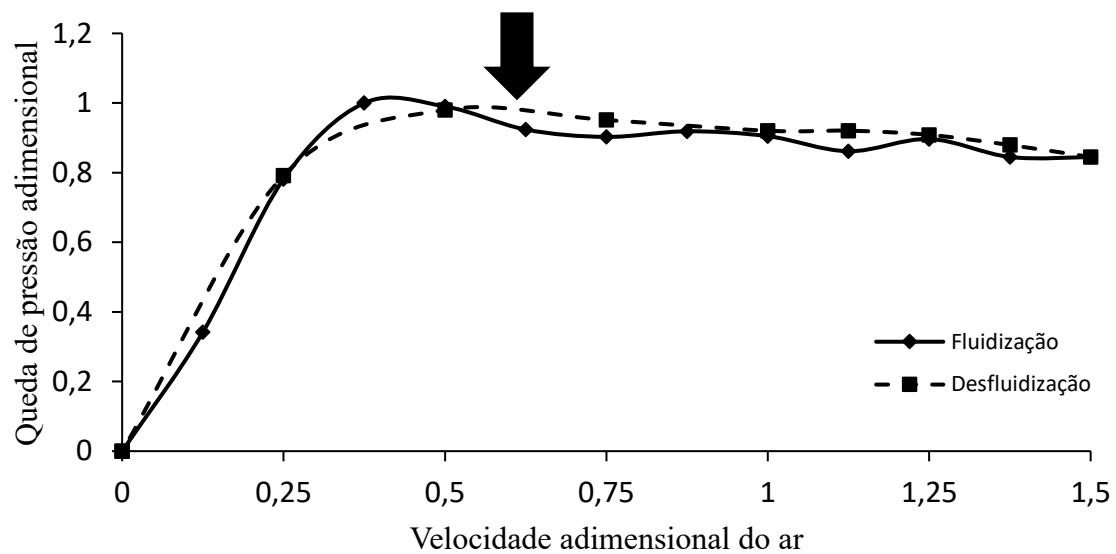
O resultado do perfil de queda de pressão para a simulação realizada com altura de leito estática de linhaça de 250mm sob diferentes vazões de ar está ilustrado na Figura 26, enquanto a curva experimental nas mesmas condições é ilustrada na Figura 27.

Nestas condições, a máxima queda de pressão da simulação foi de 1630,43 kPa, enquanto no experimento foi de 1156,4 kPa, dados estes utilizados na adimensionalização das

respectivas quedas de pressão ($\overline{\Delta P}$). Já para a adimensionalização da velocidade, foi utilizada a velocidade mínima de jorro experimental de 4,17 m/s e da simulação foi de 4 m/s.

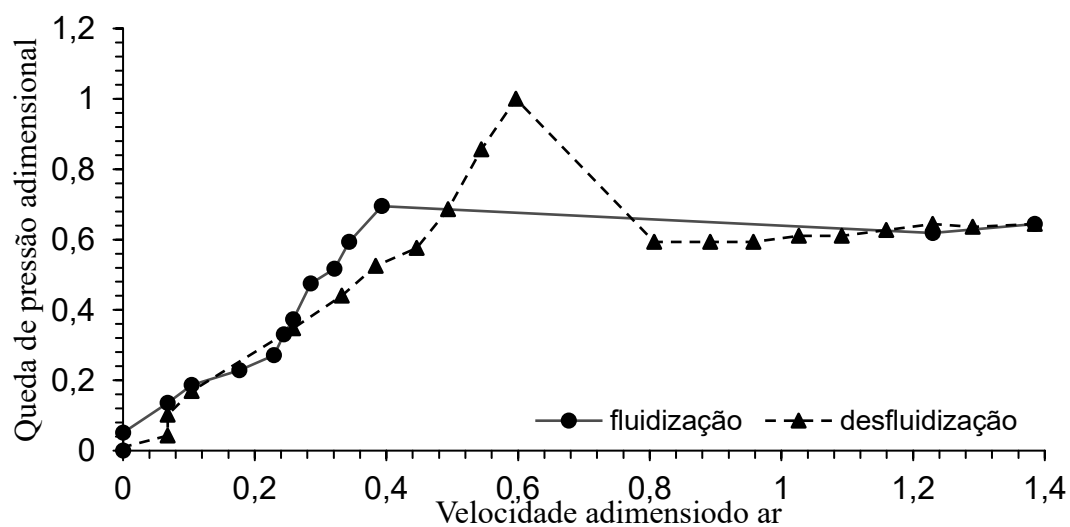
Salienta-se que o pico de máxima queda de pressão experimental não pode ser obtido, ao longo do experimento de fluidização (incremento da vazão), mas apenas na desfluidização, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 26 - Queda de pressão simulada do leito com semente de linhaça e H_L de 250 mm



