



**LUCAS CAIAFA CARDOSO REIS**

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO CFD DA  
FLUIDODINÂMICA DE UM LEITO DE JORRO DE MÉDIO  
PORTE COM DEFLETOR DE FONTE**

**LAVRAS-MG  
2024**

**LUCAS CAIAFA CARDOSO REIS**

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO CFD DA FLUIDODINÂMICA DE  
UM LEITO DE JORRO DE MÉDIO PORTE COM DEFLETOR DE FONTE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Isabele Cristina Bicalho  
Orientadora

Profa. Dra. Iara Hernandez Rodriguez Ansoni  
Coorientadora

**LAVRAS-MG  
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Reis, Lucas Caiafa Cardoso.

Estudo experimental e de simulação CFD da fluidodinâmica de  
um leito de jorro de médio porte com defletor de fonte / Lucas Caiafa  
Cardoso Reis. - 2024.

84 p. : il.

Orientador(a): Isabele Cristina Bicalho.

Coorientador(a): Iara Hernandez Rodriguez Ansoni.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. escoamento sólido-gás. 2. Fluidodinâmica computacional. 3.  
Acessórios internos. I. Bicalho, Isabele Cristina. II. Ansoni, Iara  
Hernandez Rodriguez. III. Título.

**LUCAS CAIAFA CARDOSO REIS**

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO CFD DA FLUIDODINÂMICA DE  
UM LEITO DE JORRO DE MÉDIO PORTE COM DEFLETOR DE FONTE**

**EXPERIMENTAL STUDY AND CFD SIMULATION OF THE FLUID DYNAMICS  
OF A MEDIUM SIZE SPOUT BED WITH FOUNTAIN DEFLECTOR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 19 de julho de 2024.

Profa. Dra. Suellen Mendonça Nascimento UFLA

Prof. Dr. Ricardo Corrêa de Santana UFU

Profa. Dra. Isabele Cristina Bicalho  
Orientadora

Profa. Dra. Iara Hernandez Rodriguez Ansoni  
Coorientadora

**LAVRAS-MG  
2024**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais e minha namorada, que possibilitaram meu crescimento, sempre me apoiando e incentivando, a dar o melhor de mim. A todos os amigos e parentes que de alguma forma fizeram parte dessa jornada eu agradeço com um forte abraço.

Agradeço a professora Amanda Fialho e o professor Vinícius de Abreu D'Ávila, juntamente Universidade Estadual de Minas Gerais (UEMG) unidade Passos, que possibilitaram a utilização dos computadores para a realização deste trabalho.

Agradeço à minha orientadora Isabele Cristina Bicalho e a minha coorientadora Iara Hernandez Rodriguez Ansoni por terem me orientado.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos pelo suporte e oportunidade de crescimento acadêmico e profissional. O apoio recebido foi fundamental para a realização deste trabalho.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo financiamento da bolsa de estudos e financiamento do módulo didático de leite de jorro utilizado, possibilitando assim a realização deste trabalho.

Agradeço aos membros da banca por cederem seu tempo, e auxiliarem na finalização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG)

## RESUMO

O leito de jorro é um equipamento que pode ser aplicado em diversas operações e áreas de estudo. Isso é possível devido ao seu comportamento fluidodinâmico característico, que garante um alto grau de contato entre as fases sólido-gás, altas taxas de mistura e transferência de calor e massa. Apesar de todas essas vantagens, o equipamento apresenta certos entraves para a sua utilização em escala industrial. Assim, propostas de inserção de acessórios internos e variações na configuração do leito de jorro têm sido estudadas. O confinador de fonte é um acessório que auxilia na estabilização do escoamento e vem sendo aplicado recentemente com sucesso. Diante do exposto, no presente trabalho pretende-se investigar experimentalmente e por meio de simulações numéricas a influência da inserção de um dispositivo, denominado defletor de fonte, sobre as características do escoamento ar-partícula no interior de um leito de jorro de médio porte. Uma geometria para o defletor de fonte foi proposta e adaptada ao leito utilizado. O material particulado selecionado para os experimentos foi sementes de mamão secas, que teve sua caracterização física realizada quanto às seguintes propriedades: diâmetro médio, esfericidade e densidade aparente. O meio poroso foi caracterizado quanto a sua densidade *bulk*, porosidade *bulk*, umidade e ângulo de repouso. Pode-se destacar como principal característica das sementes de mamão sua baixa densidade aparente ( $610 \text{ kg/m}^3$ ) e formação de um leito de partículas com alta porosidade (73%). As curvas fluidodinâmicas características experimentais foram obtidas para o equipamento sem defletor e com o defletor posicionado na altura de 15 cm em relação à base cônica do leito. Percebeu-se que a presença do defletor praticamente não interferiu na velocidade de jorro mínimo obtida e nem na queda de pressão máxima experimental. Os experimentos também indicaram que o defletor possibilita a utilização da operação de jorro para materiais leves que normalmente tem sua elutriação favorecida no leito. Os resultados numéricos permitiram visualizar as mudanças na distribuição das partículas no leito de jorro quando inserido o defletor. Desta forma, este estudo possibilitou o projeto de um novo dispositivo interno e a avaliação da sua influência na fluidodinâmica do escoamento em leito de jorro.

**Palavras-chave:** Escoamento sólido-gás; fluidodinâmica computacional; acessórios internos.

## ABSTRACT

The spouted bed is equipment that can be applied in various operations and areas of study. This is possible due to its characteristic fluid-dynamic behavior, which guarantees a high degree of contact between the solid-gas phases, high mixing rates and heat and mass transfer. Despite all these advantages, the equipment presents certain obstacles to its use on an industrial scale. Therefore, proposals for the insertion of internal accessories and variations in the configuration of the spouted bed have been studied. The source confiner is an accessory that helps stabilize the flow and has recently been successfully applied. In view of the above, in the present work we intend to investigate experimentally and through numerical simulations the influence of the insertion of a device, called source deflector, on the characteristics of the air-particle flow inside a medium-port spout bed. A geometry for the source deflector was proposed and adapted to the bed used. The particulate material selected for the experiments was dry mother seeds, which had physical characterization carried out regarding the following properties: average diameter, sphericity and apparent density. The porous medium was characterized regarding bulk density, bulk porosity, humidity and reserve angle. The main characteristic of breast sensations is its low apparent density ( $610 \text{ kg/m}^3$ ) and the formation of a bed of particles with high porosity (0.73). The experimental characteristic fluid dynamic curves were obtained for the equipment without deflector and with the deflector positioned at a height of 15 cm in relation to the conical base of the bed. It was noticed that the presence of the deflector practically did not interfere with the minimum spout velocity obtained and also on the maximum experimental pressure drop. The experiments also indicated that the deflector makes it possible to use the jetting operation for light materials that normally have their elutriation favored in the bed. The numerical results made it possible to visualize the changes in the distribution of particles in the spouted bed when the deflector was inserted. In this way, this study made it possible to design a new internal device and evaluate its influence on the fluid dynamics of spouted bed flow.

**Keywords:** Solid-gas flow; computational fluid dynamics; internal accessories.

## INDICADORES DE IMPACTO

Os resultados da pesquisa sobre o leito de jorro, com a implementação do defletor de fonte, geraram impactos significativos tanto em termos tecnológicos quanto econômicos, ao promover melhorias no desempenho do equipamento, especialmente em relação à operação com materiais particulados de diferentes características. A contribuição tecnológica se dá pela maior eficiência no processo de mistura e transferência de calor e massa, o que amplia a aplicabilidade do leito de jorro em diversas indústrias, como a de secagem, pirólise e gaseificação. Os experimentos e simulações computacionais (CFD) realizados auxiliaram na compreensão detalhada da dinâmica de escoamento ar-partícula e na identificação de soluções potenciais para o problema de scale-up, um desafio crítico para a industrialização em larga escala. Do ponto de vista econômico, a pesquisa reduz custos associados ao desenvolvimento de equipamentos maiores, permitindo o uso otimizado de recursos e a melhoria da viabilidade comercial do leito de jorro em novos processos industriais. Além disso, os impactos culturais e sociais são observados na colaboração com parceiros externos à UFLA e na disseminação do conhecimento técnico gerado, que pode ser aplicado em diversas áreas temáticas, como Tecnologia e Produção e Meio Ambiente, beneficiando tanto a academia quanto a indústria. Ademais, a pesquisa está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, em particular o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao promover inovações tecnológicas que visam o desenvolvimento de infraestruturas industriais sustentáveis. Assim, os impactos dessa pesquisa são concretos e em potencial, com a perspectiva de ampliar seu alcance à medida que novas modificações e estudos sobre o leito de jorro sejam implementados.