Fonte: Autor.

Figura 27 – Perfil da queda de pressão obtido experimentalmente para o leito 250 mm.



Fonte: Autor.

Comparando-se os dados experimentais de queda de pressão, ilustrados na Figura 27, observa-se certa semelhança com o perfil teórico, ainda que com algumas particularidades marcantes.

Inicialmente, nota-se que o pico da queda de pressão ocorre próximo da velocidade adimensional de 0,60 para a desfluidização em ambos os casos, valor que representa a transição entre o regime de leito fixo e o início da fluidização plena.

Entretanto, durante os experimentos, verificou-se que, na primeira tentativa de empacotamento do leito, a resistência ao escoamento do ar era tão elevada que impedia sua passagem, mantendo o sistema estagnado até uma velocidade de aproximadamente 3-3,5 m/s por vários pontos experimentais consecutivos. Esse comportamento é característico de leitos formados por partículas irregulares, como as sementes de linhaça, que geram canais de escoamento não uniformes e aumentam a queda de pressão inicial (Gidaspow, 1994).

Ressalta-se que, os valores de queda de pressão experimental e simulados não são similares, pois um dos pontos de tomada da pressão diferencial do leito de partículas é localizado na altura de 5 cm do leito, conforme a Figura 28. Assim, as pressões mensuradas no experimento correspondem a uma queda de pressão de apenas uma parte do leito e não da resistência total do leito estimado nas simulações, o que justifica mais uma vez a necessidade de se trabalhar com estes parâmetros adimensionalizados para uma comparação direta entre eles.

Figura 28 – Posição da queda de pressão mensurada

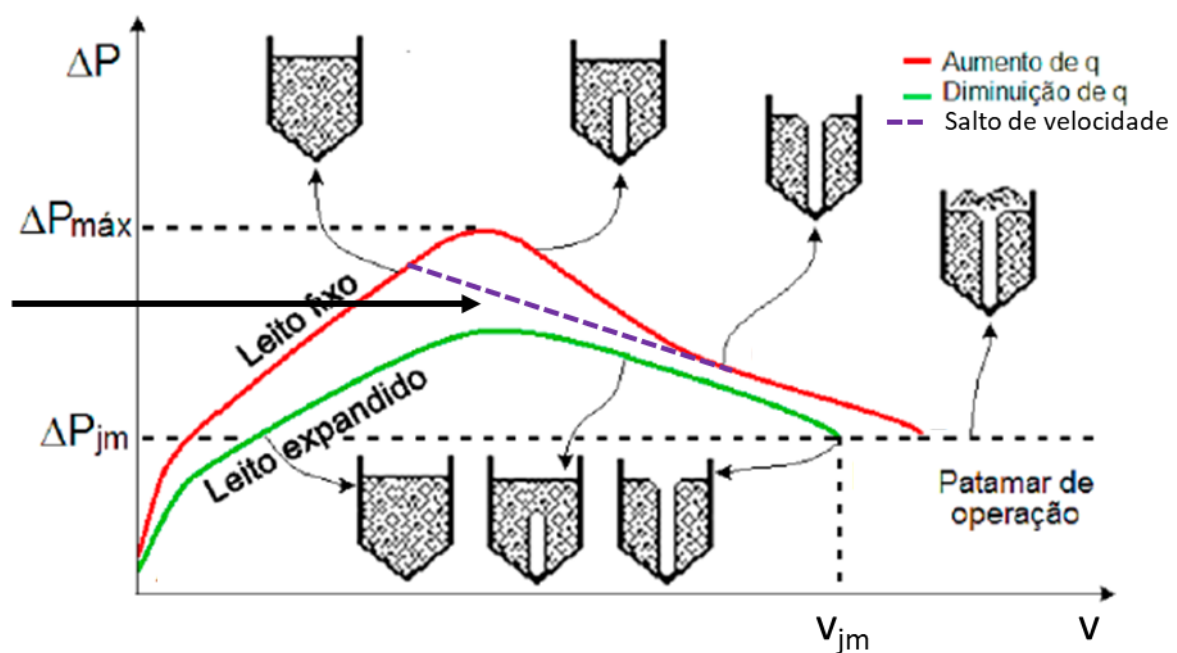


Fonte: Autor.

Ainda com respeito ao perfil de queda de pressão na fluidização do leito (Figura 27), a medida que se aumenta a velocidade do ar até que o leito atinja o regime de jorro, a queda de pressão se manteve constante, impedindo o aumento da velocidade do ar através do leito, a qual sofre uma transição abrupta, saltando de 3 m/s para valores acima de 5 m/s, equivalente a velocidades adimensionais de 0,4 a 1,3.

Esse patamar constante de pressão também é observado no perfil teoria de operação de um leito de jorro ilustrado pela Figura 29. Porém, ocorre que no caso experimental, o ponto onde a velocidade começa a ser registrada novamente já passou pelo ponto de máxima queda de pressão. Todavia, a posição deste com respeito a velocidade é próximo ao do perfil de desfluidização (Figura 29), o qual permitiu a determinação da velocidade desta condição.

Figura 29- Curva característica do leito de jorro



Fonte: Autor "adaptado de" Dantas, 2019, p. 07.

A curva característica apresentada na Figura 29, exemplifica o comportamento fluidodinâmico das sementes de linhaça em leito de jorro, particularmente no que diz respeito ao salto de velocidade identificado durante a operação. Este fenômeno, que conforme descrita por Brandão (2011), reflete a transição entre diferentes regimes de fluidização, representa um

desafio considerável para o controle do processo, a dificuldade reside na estreita faixa operacional entre a velocidade mínima de jorro, que inicia o movimento das partículas, e a velocidade máxima, que, quando excedida, pode levar à instabilidade do leito ou à segregação das partículas.

Com base nos resultados da simulação para uma altura de leito de 250 mm e no estudo de Mathur e Epstein (1974), observa-se que a Figura 27 apresenta a dinâmica do fluxo de gás e a disposição das partículas no leito impactam diretamente a queda de pressão, variável crucial para compreender a estabilidade e eficiência dos processos industriais que utilizam leitos fluidizados. Em velocidades baixas, no regime fixo, a queda de pressão aumentou proporcionalmente à velocidade superficial do gás devido à resistência causada pelo empacotamento das partículas. Esse comportamento linear reflete a ausência de movimentação significativa no leito, onde o fluido apenas atravessa os espaços vazios entre as partículas. À medida que a velocidade do gás aumentou e atingiu o limiar para a formação de jorro, foi identificado um pico de queda de pressão, associado à criação de cavidades centrais e à reorganização transitória das partículas. Após essa transição, a queda de pressão estabilizou-se no regime de jorro estável, marcando a redução da resistência fluido-partícula.

A forma das partículas influenciou significativamente os resultados, com diferenças claras entre partículas esféricas, amplamente utilizadas em estudos, e partículas não esféricas, como as sementes de linhaça. As partículas esféricas apresentaram um empacotamento inicial mais uniforme, resultando em menor resistência ao fluxo no regime fixo. Em contrapartida, as sementes de linhaça, devido à sua geometria irregular, formaram aglomerados densos e heterogêneos, aumentando a resistência ao escoamento e elevando a queda de pressão nesse regime. Esses achados corroboram as observações de Costa e Ribeiro (2010) e são consistentes com os estudos de Tsuji *et al.* (1982), que destacaram que partículas não esféricas geram maior resistência ao fluxo, uma vez que sua geometria irregular cria zonas de maior resistência local e instabilidade no leito. Isso resulta em padrões de movimento menos previsíveis e maior formação de aglomerados, o que eleva a resistência ao fluxo de gás.