## **IMPACT INDICATORS**

The results of the research on the spouted bed, with the implementation of the fountain deflector, generated significant impacts both technologically and economically, by improving the equipment's performance, especially in operations involving particulate materials with different characteristics. The technological contribution lies in the increased efficiency in the mixing process and in heat and mass transfer, which expands the applicability of the spouted bed in various industries, such as drying, pyrolysis, and gasification. The experiments and computational simulations (CFD) conducted aided in a detailed understanding of the air-particle flow dynamics and in identifying potential solutions for the scale-up problem, a critical challenge for large-scale industrialization. From an economic perspective, the research reduces costs associated with the development of larger equipment, allowing for optimized resource use and improving the commercial viability of the spouted bed in new industrial processes. Moreover, the cultural and social impacts are observed in the collaboration with external partners to UFLA and in the dissemination of the technical knowledge generated, which can be applied in various thematic areas, such as Technology and Production and Environment, benefiting both academia and industry. Furthermore, the research aligns with the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), by promoting technological innovations aimed at developing sustainable industrial infrastructure. Thus, the impacts of this research are both concrete and potential, with the prospect of expanding its reach as new modifications and studies on the spouted bed are implemented.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1 – Leito de jorro cilíndrico.....                                                                                                  | 17 |
| Figura 3.2 – Esquema do leito de jorro.....                                                                                                  | 19 |
| Figura 3.3 – Curva característica do leito de jorro.....                                                                                     | 19 |
| Figura 3.4 – Regimes de escoamento em leito.....                                                                                             | 21 |
| Figura 3.5 – Diagramas de profundidade do leito em função da velocidade do ar.....                                                           | 22 |
| Figura 3.6 – Diagrama de Geldart (1973).....                                                                                                 | 25 |
| Figura 3.7 – Modelo original de leito de jorro utilizado por Mathur e Gishler em 1955.....                                                   | 28 |
| Figura 3.8 – Esquema do leito de jorro com confinador de fonte e tubo <i>draft</i> .....                                                     | 29 |
| Figura 3.9 – Esquema do leito de jorro com confinador de fonte, alimentação de sólidos e tubo <i>draft</i> .....                             | 30 |
| Figura 3.10 – Esquema do leito de jorro com o defletor de fonte.....                                                                         | 31 |
| Figura 3.11 – Malha multibloco estruturada usando conexão ponto a ponto.....                                                                 | 39 |
| Figura 3.12 – Malha não-estruturada composta de elementos triangulares e tetraédricos.....                                                   | 40 |
| Figura 3.13 – Malha híbrida.....                                                                                                             | 40 |
| Figura 3.14 – Principais elementos e funções que compõem a técnica CFD.....                                                                  | 41 |
| Figura 4.1 – Sementes de mamão sem exotesta e secas.....                                                                                     | 42 |
| Figura 4.2 – Imagem utilizada para análise no programa FIJI e cálculo do diâmetro médio (a) antes de ser tratada, (b) depois de tratada..... | 44 |
| Figura 4.3 – Imagem utilizada para o cálculo do ângulo de repouso estático das sementes de mamão secas.....                                  | 46 |
| Figura 4.4 – Imagem utilizada para análise do ângulo de repouso dinâmico das sementes de mamão secas.....                                    | 47 |
| Figura 4.5 – Esquema representativo da unidade experimental de leito de jorro.....                                                           | 48 |
| Figura 4.6 – Defletor de fonte.....                                                                                                          | 49 |
| Figura 4.7 – Esquema do leito de jorro (A) sem defletor, (B) com o defletor na altura de 15 cm.....                                          | 49 |
| Figura 4.8 – Geometria do leito de jorro reduzido com o defletor em 15 cm de altura.....                                                     | 50 |
| Figura 4.9 – Malhas utilizadas no teste de dependência (A) 217k, (B) 334k e (C) 408k.....                                                    | 51 |
| Figura 5.1 – Curvas fluidodinâmicas para o leito com o defletor na altura de 15 cm e sem defletor (Primeira repetição).....                  | 57 |
| Figura 5.2 – Curvas fluidodinâmicas para o leito com o defletor na altura de 15 cm e sem defletor (Segunda repetição).....                   | 58 |

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.3 – Curvas fluidodinâmicas para o leito com o defletor na altura de 15 cm e sem defletor (Terceira repetição)..... | 58 |
| Figura 5.4 – Curvas fluidodinâmicas para o leito com o defletor na altura de 15 cm para cada repetição.....                 | 59 |
| Figura 5.5 – Curvas fluidodinâmicas para o leito sem o defletor para cada repetição.....                                    | 60 |
| Figura 5.6 – Resultados do teste de independência das malhas (217k, 334k, 408k).....                                        | 64 |
| Figura 5.7 – Fração volumétrica dos sólidos para as velocidades de entrada de ar equivalentes.....                          | 65 |
| Figura 5.8 – Regiões características do leito de jorro para a velocidade de 30 m/s.....                                     | 66 |
| Figura 5.9 – Perfis de contorno de sólidos simulados para o leito com e sem o uso do defletor.....                          | 67 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1 – Correlações da literatura para a estimativa de $V_{mj}$ .....                                        | 23 |
| Tabela 3.2 – Correlações da literatura para o cálculo de $\Delta P$ .....                                         | 24 |
| Tabela 4.1 – Valores para o ângulo de repouso estático e o escoamento de partículas esperado.....                 | 46 |
| Tabela 4.2 – Relação entre <i>skewness</i> e qualidade da célula.....                                             | 52 |
| Tabela 4.3 – Condições de contorno e parâmetros utilizados nas simulações.....                                    | 53 |
| Tabela 5.1 – Resultados da caracterização física das sementes de mamão secas e do leito de partículas.....        | 55 |
| Tabela 5.2 – Parâmetros fluidodinâmicos na operação do leito com o defletor em 15 cm e sem o uso do defletor..... | 60 |
| Tabela 5.3 – Parâmetros de qualidade <i>Skewness</i> para as três malhas geradas.....                             | 63 |
| Tabela 5.4 – Parâmetros de qualidade <i>Smoothness</i> para as três malhas geradas.....                           | 63 |

## SUMÁRIO

|         |                                                                          |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1       | INTRODUÇÃO .....                                                         | 14 |
| 2       | OBJETIVOS .....                                                          | 16 |
| 2.1     | Objetivo geral .....                                                     | 16 |
| 2.2     | Objetivos específicos.....                                               | 16 |
| 3       | REVISÃO DA LITERATURA.....                                               | 17 |
| 3.1     | Leito de jorro .....                                                     | 17 |
| 3.1.1   | Regiões características do leito de jorro.....                           | 18 |
| 3.1.2   | Curva característica .....                                               | 19 |
| 3.1.3   | Regimes de escoamento em leito .....                                     | 20 |
| 3.1.4   | Principais parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro .....            | 22 |
| 3.1.5   | Classificação de partículas.....                                         | 24 |
| 3.1.6   | Aplicações do leito de jorro .....                                       | 25 |
| 3.1.7   | Limitações do leito de jorro .....                                       | 26 |
| 3.1.8   | Tipos de leito de jorro e acessórios auxiliares.....                     | 27 |
| 3.1.8.1 | Defletor de fonte .....                                                  | 30 |
| 3.2     | Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) .....                     | 31 |
| 3.2.1   | Princípios de CFD .....                                                  | 32 |
| 3.2.2   | Modelos matemáticos utilizados nas simulações CFD .....                  | 33 |
| 3.2.2.1 | O modelo Euleriano Granular Multifásico aplicado ao leito de jorro ..... | 35 |
| 3.2.3   | Análise Numérica .....                                                   | 38 |
| 3.2.3.1 | Tipos de malhas .....                                                    | 38 |
| 3.2.3.2 | Etapas de processamento .....                                            | 41 |
| 4       | MATERIAIS E MÉTODOS.....                                                 | 42 |
| 4.1     | Material particulado .....                                               | 42 |
| 4.2     | Caracterização das partículas .....                                      | 43 |
| 4.2.1   | Densidade aparente .....                                                 | 43 |
| 4.2.2   | Umidade .....                                                            | 43 |
| 4.2.3   | Diâmetro médio .....                                                     | 43 |
| 4.2.4   | Esfericidade média .....                                                 | 44 |
| 4.3     | Caracterização do leito de partículas ( <i>bulk</i> ) .....              | 45 |
| 4.3.1   | Densidade <i>bulk</i> .....                                              | 45 |
| 4.3.2   | Porosidade <i>bulk</i> .....                                             | 45 |

|         |                                                                                                          |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.3   | Ângulo de repouso das partículas .....                                                                   | 45 |
| 4.3.3.1 | Ângulo de repouso estático .....                                                                         | 45 |
| 4.3.3.2 | Ângulo de repouso dinâmico .....                                                                         | 46 |
| 4.4     | Unidade experimental .....                                                                               | 47 |
| 4.5     | Metodologia experimental .....                                                                           | 49 |
| 4.5.1   | Caracterização fluidodinâmica do equipamento.....                                                        | 49 |
| 4.6     | Metodologia numérica .....                                                                               | 50 |
| 4.6.1   | Geometria.....                                                                                           | 50 |
| 4.6.2   | Malhas .....                                                                                             | 51 |
| 4.6.2.1 | Independência das malhas.....                                                                            | 52 |
| 4.6.3   | Definições físicas e cálculos.....                                                                       | 52 |
| 4.7     | Infraestrutura computacional .....                                                                       | 54 |
| 5       | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                                             | 55 |
| 5.1     | Caracterização das sementes e do leito de partículas .....                                               | 55 |
| 5.2     | Caracterização fluidodinâmica do leito.....                                                              | 57 |
| 5.2.1   | Análises experimentais.....                                                                              | 57 |
| 5.2.1.1 | Curva característica .....                                                                               | 57 |
| 5.2.1.2 | Impacto da utilização do defletor de fonte no escoamento de sementes de<br>mamão em leito de jorro ..... | 61 |
| 5.3     | Resultados numéricos.....                                                                                | 62 |
| 5.3.1   | Qualidade das malhas .....                                                                               | 62 |
| 5.3.2   | Teste de independência de malha .....                                                                    | 64 |
| 5.3.3   | Comparação do padrão de escoamento com e sem o uso do defletor de fonte                                  | 66 |
| 6       | CONCLUSÕES .....                                                                                         | 69 |
|         | REFERÊNCIAS .....                                                                                        | 70 |
|         | APÊNDICES.....                                                                                           | 75 |

## 1 INTRODUÇÃO

O leito de jorro é um equipamento adequado para a utilização com diversos tipos de sólidos grossos, lodos, pastas, com texturas irregulares, pegajosas ou viscosas, e com uma ampla distribuição de tamanhos, densidades e misturas de partículas. O seu bom desempenho é devido ao funcionamento com fluxos de ar vigorosos, e movimentos cíclicos criados nas partículas sólidas, levando a uma alta turbulência e reduzindo certos problemas presentes em leitos fluidizados como a segregação e a aglomeração de partículas.

Desenvolvido originalmente por Mathur e Gishler em 1955 para a secagem de grãos de trigo, a tecnologia se mostrou capaz de realizar secagem empregando temperaturas mais baixas que as utilizadas em métodos convencionais da época. Estudos posteriores demonstraram que, mesmo com o mecanismo de fluxo diferente da fluidização, foram obtidos resultados semelhantes ao de Mathur e Gishler, porém para partículas mais grosseiras (Mathur; Epstein, 1974).

A principal característica do leito de jorro é o seu comportamento fluidodinâmico que promove movimentos cíclicos garantindo uma alta eficiência nos processos de mistura e taxas elevadas de transferência de calor e massa. Esse comportamento permite a utilização desse equipamento com uma diversidade de materiais particulados (Hosseini; Fattahi; Ahmadi, 2016).