Durante a transição para o regime de jorro, partículas não esféricas apresentaram instabilidades mais pronunciadas, evidenciadas por flutuações acentuadas na queda de pressão. Essas flutuações foram causadas pela interação irregular entre as partículas e pelo comportamento dinâmico do escoamento, que criaram zonas de maior resistência local no leito. Em contraste, partículas esféricas exibiram um comportamento mais previsível, com uma transição suave devido à sua simetria geométrica. Costa e Ribeiro (2010) também apontaram

que partículas irregulares aumentam a resistência ao escoamento por meio de empacotamento denso e formação de zonas de fluxo preferencial, características que foram confirmadas nos experimentos com sementes de linhaça.

No regime de jorro estável, as diferenças se tornaram ainda mais evidentes. As sementes de linhaça exibiram trajetórias complexas e dispersão heterogênea, enquanto partículas esféricas promoveram um fluxo mais uniforme e menos resistivo. Segundo Costa e Ribeiro (2010), partículas não esféricas geram maior variabilidade na distribuição de velocidades e forças dentro do leito, criando zonas de maior resistência e afetando a eficiência da fluidização. Esses comportamentos, somados à irregularidade geométrica das partículas de linhaça, reforçam a necessidade de modelos mais refinados para prever com precisão as dinâmicas observadas.

Além disso, as simulações de Gu *et al.* (2023), que investigaram a dinâmica de partículas não esféricas em leitos fluidizados, demonstram que partículas como as sementes de linhaça, devido à sua forma alongada e irregular, apresentam um empacotamento mais denso e uma maior tendência à aglomeração. Esse comportamento contribui para a formação de zonas de resistência no leito e dificulta a fluidização uniforme, especialmente quando comparado a partículas esféricas, que tendem a ter uma dispersão mais homogênea.

Os resultados experimentais e numéricos obtidos por Dantas (2019) corroboram a relevância da análise integrada entre experimentos e simulações para a compreensão da fluidodinâmica em leitos de jorro. A curva característica do leito foi obtida experimentalmente com partículas esféricas de poliestireno, evidenciando uma queda de pressão máxima em uma velocidade crítica de 7,02 m/s. Essa curva não apenas ilustra a transição entre regimes de escoamento, mas também demonstra a estabilização da queda de pressão no regime de jorro estável, um comportamento crucial para a otimização de processos industriais que empregam esse tipo de configuração. A simulação permitiu prever com precisão a dinâmica fluidodinâmica do sistema, evidenciando sua utilidade em cenários complexos onde a interação entre fluido e partículas é determinante. Além disso, o estudo destacou que a geometria cônica do leito desempenha um papel fundamental na melhoria da distribuição do fluxo, reduzindo os gradientes de pressão e promovendo um jorro mais estável.

Portanto, os resultados demonstram que a queda de pressão em leitos de jorro é altamente dependente não apenas de parâmetros operacionais e geométricos, como altura do leito e diâmetro da base cônica, mas também da forma das partículas. A geometria irregular das

sementes de linhaça impõe desafios adicionais à modelagem e operação do leito, exigindo maior refinamento na escolha dos modelos e parâmetros. Esse entendimento é essencial para otimizar o desempenho de processos industriais que envolvem partículas não esféricas, ampliando suas aplicações práticas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos com as simulações CFD para o leito de jorro utilizando sementes de linhaça forneceram compreensões valiosas sobre o comportamento fluidodinâmico desses sistemas. A metodologia utilizada, baseada na modelagem multifásica Euleriana, na aplicação do modelo de turbulência k- ϵ e na comparação com dados experimentais e estudos anteriores, demonstrou-se robusta e eficaz. A análise dos perfis de velocidade e das frações volumétricas destacou a relevância da escolha apropriada da malha computacional e do intervalo de tempo, fatores essenciais para a obtenção de resultados precisos em simulações de sistemas multifásicos complexos.

Além disso, a seleção adequada dos modelos físicos e dos parâmetros de colisão, especialmente a utilização de um coeficiente de restituição de 0,9, mostrou-se determinante para a correta reprodução dos fenômenos observados. Esses cuidados metodológicos permitiram a obtenção de simulações consistentes, ainda que simplificadas, reforçando a importância do refinamento de malha e da escolha criteriosa dos modelos numéricos para a previsão de fenômenos de fluidização.

Em relação aos resultados de velocidade e queda de pressão, a comparação entre os modelos bidimensional cartesiano e axissimétrico revelou diferenças significativas, atribuídas às suposições geométricas adotadas em cada abordagem. No modelo bidimensional, as velocidades superficiais necessárias para o regime de jorro foram consideravelmente inferiores às observadas no modelo axissimétrico. Essa diferença decorre da ausência de confinamento radial no modelo cartesiano, o que reduz artificialmente a resistência ao escoamento. Em contraste, o modelo axissimétrico, por considerar a revolução ao redor de um eixo central, impõe maior resistência ao fluxo, exigindo velocidades de gás mais elevadas para a formação do jorro.

A análise da queda de pressão permitiu identificar as transições entre os regimes de operação do leito. No regime de leito fixo, observou-se um comportamento praticamente linear do aumento da perda de carga com a velocidade superficial. A transição para o regime de jorro nas simulações foi evidenciada por um leve aumento na curva de perda de carga, indicando a reorganização das partículas e a formação do jorro. Embora esse comportamento tenha sido qualitativamente semelhante ao observado durante a etapa de fluidização nos experimentos, o pico de pressão previsto nas simulações foi menos pronunciado em comparação com os dados

experimentais, especialmente quando analisada a curva de desfluidização. Essa diferença reforça a necessidade de cautela na interpretação dos resultados simulados, reconhecendo que os modelos bidimensionais, embora úteis para a análise de tendências, não capturam integralmente os fenômenos tridimensionais envolvidos. Ainda assim, a adimensionalização dos resultados utilizando a velocidade mínima de jorro permitiu uma comparação mais consistente entre simulações e experimentos, possibilitando a identificação de comportamentos relativos nos perfis de perda de carga e regimes de escoamento.

Adicionalmente, a geometria irregular das sementes de linhaça desempenhou um papel determinante, aumentando a resistência ao escoamento quando comparada a partículas esféricas, como discutido por Costa e Ribeiro (2010). A concordância geral dos resultados com a literatura, incluindo os estudos de Scatena et al. (2015), reforça a validade da abordagem numérica adotada. A atenção dedicada à modelagem matemática e às interações fluido-partícula contribuiu significativamente para capturar a complexidade dos fenômenos observados, mesmo considerando as simplificações impostas pela modelagem bidimensional.

A pesquisa também indicou a necessidade de futuras melhorias, como a incorporação de modelos de arraste mais avançados, capazes de considerar mais adequadamente a forma e a orientação das partículas irregulares. Trabalhos como os de Brandani e Zhang (2006) apontam para o uso de modelos preditivos que aprimoram a descrição das forças de arraste em partículas de geometria não esférica, aumentando ainda mais a acurácia das simulações. Assim, esta pesquisa valida estudos anteriores e aponta novas direções para o avanço do entendimento das dinâmicas fluidodinâmicas em sistemas complexos. A aplicação dos resultados transcende o ambiente acadêmico, oferecendo subsídios práticos para a otimização de processos industriais, especialmente no que se refere à eficiência energética e ao controle de operações envolvendo secagem, granulação e revestimento.