O leito de jorro é um equipamento de fácil manutenção, demanda baixos investimentos inicial e operacional, e por isso destaca-se como uma alternativa para a aplicação em diversos processos como: pirólise de material orgânico (Du *et al.*, 2014), gaseificação (Cortazar *et al.*, 2019), deposição química de vapor (Abyzov, 2022), revestimento (Pietsch *et al.*, 2019), mistura (Saldarriaga *et al.*, 2015), granulação (Eichner *et al.*, 2016) e secagem (Chielle *et al.*, 2016). Mesmo com diversas aplicações, o leito de jorro apresenta entraves na sua utilização industrial (Tellabide *et al.*, 2020, 2022).

A impossibilidade de aumento de escala pode ser considerada como principal entrave devido à dificuldade de manutenção de um regime fluidodinâmico estável em leitos de grandes dimensões (Tellabide *et al.*, 2022). Por isso, diversas variações no equipamento têm sido desenvolvidas. Uma das alternativas empregadas é a instalação de acessórios internos como agitadores mecânicos, aeradores do leito, tubo *draft* e confinadores de fonte. Entretanto cabe ressaltar que nenhuma dessas alterações foram capazes de sanar completamente o problema de aumento de escala do equipamento (Barros *et al.*, 2022; Pablos *et al.*, 2019).

O defletor de fonte, acessório raramente citado na literatura, já foi mencionado por

Mathur e Epstein em 1974, que apontaram o uso de vários outros acessórios em leito de jorro. Os autores destacaram que o dispositivo pode ser eficiente na diminuição da limitação de altura do jorro, no aumento da simetria na distribuição das partículas ao retornarem ao leito, e tem a capacidade de auxiliar na redução dos efeitos de arraste das partículas, na centralização do jorro e ao operar com altas velocidades de entrada de ar existe a possibilidade de favorecer a quebra de partículas.

Diversos fenômenos acontecem durante o processo no leito de jorro e têm sido amplamente estudados tanto por trabalhos experimentais quanto por simulação computacional (Han *et al.*, 2022; Yue; Shen, 2022). As simulações computacionais permitem a obtenção de informações detalhadas da dinâmica das fases no interior de um equipamento, contribuindo para a redução dos custos que seriam necessários para a realização de experimentos laboratoriais.

O comportamento do leito de jorro, por exemplo, pode ser avaliado pelo método *Computational Fluid Dynamics* (CFD). O método combina os respectivos potenciais da fase contínua do fluido e da fase discreta da partícula para obter informações mais precisas sobre a distribuição do campo de fluxo (Han *et al.*, 2022). Além disso, é adequado para simular as propriedades hidrodinâmicas de colisões entre partículas e bolhas em leitos fluidizados. Estudos vêm sendo desenvolvidos utilizando o método computacional CFD para a simulação do leito de jorro com ou sem modificações para a simulação de propriedades hidrodinâmicas (Batista *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2022; Hooshdaran *et al.*, 2017; Hosseini; Fattahi; Ahmadi, 2016; Moliner *et al.*, 2019; Yue; Wang; Shen, 2021), e em menor escala analisando o efeito térmico (Batista *et al.*, 2020; Hosseini; Fattahi; Ahmadi, 2016).

Diante do exposto, objetivou-se investigar através de experimentos e por meio de simulações numéricas usando técnicas de CFD, as características fluidodinâmicas do escoamento ar-partícula no interior de um leito de jorro convencional operando com e sem o defletor de fonte. Espera-se que os resultados deste estudo auxiliem no entendimento da operação de leito de jorro com o uso de defletor de fonte e forneça soluções para aplicação dos leitos de grandes dimensões ou utilização de materiais de baixa escoabilidade no leito, contribuindo assim, na solução de restrições de *scale-up* do equipamento.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Com base no exposto, o objetivo deste trabalho foi estudar a influência da inserção de um dispositivo defletor de fonte no comportamento fluidodinâmico de um leito de jorro.

### **2.2 Objetivos específicos**

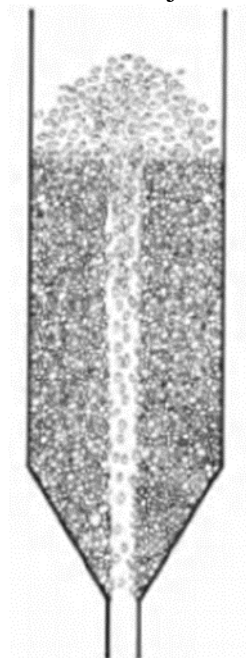
- Conceber, projetar e construir a geometria de um dispositivo defletor de fonte e fazer a sua instalação na bancada de leito de jorro;
- Selecionar um material particulado com características favoráveis a elutriação e realizar a sua caracterização física;
- Obter experimentalmente as curvas fluidodinâmicas características de queda de pressão em função da velocidade de ar de jorro para o leito operando sem e com o defletor de fonte;
- Comparar as principais respostas fluidodinâmicas do leito de jorro modificado com o equipamento convencional;
- Realizar simulações computacionais empregando a ferramenta CFD para investigar as características do escoamento no interior do leito, de forma a complementar os resultados experimentais, e
- A partir dos resultados obtidos indicar aplicações onde seria vantajoso utilizar o leito de jorro com defletor de fonte.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Leito de jorro

O equipamento conhecido atualmente com o nome de leito de jorro (Figura 3.1) foi desenvolvido acidentalmente pelos pesquisadores Mathur e Gishler no ano de 1955, durante um experimento idealizado para estudar a secagem dos grãos de trigo em um leito fluidizado. Durante a condução de um de seus experimentos, os pesquisadores perceberam um pequeno rompimento da placa de distribuição do ar, que por consequência formou um orifício e, devido a isso, possibilitou uma maior vazão de ar. Dessa forma, pode-se observar claramente que as partículas próximas, e no local do rompimento foram submetidas a uma vazão de ar ampliada, formando pontualmente no local um jorro cíclico e ordenado composto pelos grãos de trigo. Desde então, esse comportamento observado, possibilitou a utilização do equipamento leito de jorro para realizar as mais diversas operações no processo industrial (Tellabide *et al.*, 2020, 2022).

Figura 3.1 – Leito de jorro cilíndrico.



Fonte: Mathur e Epstein (1974).

O leito de jorro é um equipamento versátil e adaptativo, tendo amplas possibilidades de aplicação na indústria, devido principalmente, as seguintes características: ausência de elementos móveis, altas taxas de transferência de calor e massa, alta turbulência, fácil controle

do processo, adequação para processamento de materiais perigosos, ampla faixa de temperaturas de operação (até 1200°C), pressões que podem variar até 7 bar, tempos de residência ajustáveis e versatilidade na fonte de aquecimento (eletricidade, gás natural, óleo combustível, fluidos térmicos, vapor, ar quente ou água) (Pablos *et al.*, 2019).

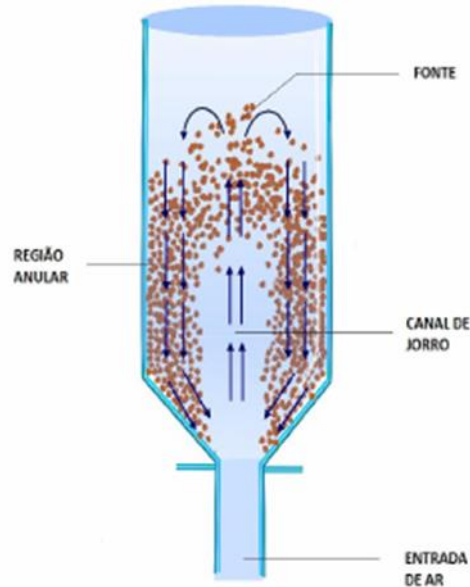
O leito de jorro tem sido aplicado na realização de diversos processos físicos e químicos da indústria. Por exemplo, é utilizado na pirólise de material orgânico, gaseificação, deposição química de vapor, revestimento, mistura, granulação, secagem (incluindo partículas sólidas, pastas e soluções), entre outros. Dessa forma, é aplicado para uma ampla variedade de partículas, de diferentes densidades (de 940 a 7400 kg/m<sup>3</sup>), formatos e tamanhos (de 2 µm a 25 mm) (Brito *et al.*, 2021; Yue; Wang; Shen, 2021).

O comportamento fluidodinâmico distinto do leito de jorro, é a principal característica que o difere do leito fluidizado. Esse comportamento garante um alto nível de agitação e mistura das partículas, e alta eficiência nos processos de troca de calor. Para garantir o melhor desempenho nos processos é necessário que o leito de jorro opere em um regime de escoamento de jorro estável (Tellabide *et al.*, 2020; Yue; Wang; Shen, 2021).

### **3.1.1 Regiões características do leito de jorro**

Na Figura 3.2 tem-se uma representação esquemática para a descrição do funcionamento básico de um leito de jorro. O ar é introduzido através de um único orifício localizado no centro de sua base, formando um jato. O jato de ar penetra na camada de partículas abrindo um canal central chamado de canal de jorro. Durante o processo de formação do canal, as partículas são impulsionadas para cima ultrapassando a altura da superfície do leito de partículas, que é a altura máxima ocupada pelas partículas em repouso dentro do equipamento. A formação do jorro ocorre quando as partículas são jogadas para cima, rompendo a superfície do leito de partículas, e dessa forma são lançadas para as regiões mais distantes do centro. Durante esse processo, as partículas presentes na região anular apresentam o comportamento de empacotamento, e lentamente se movem para baixo e para o centro. Esse movimento é devido às partículas presentes na base, próximas a entrada do jato de ar, ou adjacentes ao canal do jorro, serem arrastadas pelo jato, entrando num ciclo, em que as partículas em sua maioria são retiradas do fundo, e levadas para cima, e sempre mantendo esse movimento durante o processo. Esse comportamento das partículas é uma das principais diferenças entre o leito fluidizado e o leito de jorro, e gerando um regime de jorro estável, sendo este o mais valioso (Tellabide *et al.*, 2020; Yue; Wang; Shen, 2021).

Figura 3.2 – Esquema do leito de jorro.