Portanto, esta pesquisa não apenas consolida o conhecimento existente sobre a fluidização de partículas irregulares em leitos de jorro, mas também estabelece uma base sólida para o desenvolvimento de simulações mais realistas e aplicáveis em escala industrial, contribuindo para avanços em eficiência, sustentabilidade e qualidade nos processos industriais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. DE; ROCHA, S. C. DOS S. **Fluidodinâmica de sementes de brócolos em leito fluidizado e leito de jorro**. Scientia agricola, v. 59, n. 4, p. 645–652, 2002.
- ALTINO, H. O. N.; FERREIRA, M. C. **Análise fluidodinâmica de leitos-fixos de materiais particulados não esféricos por CFD**. Blucher Chemical Engineering Proceedings. Anais. São Paulo: Editora Blucher, 2018.
- ANDERSON, J. D. **Computational fluid dynamics: the basics with applications**. McGraw Hill Professional, 2017.
- ARROTÉIA, D. R. *et al.* **Estudo do processo de secagem da linhaça em leito fluidizado e em leito de jorro**. Revista de Engenharia Química e Química, v. 3, n. 2, 2017.
- ARTUR, A.P.S. *et al.* **Estudo fluidodinâmico do leito de jorro 2D para materiais orgânicos e inertes**. In: Anais do congresso de engenharia da universidade federal de São João del-Rei, 2018.
- BANOŽIĆ, M. *et al.* **Spray drying as a method of choice for obtaining high quality products from food wastes— A review**. Food reviews international, v. 39, n. 4, p. 1953–1985, 2023.
- BATISTA, J. M. **Análise da fluidodinâmica e da transferência de calor em leito de jorro operando com sementes de sorgo utilizando CFD**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- BRANDANI, S.; ZHANG, K. **A new model for the prediction of the behaviour of fluidized beds**. Powder technology, v. 163, n. 1–2, p. 80–87, 2006.
- BRANDÃO, S. E. **Análise experimental do comportamento fluidodinâmico e da secagem se sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em leito de jorro**. Dissertação (Mestrado) UFPA: Universidade Federal do Pará, 2011.
- BUTZGE, J. J. **Controle do regime fluidodinâmico estável durante o processo de umedecimento de inertes em leito de jorro utilizando análise espectral**. Dissertação (Mestrado - Engenharia de Processos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Campinas 2012.

CASTRO, UBIRANILSON JOÃO de. **Estudo de um leito fixo de pequena espessura utilizando CFD**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

ÇENGEL, Y. A.; JOHN, M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2011.

CHAPMAN S.; COWLING, T. G. **The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases**. 3 ed., Cambridge, England: Cambridge University Press, 1990.

COSTA, L. T.; RIBEIRO, M. C. C. **Propriedades dinâmicas de fluidos por simulação computacional: métodos híbridos atomístico-contínuo**. Química nova, v. 33, n. 4, p. 938–944, 2010.

DANTAS, A. **Estudo experimental e numérico da fluidodinâmica de um leito de jorro**. Dissertação UFCG, Campina Grande, v. 69, 2019.

DEEN, N. G. *et al.* **Review of discrete particle modeling of fluidized beds**. Chemical engineering science, v. 62, n. 1–2, p. 28–44, 2007.

ECHEVARRIA, E. R. *et al.* **Caracterização de sementes de cornichão (*lotus corniculatus* L.) E desenvolvimento de suspensões para recobrimento**. Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015.

EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and Spout - Fluid Beds**. New York: Cambridge University Press, 2011. v. 340.

ERGUN, S.; ORNING, A. A. **Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds**. Industrial and engineering chemistry, v. 41, n. 6, p. 1179–1184, 1949.

FERREIRA, C. G. ; SANTOS, F. B. ; BARCELOS, K. M. ; RIBEIRO, D. C. ; LIRA, T. S. **.Estudo da fluidodinâmica de um leito de jorro aplicado a uma mistura de casca de coco e areia via análise experimental e simulação por CFD**. Blucher Chemical Engineering Proceedings. Anais COBEQ. São Paulo: Editora Blucher, 2017.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Springer, 2002.

GELDART, D. **Types of gas fluidization**. Powder technology, v. 7, n. 5, p. 285–292, 1972.

GIDASPOW, D.; BEZBURUAH, R.; DING, J. **Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach**, Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization. p. 75–82, 1992.

GU, C. et al. **CFD-DEM simulation of distribution and agglomeration characteristics of bendable chain-like biomass particles in a fluidized bed reactor**. Fuel (London, England), v. 340, n. 127570, p. 127570, 2023.

HAMIDIPOUR, M.; CHEN, J.; LARACHI, F. **CFD study on hydrodynamics in three-phase fluidized beds—Application of turbulence models and experimental validation**. Chemical engineering science, v. 78, p. 167–180, 2012.