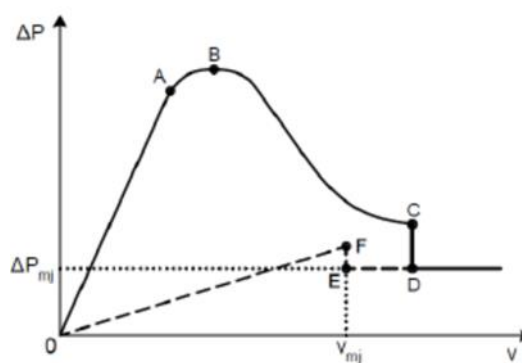


Fonte: Nascimento (2014).

### 3.1.2 Curva característica

A curva característica do leito de jorro (Figura 3.3) possibilita observar a relação entre a variação de velocidade do ar alimentado e a queda de pressão obtida dentro do leito. A curva pode ser analisada em alguns trechos:

Figura 3.3 – Curva característica do leito de jorro.



Fonte: Barcelos (2016).

No trecho 0-A não há presença de movimentação das partículas no leito, caracterizando o leito estático. À medida que o fluxo de ar e a pressão aumentam, a curva se aproxima da secção A-B, onde devido ao aumento da vazão de ar as partículas começam a ser empurradas e compactadas, criando um canal central e logo abaixo da região anular cria-se um bolsão de ar

envolto das partículas extremamente compactadas, levando assim à queda de pressão máxima ( $\Delta P_{\max}$ ). Após o rompimento da região anular, as partículas são arremessadas para o alto, e há uma redução brusca da queda de pressão ( $\Delta P$ ), esse comportamento é característico da região B-C, onde tem-se o aumento da velocidade do gás e a redução da pressão. Até esse ponto do gráfico as partículas não apresentam comportamento de jorro, aproximando-se mais do comportamento de um leito fluidizado. Porém, com um ligeiro aumento na velocidade do gás, as partículas presentes logo acima ao orifício de saída do gás se deslocam totalmente para cima, fazendo assim com que haja uma queda brusca de pressão caracterizada no gráfico pela região C-D. No ponto D já é possível observar a formação de um jorro, e a pressão obtida nesse ponto é a queda de pressão mínima ( $\Delta P_{\min}$ ). A partir do ponto D é possível reduzir a velocidade do gás para se obter a velocidade mínima de jorro ( $V_{mj}$ ) que pode ser observada no ponto E. A partir de agora qualquer redução da velocidade do gás cessará a o regime de jorro, e tornará o leito estático novamente, levando a um aumento da pressão (ponto F), e consequentemente redução da queda de pressão do processo (Mathur; Epstein, 1974).

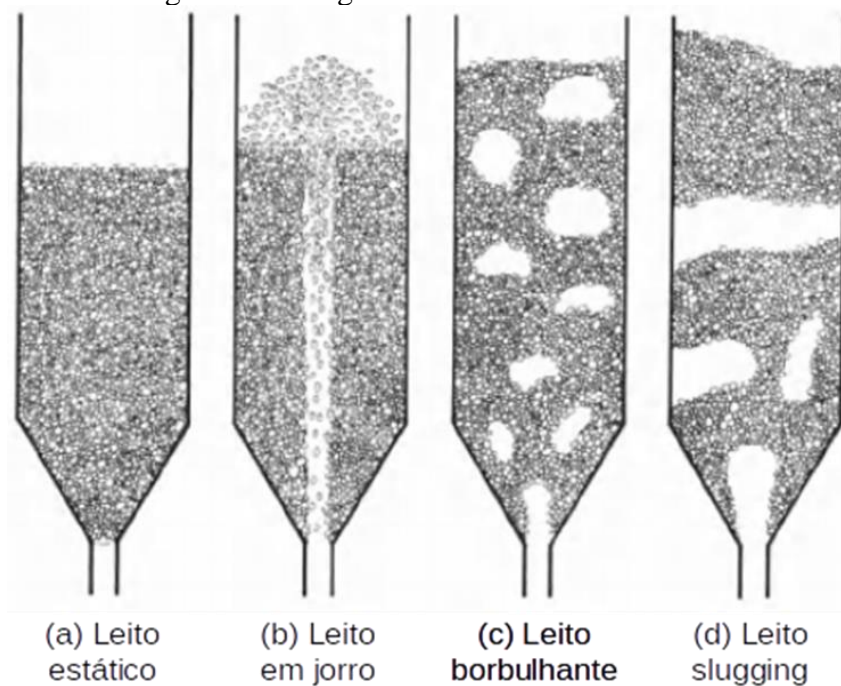
### 3.1.3 Regimes de escoamento em leito

Mesmo que o regime de escoamento característico do jorro seja o desejado de se obter, outros regimes podem ser formados durante o processo. Na Figura 3.4 estão representados os quatro tipos de regimes possíveis de serem obtidos no leito. Tais regimes resultarão da combinação de certos parâmetros como a velocidade do gás, as características físicas das partículas e a sua quantidade, e a configuração do equipamento. Quando se utiliza faixas condições adequadas, o regime que será formado é o (b), sendo este o regime que caracteriza o jorro estável. Nele é possível obter a maior eficiência nas trocas de momento, massa e energia (Liu *et al.*, 2015; Mathur; Epstein, 1974).

Pequenas mudanças nas condições de operação podem causar a instabilidade do leito, levando à formação de regimes de escoamento indesejados como mostrado na Figura 3.4 (a, c e d). O regime demonstrado em (a) é característico do leito estático ou fluidizado, nele a velocidade que está sendo empregada não é suficientemente alta para que o fluxo de ar impulsione as partículas formando o jorro, dessa forma, o leito pode se apresentar em estado empacotado, em que as partículas estão impedindo a passagem do ar entre elas ou podem estar em um estado de fluidização, onde o ar passa pelas partículas, porém não apresenta força o suficiente para impulsioná-las para cima formando o jorro. Os regimes (c) e (d) são característicos de instabilidade no leito de jorro, e normalmente são relacionados à velocidade

do ar, tamanho das partículas e profundidade do leito (Mathur; Epstein, 1974; Yue; Wang; Shen, 2021).

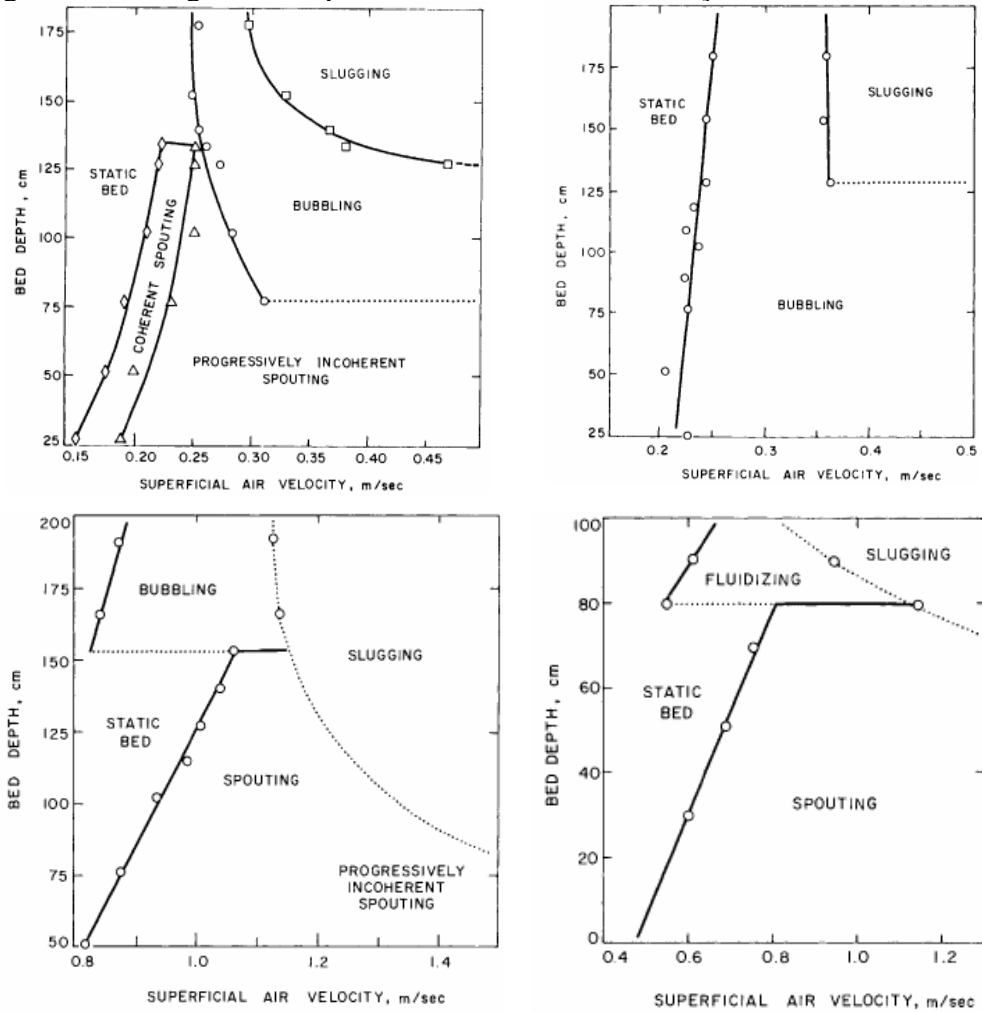
Figura 3.4 – Regimes de escoamento em leito.



Fonte: Adaptada de Mathur e Epstein (1974).

Em Mathur e Epstein (1974) são apresentados diagramas de profundidade do leito em função da velocidade do ar (Figura 3.5), em que são indicadas as faixas desses dois parâmetros sendo que é possível obter um regime de jorro estável, porém, diagramas são restritos a certas faixas de diâmetro das partículas, da entrada de ar e da base.

Figura 3.5 – Diagramas de profundidade do leito em função da velocidade do ar.



Fonte: Mathur e Epstein (1974).

### 3.1.4 Principais parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro

Uma etapa muito importante no estudo do leito de jorro é a estimativa precisa de certos parâmetros fluidodinâmicos como: velocidade mínima de jorro ( $V_{mj}$ ), queda de pressão mínima de jorro ( $\Delta P_{min}$ ), queda de pressão máxima ( $\Delta P_{max}$ ) e a altura de fonte ( $H_f$ ) (Melo, 2014).