HINZE, J. O. **Turbulence**. McGraw-Hill Companies, 1975.

JONES, W. P.; LAUNDER, B. E. **The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence**. International journal of heat and mass transfer, v. 15, n. 2, p. 301–314, 1972.

KACHINSKI, K. D.; STAHLSCHMIDT, R. M. **Seleção e dimensionamento de um sistema de leito de jorro com fenda para aplicação de secagem**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

KARBASCHI, M. *et al.* **Solutal Marangoni convection: Challenges in fluid dynamics with mass transfer**. In: Computational Methods for Complex Liquid-Fluid Interfaces. CRC Press, 2015. p. 467–480.

KRISTENSEN, M.; JENSEN, M. G.; AARESTRUP, J.; PETERSEN, K. E.; SØNDERGAARD, L. **Flaxseed dietary fibers lower cholesterol and increase fecal fat excretion, but magnitude of effect depends on food type**. Nutrition & Metabolism, v. 9, n. 1, p. 8, 2012.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. Oxford, England: Butterworth-Heinemann, 1991.

LATHOUWERS, D.; BELLAN, J. **Modeling of dense gas–solid reactive mixtures applied to biomass pyrolysis in a fluidized bed**. International journal of multiphase flow, v. 27, n. 12, p. 2155–2187, 2001.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. **The numerical computation of turbulent flows**. Computer methods in applied mechanics and engineering, v. 3, n. 2, p. 269–289, 1974.

LÚCIO, A. D. et al. **Histórico, usos e importância econômica da linhaça**. Em: Linhaça: Perspectiva de produção e usos na alimentação humana e animal. Atena Editora, 2021.

LUN, C. K. K.; SAVAGE, S. B.; JEFFREY, D. J. **Kinetics Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in General Flow Field**. Journal of Fluid Mech., v. 140, p. 223-256, 1984.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos**. LTC, 2004.

MARQUES, Í. I. **Investigação do leito de jorro como reator em potencial de pirólise de partículas cartonadas**. 84 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2013.

MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. **A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying**. Journal of applied chemistry, v. 5, n. 11, p. 624–636, 1955.

MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. **A Technique for Contacting Gases With Solids Particles**. AIChE Journal, v. 1, p. 157–164, 1955.

MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. **Fluidization of fine powders**. Industrial & Engineering Chemistry, v. 46, n. 9, p. 1976-1981, 1954.

MILLS, P. **Kinetic Theory of Granular Flows & Multiscale CFD Modeling of Fluidized Beds**, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14288/1.0348171>. Acesso em: 23/09/2024.

MINETO, Andreza Tangerino. **Simulação numérica de escoamentos gás-sólido em leito fluidizado borbulhante utilizando a teoria cinética dos escoamentos granulares**. 2009. 88 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, 2009.

PAN, A. *et al.* **α -Linolenic acid and risk of cardiovascular disease: a systematic review and meta-analysis**. The American journal of clinical nutrition, v. 96, n. 6, p. 1262–1273, 2012.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Nova Iorque, NY, USA: McGraw-Hill, 1980.

PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. **A calculation procedure for heat, mass, and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows**. International journal of heat and mass transfer, v. 15, n. 10, p. 1787–1806, 1972.

PERAZZINI, M. T. B.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. **Secagem de pastas em leito de jorro: influência das condições operacionais**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Editora Edgard Blücher, 2015.

PEREIRA, G. V. DA S. et al. **Revestimentos de materiais por Leito Fluidizado e Leito de Jorro: um estudo comparativo**. Research, Society and Development, v. 11, n. 17, p. e92111738731, 2022.

PERES, A. P. **Técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) aplicadas a escoamentos em ciclones**. Tese de doutorado. Campinas, SP, 2002.

PRASAD, K. **Flaxseed and cardiovascular health**. Journal of cardiovascular pharmacology, v. 54, n. 5, p. 369–377, 2009.

RAUCH, F.K.; SANTOS, M.F.F.; HENGEL, M.M. **Impacto na produção de linhaça e qualidade do óleo em diferentes manejos de nitrogênio**. Trabalho de Iniciação Científica (Curso Técnico em Agropecuária) Escola Estadual Técnica Celeste Gobbato – Palmeiras das Missões, 2022. 36p.