A velocidade mínima de jorro ( $V_{mj}$ ) é considerada como um dos parâmetros mais importantes a serem considerados, e pode ser definida como sendo o fluxo mínimo de gás necessário para manter as condições de jorro estáveis, sendo fortemente dependente das características geométricas do leito e das propriedades físicas da fase sólida. A  $V_{mj}$  é fundamental para se manter um regime jorro estável, e é importante na etapa de cálculo do dimensionamento do soprador que será usado, sendo afetado principalmente pelo diâmetro da câmara, e pela altura do leito fixo de sólidos (Mathur; Epstein, 1974; Moliner *et al.*, 2017).

Na Tabela 3.1 são apresentadas algumas das principais correlações para o cálculo de

$V_{mj}$ . Devido à variedade de parâmetros que podem afetar a formação do jorro, diversas correlações de  $V_{mj}$  são reportadas na literatura, porém nenhuma delas obteve sucesso em prever a maioria das variáveis, principalmente quando se trata de equipamentos de médio a grande porte, os quais apresentam-se menos estáveis.

Tabela 3.1 – Correlações da literatura para a estimativa de  $V_{mj}$ .

| Autores                           | Correlações                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mathur e Gishler<br>(1955)        | $V_{mj} = \left(\frac{D_p}{D}\right) \left(\frac{D_i}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{2gH(\rho_p - \rho)}{\rho}}$                                                                                                                            |
| Shi, Wang e Li<br>(2011)          | $V_{mj} = 2D^{1-\exp(-7d^2)} \left(\frac{D_p}{D}\right) \left(\frac{D_i}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{2gH(\rho_p - \rho)}{\rho}}$<br>Para $D > 0.4$ m                                                                                     |
| Olazar <i>et al.</i> (1994)       | $V_{mj} = \left(\frac{D_p}{D}\right) \left(\frac{D_i}{D}\right)^{0.1} \sqrt{\frac{2gH(\rho_p - \rho)}{\rho}}$                                                                                                                                    |
| Yang, Lim e Epstein<br>(1996)     | $V_{mj} = 1,63V_t \left(\frac{D_p}{D}\right)^{0,414} \left(\frac{D_i}{D}\right)^{0,127} \left(\frac{H_m}{D}\right)^{0,452} \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho}\right)^{-0,149}$<br>Para altas temperaturas                                          |
| Anabtawi, Uysal e<br>Jumah (1992) | $V_{mj} = 2,44 \left(\frac{D_p}{D}\right)^{0,7} \left(\frac{D_0}{D}\right)^{0,58} \left(\frac{H}{D}\right)^{0,5} \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho}\right)^{-0,149} \left[\frac{2gH(\rho_p - \rho)}{\rho}\right]^{0,28}$<br>Para colunas quadradas |

Legenda: Altura do leito estático (H), Altura máxima do leito ( $H_m$ ), força da gravidade (g), densidade das partículas ( $\rho_p$ ), densidade do gás ( $\rho$ )

Fonte: Adaptada de Moliner *et al.* (2017).

Outro parâmetro importante, principalmente para a otimização dos processos no leito de jorro e dimensionamento do soprador a ser utilizado, é a queda de pressão ( $\Delta P$ ). Na análise da  $\Delta P$  pode ser destacado a queda de pressão máxima ( $\Delta P_{max}$ ) e a queda de pressão no jorro estável ( $\Delta P_s$ ). A  $\Delta P_{max}$  é a pressão necessária para se romper a superfície do leito de partículas, iniciando o processo de jorro nas partículas. A  $\Delta P_s$  é a pressão mínima necessária para se manter o regime de jorro estável, sendo esta relativamente menor que a  $\Delta P_{max}$  (Marreto, 2006; Mathur; Epstein, 1974).

É possível encontrar na literatura algumas correlações para a  $\Delta P$ , mas nenhuma dessas equações foi passível de contemplar uma ampla faixa de parâmetros, sendo restritas a determinadas faixas experimentais, e para equipamentos de pequeno porte (Moliner *et al.*, 2017). Na Tabela 3.2 são apresentadas as principais correlações para  $\Delta P$ :

Tabela 3.2 – Correlações da literatura para o cálculo de  $\Delta P$ .

| Autores                     | Correlações                                                                                                                                                        | Geometria  |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Manurung (1964)             | $\frac{-\Delta P_{max}}{\rho_b g H} = \left[ 0,8 + \frac{6,8}{\tan \gamma} \left( \frac{D_i}{D} \right) \right] - \frac{34,4 d_p}{H}$                              | cilíndrico |
| Olazar <i>et al.</i> (1994) | $\frac{-\Delta P_{max}}{\Delta \rho_s} = 1 + 0,35 \left( \frac{H}{D} \right)^{0,1} \left( \frac{D_i}{D} \right)^{1,1} Ar^{0,1}$                                    | cilíndrico |
| Kmieć (1980)                | $\frac{-\Delta P_{max}}{\rho_b g H} = 1 + 0,206 \exp \left( \frac{1,24 H}{D} \right)$                                                                              | cônico     |
| Olazar <i>et al.</i> (1993) | $\frac{-\Delta P_{max}}{\Delta \rho_s} = 1 + 0,116 \left( \frac{H}{D_i} \right)^{0,5} \tan \left( \frac{\theta}{2} \right)^{-0,8} Ar^{0,0125}$                     | cônico     |
| Markowski e Kaminski (1983) | $\frac{-\Delta P_s}{\rho_b u_{ms}^2} = 0,19 \left( \frac{D}{H_0} \right)^{0,56} \left( \frac{D_i}{H_0} \right)^{2,39} \left( \frac{H_0}{d_p} \right)^{2,35}$       | cônico     |
| Olazar <i>et al.</i> (1993) | $\frac{-\Delta P_s}{H_0 \rho_p (1 - \varepsilon_0) g} = 1,20 \left( \tan \frac{\gamma}{2} \right)^{-0,11} (Re_{ms})^{-0,06} \left( \frac{H_0}{D_i} \right)^{0,08}$ | cônico     |

Fonte: Adaptada de Moliner *et al.* (2017).

Alguns parâmetros relacionados ao jorro que é formado são frequentemente negligenciados, e apresentam importância principalmente para o dimensionamento do equipamento e desenvolvimento de variações do mesmo. A altura da fonte ( $H_f$ ), é a altura em que o jorro estável pode chegar, e pode ser obtida a partir da equação 3.1 (Moliner *et al.*, 2017).

$$H_f = 1,01 * 10^{-2} \gamma^{-0,14} \left( \frac{D_0}{D_i} \right)^{1,14} \left( \frac{D_i}{d_p} \right)^{0,83} \left( \frac{H_0}{D_0} \right)^{-0,52} \left( \frac{V}{V_{mj}} \right)^{4,8} \rho_p^{-0,12} \phi^{-1,45} \quad (3.1)$$

Em que  $H_f$  é a altura da fonte,  $\gamma$  é o ângulo de atrito inercial da partícula,  $D_i$  é o diâmetro de entrada e  $d_p$  é o diâmetro da partícula.

O diâmetro do jorro ( $D_j$ ) que é o diâmetro em que o jorro se espalha obtido a partir da equação 3.2, e a altura máxima da fonte ( $H_m$ ) que representa a maior altura que o jorro pode alcançar, pode ser obtida a partir da equação 3.3, e para se obter a  $H_{Max}$  em equipamentos com o diâmetro ( $D$ )  $> 0,5$  pode utilizar a equação 3.4 (Moliner *et al.*, 2017).

$$D_j = 0,52 G^{0,16} D_i^{0,41} \gamma^{-0,19} D_b^{0,8} \left( \frac{V_i}{V_{mj}} \right)^{0,8} \quad (3.2)$$

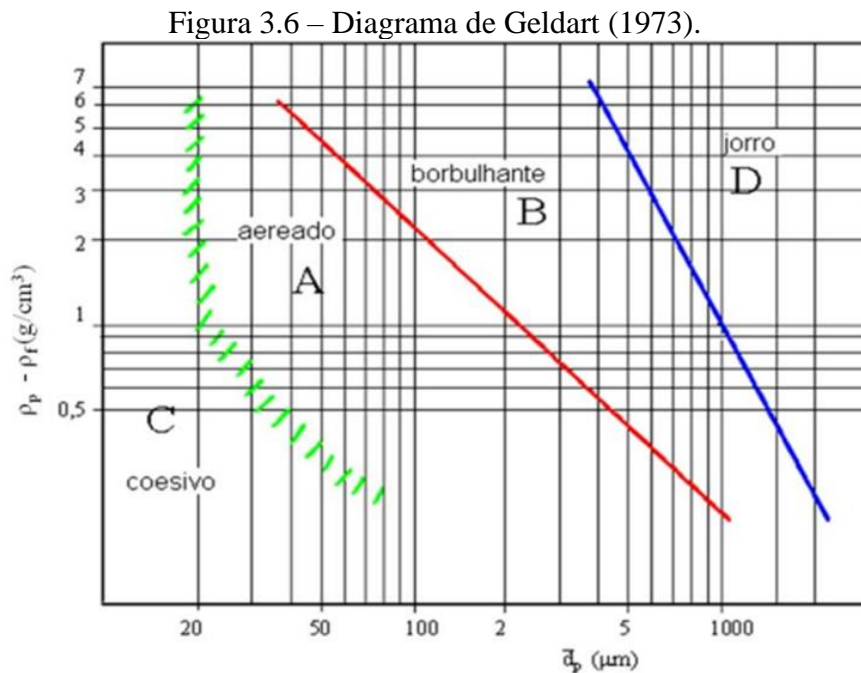
$$H_m = \frac{D^2}{d_p} \left( \frac{D}{D_i} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{568 b^2}{Ar} \left( \sqrt{1 + 35,9 * 10^{-6} Ar - 1} \right)^2 \quad (3.3)$$

$$H_m = \frac{0,68 D^{\frac{4}{3}}}{d_p^{\frac{1}{3}}} \quad (3.4)$$

### 3.1.5 Classificação de partículas

A principal classificação quanto à fluidização de partículas utilizada foi introduzida em 1973 por Geldart. Geldart propôs relacionar a densidade e o diâmetro da partícula com a

densidade do fluido, e dessa forma, foi desenvolvido o diagrama de Geldart (Figura 3.6), no qual as partículas são classificadas em quatro grupos nomeados de A, B, C e D. Cada um desses grupos apresenta características específicas em relação à capacidade e comportamento de fluidização das partículas (Cremasco, 2017; Han *et al.*, 2022).



Segundo Cremasco (2017), as partículas classificadas no grupo A são partículas pequenas de fácil fluidização, e que alcançam a velocidade mínima de fluidização primeiro que o regime de escoamento borbulhante. O grupo B é caracterizado por partículas que apresentam dificuldade de fluidização, apresentando principalmente o regime borbulhante. O grupo C é composto por partículas que apresentam comportamento coesivo, difíceis de fluidizar devido a formação de canais preferenciais, e podendo levar ao regime de *slugging*. As partículas do grupo D são partículas maiores e mais fáceis de formar jorros.

### 3.1.6 Aplicações do leito de jorro

A versatilidade do leito de jorro o permite operar com alta eficiência, utilizando diferentes tipos de partículas e em diversos processos físico-químicos. Devido a isso, o equipamento tem sido aplicado com sucesso em diversas aplicações como: revestimento, secagem (sólidos particulados, soluções, pastas e fluidos), combustão, gaseificação, granulação, pirólise, misturas e em diversas áreas como: indústrias alimentícia, farmacêutica, agrícola,

nuclear, de energia e química (Yang *et al.*, 2014; Yue; Wang; Shen, 2021).

Du *et al.* (2014) estudaram a utilização do leito de jorro cônico para a realização de pirólise catalítica de *Miscanthus giganteus*, concluindo que o leito de jorro é um sistema promissor para a realização de pirólise, principalmente devido ao seu comportamento que garantiu uma maior oxigenação durante o processo, e assim, um melhor resultado.

San José *et al.* (2013) analisaram em seu trabalho o desempenho do leito de jorro para a secagem de resíduos de lodo da indústria de papel. Para isso, eles utilizaram leito de jorro cônico junto com tubo *draft* não poroso, e utilizaram gases quentes produzidos durante a fabricação da celulose como fluido no processo. Além de concluírem a importância do uso do tubo *draft* não poroso na estabilização do leito, eles também observaram que a utilização dos gases provenientes da produção de celulose reduz o custo operacional, tornando assim o leito de jorro mais atrativo para esse processo.

Chielle *et al.* (2016) utilizaram o leito de jorro cônico para a secagem de sementes de mamão, com o objetivo de obter o óleo. Eles chegaram a duas conclusões importantes, a de que o leito de jorro se apresentou adequado para a secagem das sementes, principalmente se a priori o objetivo for a extração do óleo, pois as temperaturas utilizadas no trabalho não foram altas o suficiente para degradar os componentes do óleo. A outra conclusão foi a da importância de se realizar uma pré-secagem das sementes, o que auxiliou na obtenção de um fluxo estável no leito de jorro, garantindo assim a melhor eficiência possível.

Mesmo com uma ampla capacidade de aplicação em processos industriais, o leito de jorro apresenta algumas limitações que ainda inviabilizam a sua utilização em escala industrial como será comentado na próxima seção.

### **3.1.7 Limitações do leito de jorro**

A principal limitação do leito de jorro é o seu de aumento de escala e isso se deve principalmente à instabilidade no processo, à altura máxima do leito, ao formato e distribuição das partículas, e o pouco conhecimento sobre a fluidodinâmica em equipamentos de médio e grande porte (Tellabide *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2014).

Santos *et al.* (2019) apontam a dificuldade da operação com misturas de partículas com tamanhos e densidades variados. Os autores sugerem que a fluidodinâmica do leito de jorro operando com misturas é influenciada pela segregação das partículas, o que dificulta a formação das regiões características do leito de jorro. Segundo os autores, essa segregação ocorre devido à interação entre as partículas, sendo que no leito formado a região anular irá ser extremamente

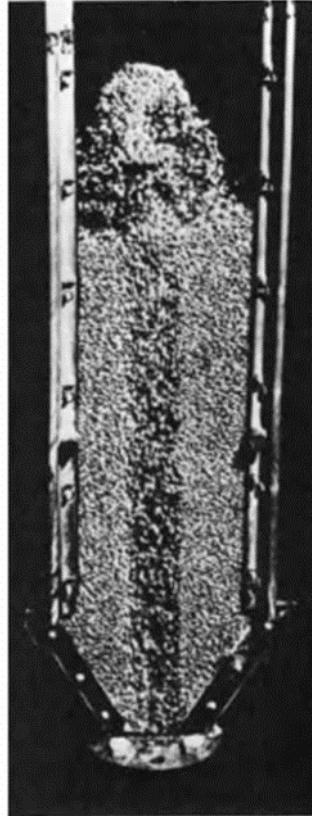
compactada, devido às partículas menores se acomodarem nos espaços formados entre as partículas maiores.

A operação com partículas finas em leito de jorro apresenta certas limitações como, a razão entre o diâmetro da entrada do gás e o diâmetro da partícula,  $DO/DP$ , que não deve ultrapassar o valor de 30, e a ocorrência do arraste das partículas que leva a perda de material (Altzibar *et al.*, 2017; Tellabide *et al.*, 2022). Para solucionar o problema, Altzibar *et al.* (2017) inseriram dois dispositivos no leito de jorro (tubo *draft* e confinador de fonte), o que permitiu aumentar a estabilidade e reduzir o arraste de partículas finas.

### **3.1.8 Tipos de leito de jorro e acessórios auxiliares**

Como comentado em tópicos anteriores, é possível encontrar na literatura diversas variações do leito de jorro. O modelo original utilizado por Mathur e Gishler em 1955 consistia em um corpo cilíndrico com uma pequena base cônica, sem a presença de nenhum acessório interno (Figura 3.7). A configuração original apresentava algumas limitações de uso, como o tamanho das partículas e aumento de escala. As diversas variações do leito de jorro possibilitaram a sua utilização com uma gama maior de tamanhos e formatos das partículas, porém nenhuma das variações pôde ainda resolver totalmente as suas limitações (Du; Wu; Ma, 2023).

Figura 3.7 – Modelo original de leito de jorro utilizado por Mathur e Gishler em 1955.



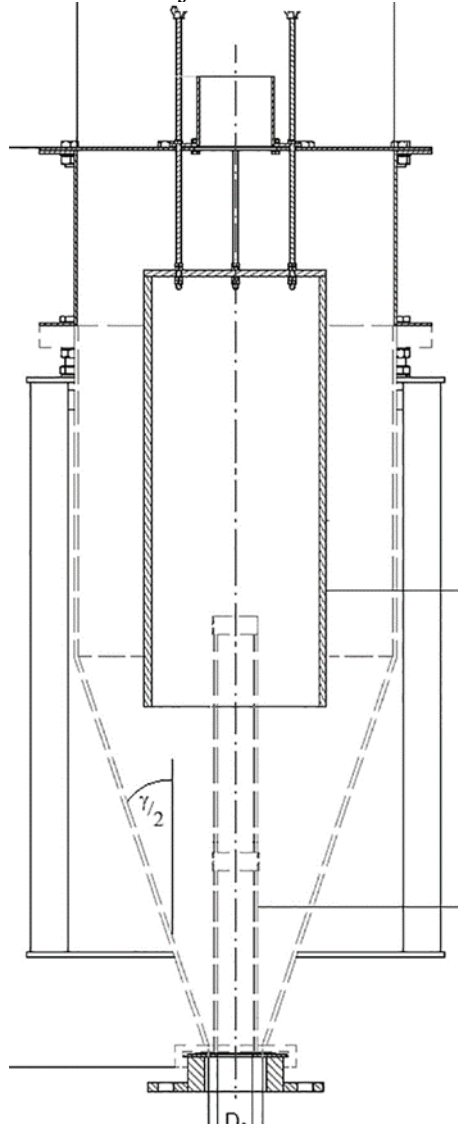
Fonte: Adaptada de Mathur e Epstein (1974).

Du, Wu e Ma (2023) realizaram uma revisão da literatura com o objetivo de analisar as perspectivas para o leito de jorro, em termos experimentais e de simulação computacional. Nesse trabalho eles descrevem as três classificações de leito de jorro que são utilizadas como base (leito de jorro cilíndrico, bidimensional e retangular). Também é descrito o uso de diversos acessórios internos que tem como objetivo melhorar ou permitir operações, que com o leito de jorro convencional não seria possível. Alguns desses acessórios são: tubos *drafts*, jorros múltiplos, tubo *draft* de circulação interna e o confinador de fonte.

Altzibar *et al.* (2017) desenvolveram em seu trabalho um acessório com o objetivo de auxiliar no processo de secagem de partículas finas (Figura 3.8). Esse acessório foi denominado de confinador de fonte, e é formado por um corpo no formato de tubo cilíndrico, e uma base que forma a tampa do confinador no formato cônico. O confinador de fonte é posicionado no centro do leito logo acima da região onde será formada a fonte. Quando o processo de jorro é iniciado, o jorro fica confinado dentro do corpo do confinador de fonte, e ao chegar na tampa, o fluxo de ar da fonte é direcionado para baixo, forçando assim as partículas para baixo. Dessa forma o confinador de fonte além de restringir a altura máxima da fonte, direciona as partículas para baixo, reduzindo a elutrição delas e a perda de material, e aumentando a estabilidade do

jorro com partículas finas. Neste trabalho, os autores também mostraram que houve um aumento na eficiência no processo de secagem quando combinaram o confinador de fonte com um tubo *draft*.

Figura 3.8 – Esquema do leito de jorro com confinador de fonte e tubo *draft*.