PRIETO, W. H.; MOURA, H. L.; CREMASCO, M. A. **Caracterização de regimes de fluidização a partir de invariantes caóticos utilizando-se a equação de Ergun**. RXXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2013.

RASI, J. R.; NETO, M. M.; BERNARDO, R. Revisão bibliográfica para avaliação dos atuais processos de secagem de grãos. Em: Engenharia Mecânica: A Influência de Máquinas, Ferramentas e Motores no Cotidiano do Homem. Atena Editora, 2021. p. 65–80.

REIS, A. C. **Análise de perda de carga e velocidade de fluidização de leito fluidizado por meio de fluidodinâmica computacional**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011.

RURAL, Globo. **Demanda maior deve estimular produção de alimentos funcionais**. 2023. Disponível em: <https://globorural.globo.com/agricultura/noticia/2023/02/demanda-maior-deve-estimular-producao-de-alimentos-funcionais.ghtml>. Acesso em: 01/07/2024.

SANT'ANNA, M. C. S. DE *et al.* **Escolha do modelo de turbulência para um leito fluidizado**. Scientia plena, v. 11, n. 10, 2015.

SANTANA, E. B. **Análise experimental do comportamento fluidodinâmico e da secagem de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em leito de jorro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SANTANA, E. B. *et al.* **Fluid-dynamic behavior of flaxseed fluidized and spouted bed.** *Ciência rural*, v. 47, n. 10, 2017.

SANTOS, D. A. **Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro - estudos experimentais e de simulação via CFD.** Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

SCATENA, R. *et al.* **Estudo da fluidodinâmica em um leito de jorro bidimensional com alimentação não convencional.** *Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química.* São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015.

SCHAEFFER, D. G. **Instability in the evolution equations describing incompressible granular flow.** *Journal of differential equations*, v. 66, n. 1, p. 19–50, 1987.

SIMONIN, C., VIOLLET, P. L. **Predictions of an Oxygen Droplet Pulverization in a Compressible Subsonic Coflowing Hydrogen Flow.** *Numerical Methods for Multiphase Flows*, FED91, p. 65-82, 1990.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to Food Engineering.** Academic Press, 2014.

SOUZA, A. S. **Avaliação por CFD da fluidodinâmica e da transferência de calor em leitos de jorro para diferentes ângulos da base cônica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

STRAATMANN, V. *et al.* **Análise experimental e numérica do coeficiente de restituição em simulações cfd dos regimes de escoamento em um moinho de bolas.** *Blucher Chemical Engineering Proceedings. Anais...* São Paulo: Editora Blucher, 2017.

STRAATMANN, V. **Dinâmica de Partículas irregulares.** Universidade federal de Uberlândia, 2023.

TAKEUCHI, S.; WANG, S.; RHODES, M. **Discrete element simulation of a flat-bottomed spouted bed in the 3-D cylindrical coordinate system.** *Chemical engineering science*, v. 59, n. 17, p. 3495–3504, 2004.

TSUJI, Y.; MORIKAWA, Y.; TERASHIMA, K. **Fluid-dynamic interaction between two spheres.** *International journal of multiphase flow*, v. 8, n. 1, p. 71–82, 1982.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson Education Limited, 2007.

WANG, B.; CHU, K. W.; YU, A. B. **Numerical study of particle–fluid flow in a hydrocyclone**. Industrial & engineering chemistry research, v. 46, n. 13, p. 4695–4705, 2007.

WEN, C. Y.; YU, Y. H. **Mechanics of Fluidization**. Chem. Eng. Prog. Symp. Series, v. 62, p. 100-111, 1966.

WILCOX, D. C. **Formulation of the k-w Turbulence Model Revisited**. AIAA journal, v. 46, n. 11, p. 2823–2838, 2008.

WILCOX, D. C. **Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models**. AIAA journal, v. 26, n. 11, p. 1299–1310, 1988.

YANG, W.-C. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. China particuology, v. 1, n. 3, p. 137, 2003.