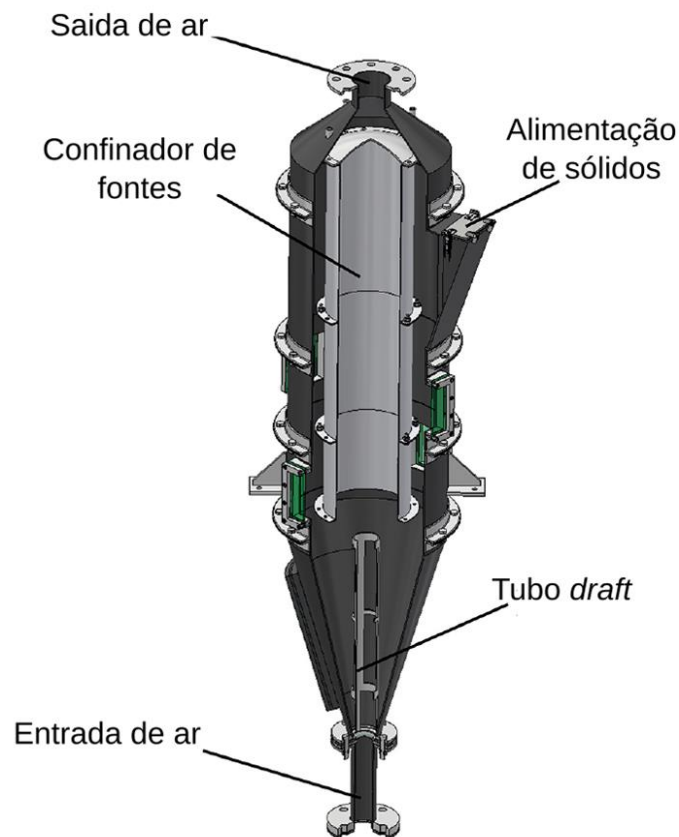


Fonte: Adaptada de Altzibar *et al.* (2017).

Sukunza *et al.* (2020) estudaram os efeitos causados pela adição de um alimentador de partículas em um leito de jorro cônico com tubo *draft* poroso e confinador de fonte, durante o processo de secagem de areia fina e ultrafina (Figura 3.9). Para isso, eles estudaram cinco configurações do leito de jorro, alternando entre elas a posição da alimentação das partículas, a adição do tubo *draft* não poroso, a utilização do confinador de fonte e a utilização do direcionador de sólidos. Segundo os autores, o uso desses acessórios auxiliam na estabilidade e otimização do processo de secagem da areia fina e ultrafina, além disso a posição da

alimentação influencia diretamente no processo de secagem. Dessa forma concluíram que duas configurações apresentaram uma alta eficiência no processo de secagem dos dois tipos de areias utilizadas.

Figura 3.9 – Esquema do leito de jorro com confinador de fonte, alimentação de sólidos e tubo *draft*.

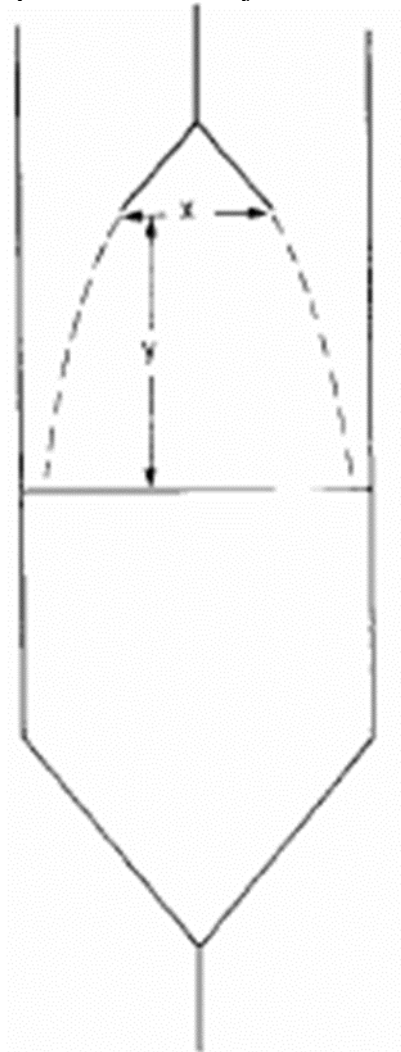


Fonte: Adaptada de Sukunza *et al.* (2020).

### 3.1.8.1 Defletor de fonte

Mathur e Epstein (1974) em seu livro apresentam um acessório chamado de defletor de fonte (Figura 3.10), que se assemelha muito ao confinador de fonte, porém, este dispositivo não apresenta a parte do corpo cilíndrico, sendo formado apenas por um chapéu no formato cônico. Segundo eles, o defletor de fonte garante uma maior espalhabilidade das partículas na região anular, controla a altura máxima do jorro, mantém as oscilações do jorro ao mínimo, e caso o processo seja realizado utilizando altas velocidades, o defletor de fonte também atua como quebrador de partículas. Tal dispositivo ainda pode ser utilizado para garantir a estabilidade a escoamentos de partículas que não tenham tendência a formar um jorro estável.

Figura 3.10 – Esquema do leito de jorro com o defletor de fonte.



Fonte: Mathur e Epstein (1974).

### 3.2 Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD)

A capacidade computacional em constante crescimento, juntamente com a facilidade de aplicação de técnicas numéricas, têm permitido o uso da fluidodinâmica computacional (CFD) na solução de problemas complexos de engenharia e física. Além disso, os avanços na capacidade gráfica das estações de trabalho e a disponibilidade de pacotes comerciais de CFD que podem ser executados em PCs tornaram a utilização dessas técnicas mais acessível tanto no meio acadêmico-científico quanto na indústria. Dessa forma, os custos reduzidos dos equipamentos necessários e a facilidade de uso estão impulsionando o uso cada vez maior das técnicas numéricas na resolução de diversos problemas (Cengel; Cimbala, 2015).

As técnicas de CFD são uma poderosa ferramenta para estudos de fluxo, principalmente multifásicos, como os encontrados no leito de jorro (fluxo gás-sólido). Dessa forma, é possível

encontrar diversos trabalhos que as utilizam para analisar o comportamento fluidodinâmico e até termodinâmico nos leitos de jorro (Barcelos, 2016; Batista *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2022; Hooshdaran *et al.*, 2017; Moliner *et al.*, 2019).

Han *et al.* (2022) utilizaram o método de elementos discretos aplicado a CFD (CFD-DEM) para estudar o padrão fluidodinâmico de partículas do grupo D de Geldart, em leito de jorro retangular. Dessa forma eles conseguiram identificar três processos durante a formação do jorro estável.

Yue e Shen (2022) por meio do método CFD-DEM, estudaram efeitos de instabilidade no jorro formado em leitos de jorro cônicos e chegaram à conclusão de que a velocidade do ar, junto com a angulação presente no cone influenciam diretamente nesses efeitos.

Para a realização dessas análises computacionais é possível utilizar uma ampla gama de *softwares* voltados para o processo de simulação. Alguns exemplos de *softwares* que estão disponíveis são: FlexPDE, CFX, FLUENT, POLIFLOW, OpenFOAM, Saturne entre outros.

### 3.2.1 Princípios de CFD

Para o processo de simulação é necessário conhecer e manipular certas equações que regem o comportamento do sistema a ser estudado. Normalmente essas equações são as equações de Navier-Stokes, equação da continuidade ou lei da conservação da massa, equação de energia e a equação de rotação (Liu *et al.*, 2015; Malekjani; Jafari, 2018).

A lei da conservação de massa (equação 3.5) expressa o equilíbrio entre o fluxo que entra e que sai de uma determinada massa em uma determinada região (Malekjani; Jafari, 2018).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.5)$$

Nela  $\rho$  é a densidade expressa em  $\text{kg/m}^3$ ,  $t$  é o tempo expresso em segundos (s),  $x_i$  são as coordenadas cartesianas do sistema,  $u$  é a componente de velocidade, e  $i$  é o índice das coordenadas dos componentes.

Na equação 3.6, é apresentada a equação de momento, em que é dada a taxa de variação de momento linear e a soma das forças externas agindo sobre o fluido (Malekjani; Jafari, 2018).

$$\frac{\partial(\rho x_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho x_i x_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -\rho \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (3.6)$$

Nela  $\rho$  é a densidade expressa em  $\text{kg/m}^3$ ,  $t$  é o tempo expresso em segundos (s),  $x$  são as coordenadas cartesianas do sistema,  $u$  é a componente de velocidade,  $\delta$  é delta de Kronecker,  $g$  é a aceleração da gravidade expressa em  $\text{m/s}^2$ ,  $i$  e  $j$  são os índices das coordenadas dos componentes, e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica expressa em  $\text{kg/ms}$ .

Na equação 3.7 é apresentada a lei da conservação da energia, nela é demonstrado uma igualdade entre a taxa de mudança de energia de um fluido e a taxa de calor adicionado ou trabalho realizado (Malekjani; Jafari, 2018).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_a T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C_a T) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial}{\partial x_j} \right) = S_T \quad (3.7)$$

Nela  $\rho$  é a densidade expressa em  $\text{kg/m}^3$ ,  $T$  é a temperatura expressa em kelvin (K),  $x$  são as coordenadas cartesianas do sistema,  $u$  é a componente de velocidade,  $\lambda$  é a condutividade térmica expressa em  $\text{W/m}^2\text{K}$ ,  $C_a$  é a capacidade de calor específica expressa em  $\text{W/Kg}^*\text{K}$ , em que  $j$  é o índice da coordenada dos componentes, e  $S_T$  é o dissipador ou fonte térmica expressa em  $\text{W/m}^3$ .

Além disso, modelos de turbulência devem ser resolvidos junto às equações de Navier-Stokes. É possível utilizar dois modelos para o cálculo da turbulência no sistema, o modelo de Navier-Stokes médios de Reynolds (RANS) e o modelos que trabalham no cálculo de flutuações, como as simulações de grande escala (LES, na sigla em inglês) (Malekjani; Jafari, 2018). Segundo Lan *et al.* (2012) devido a estrutura do escoamento em leito de jorro, a turbulência não seria um fenômeno dominante. Ele também fala que não há um consenso sobre qual é o melhor modelo para o cálculo de turbulência a ser utilizado.

### 3.2.2 Modelos matemáticos utilizados nas simulações CFD

No leito de jorro é encontrado um sistema composto por duas fases, uma fase fluida que seria representada pelo fluxo de ar ou de gás, e uma fase sólida representada pelas partículas presentes no sistema. Devido a isso, é possível utilizar duas abordagens para a realização dos cálculos, seriam elas a abordagem Euleriano-Lagrangeana (CFD-DEM) e a abordagem Euleriano-Euleriano (TFM) (Moliner *et al.*, 2017).

Na abordagem Euleriano-Lagrangeana, a fase sólida é representada pelas partículas individualmente, sendo que para cada uma das partículas (rastreada separadamente das outras), são realizados os cálculos da equação do movimento. Devido a isso, a abordagem Euleriano-Lagrangeana permite obter uma quantidade significativa de informações sobre o comportamento local das partículas (Moliner *et al.*, 2017).

Já na abordagem Euleriano-Euleriano as duas fases são tratadas como contínuas e interpenetrantes, dessa forma o modelo considera que as duas fases, gás e sólidos, interagem entre si, pressupondo que haja trocas contínuas de massa, momento e energia entre as fases (Lan *et al.*, 2012). Essa interação ocorre de forma que as duas fases não ocupem o volume uma

da outra, e assim é possível aplicar o conceito de fração volumétrica das fases. Para isso, as frações volumétricas são consideradas como funções contínuas de espaço e tempo, com a soma igual a um. É possível utilizar três modelos Euleriano-Euleriano diferentes para sistemas multifásicos. São eles: o modelo volume de fluido (VOF), o modelo de mistura e o modelo Euleriano (Ansys, 2016).

### **Modelo de Volume de Fluidos (VOF)**

O modelo VOF é utilizado em situações contendo dois ou mais fluidos imiscíveis, e que a posição da interface entre os fluidos é de interesse. Nele é utilizado um único conjunto de equações de momento para todos os fluidos, e a fração volumétrica de cada fluido é rastreada em todo o domínio. Esse modelo encontra diversas aplicações principalmente em análise do comportamento estável ou transitório de qualquer interface contendo sistema líquido-gás (Ansys, 2016).

### **Modelo de Mistura**

Esse modelo consegue lidar com duas ou mais fases, sendo elas formadas por fluidos e/ou partículas. Ele utiliza a equação de momento da mistura para estabelecer as velocidades relativas que descrevem as fases dispersas. Ele pode ser aplicado em sistemas com fluxos com carga baixa de partículas, fluxos com bolhas, sedimentação e separadores de ciclone. Também pode ser usado sem as velocidades relativas para as fases dispersas, para modelar fluxo multifásico homogêneo (Ansys, 2016).

### **Modelo Euleriano**

O modelo Euleriano é um dos modelos multifásicos mais complexos. Nele as equações de momento e da continuidade são resolvidas para cada fase. Para o acoplamento entre as fases ser alcançado, é utilizado os coeficientes de pressão e troca interfacial, e a forma como o acoplamento é tratado depende do tipo de fases envolvidas. A aplicação da teoria cinética em fluxos granulares (fluido-sólido) permite a obtenção de diversas propriedades do fluxo, e é influenciado pelo tipo de mistura a ser modelada. Algumas das aplicações do modelo euleriano multifásico são: colunas de bolhas, suspensão de partículas, leitos fluidizados e leitos de jorro (Ansys, 2016).

Devido ao grande número de partículas presentes no leito de jorro, se torna a melhor opção para sistemas grandes e ou complexos. Moliner *et al.* (2019) estudaram as duas abordagens (Euleriano-Lagrangeana e Euleriano-Euleriano) na simulação de leito de jorro

cilíndrico, e chegaram à conclusão de que o modelo Euleriano-Lagrangeana representou melhor o comportamento do leito de jorro, porém, devido aos custos computacionais, o modelo Euleriano-Euleriano se adequa melhor a sistemas de alta complexidade e/ou com um alto número de partículas.

### 3.2.2.1 O modelo Euleriano Granular Multifásico aplicado ao leito de jorro

Norton e Sun (2006), Lan *et al.* (2012), Liu *et al.* (2013, 2017) utilizaram em seus trabalhos o modelo euleriano multifásico na simulação de processos utilizando leito de jorro. Essa escolha foi feita devido a possibilidade de considerar o processo no leito de jorro contendo duas fases (sólido-gás) contínuas e que interagem entre si. Além disso, esse modelo minimiza o custo computacional como demonstrado por (Moliner *et al.*, 2019).

Barcelos (2016) em seu trabalho, define para a análise do leito de jorro as seguintes hipóteses simplificadoras: regime transiente, partículas no formato esférico, escoamento multifásico com as fases contínuas (gás-sólido), o escoamento é bidimensional, sem transferência de massa entre as fases, sem reação química e as forças externas, de ascensão e de massa virtual podem ser desprezadas.

Lan *et al.* (2012) em seu trabalho apresenta as seguintes equações que governam os processos no leito de jorro:

#### **Equação da continuidade para as fases gasosa e sólida.**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (3.9)$$

Em que as letras subscritas s e g representam respectivamente a fase sólida e a fase gasosa,  $\alpha$  é a fração de volume de gás,  $\rho$  é a densidade do gás, e  $v$  representa a velocidade do gás.

#### **Equação de momento para as fases gasosa e sólida.**

Ele apresenta duas equações de momento, sendo a equação 3.10 referente a fase gasosa e a equação 3.11 referente a fase sólida.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s v_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s v_s) = -\alpha_g \nabla P + \nabla \underline{\tau}_g + \beta(v_s - v_g) + \alpha_g \rho_g g \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s v_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s v_s v_s) = -\alpha_s \nabla P + \nabla \underline{\tau}_s + \beta(v_g - v_s) + \alpha_s \rho_s g \quad (3.11)$$

Nelas as letras subscritas s e g representam respectivamente a fase sólida e a fase gasosa,  $\tau$  é o tensor de tensão,  $\beta$  é o coeficiente de interação particular-fluido, e  $g$  é a aceleração da

gravidade.

Nas equações a seguir, são calculados os tensores de tensão para o gás (equação 3.12) e para o sólido (equação 3.13).

$$\tau_g = \alpha_g \mu_g \{ [\nabla v_g + (\nabla v_g)]^T - \frac{2}{3} \nabla v_g^I \} \quad (3.12)$$

$$\tau_s = \alpha_s \mu_s \{ [\nabla v_s + (\nabla v_s)]^T + \left( \alpha_s \lambda_s - \frac{2}{3} \alpha_s \mu_s \right) \nabla v_s^I \} \quad (3.13)$$

Nelas novamente as letras subscritas s e g representam respectivamente a fase sólida e a fase gasosa,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica,  $\lambda$  é a viscosidade *bulk*, que é calculada utilizando a equação 3.19, e o I representa o tensor unitário.

### Equações constitutivas.

#### Pressão dos sólidos:

$$P_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (3.14)$$

Na equação 3.14 o termo  $g_{0,ss}$  representa a função da distribuição radial e o termo  $e_{ss}$  representa o coeficiente de restituição partícula-partícula.

#### Viscosidade de cisalhamento de sólidos:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (3.15)$$

Na equação 3.15 os termos  $\mu_{s,col}$ ,  $\mu_{s,kin}$ ,  $\mu_{s,fr}$  são respectivamente a viscosidade colisional (equação 3.16), cinética (equação 3.17) e a viscosidade friccional (equação 3.18). Nelas além das variáveis já definidas, a  $d_s$  representa o diâmetro das partículas,  $\pi$  é o número adimensional Pi,  $\phi$  é o ângulo de fricção interna da partícula, e o termo  $I_{2D}$  representa o segundo invariante do tensor de tensão desviatório.

#### Viscosidade colisional:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s^2 \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.16)$$

#### Viscosidade cinética:

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s}}{96(1+e_{ss})g_{0,ss}} \left[ 1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1 + e_{ss}) \right] \quad (3.17)$$

#### Viscosidade friccional:

$$\mu_{s,fr} = \frac{P_s \sin \phi}{2 \sqrt{I_{2D}}} \quad (3.18)$$

**Viscosidade bulk:**

$$\lambda_s = \frac{3}{4} \alpha_s \rho_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.19)$$

**Coefficiente de difusão de energia granular:**

$$\Gamma_{\theta_s} = \frac{150 \rho_s d_s \sqrt{\pi \theta_s}}{384 (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[ 1 + \frac{6}{5} \alpha_s g_{0,ss} \alpha_s (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2 \alpha_s^2 \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.20)$$

**Dissipação de energia de colisão:**

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12 (1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s \theta_s^{\frac{3}{2}} \quad (3.21)$$

**Função de distribuição radial:**

$$g_{0,ss} = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (3.22)$$

Na equação 3.22, o termo  $\alpha_{s,max}$  representa o limite máximo de empacotamento dos sólidos.

**Viscosidade do gás:**

$$\mu_g = \mu_{l,g} + \mu_{t,g} \quad (3.23)$$

Nela o termo  $\mu_{l,g}$  representa a viscosidade molecular do gás, e o termo  $\mu_{t,g}$  representa a viscosidade turbulenta e utiliza-se a equação 3.24 para ser calculada. Nela o termo  $C_\mu$  é o coeficiente do modelo de turbulência, o  $k_g$  representa o nível de turbulência na fase gasosa, e  $\varepsilon_g$  é a dissipação da turbulência na fase gasosa.

$$\mu_{t,g} = C_\mu \alpha_g \rho_g \frac{k_g^2}{\varepsilon_g} \quad (3.24)$$

**Equação da energia cinética turbulenta:**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g k_g) + \nabla (\alpha_g \rho_g v_g k_g) = \nabla \left( \alpha_g \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_k} k_g \right) + \alpha_g G_{k,g} - \alpha_g \rho_g \varepsilon_g + \alpha_g \rho_g \Pi_{k,g} \quad (3.25)$$

Na equação da energia cinética turbulenta (equação 3.25), o termo  $G_{k,g}$  representa a produção de energia cinética de turbulência, e  $\Pi_{k,g}$  representa a influência da fase dispersa na fase contínua.

### Dissipação de energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \varepsilon_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g v_g \varepsilon_g) = \nabla\left(\alpha_g \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_g\right) + \alpha_g \frac{\varepsilon_g}{k_g} (C_{1\varepsilon} G_{k,g} - C_{2\varepsilon} \rho_g \varepsilon_g) + \alpha_g \rho_g \Pi_{\varepsilon,g} \quad (3.26)$$

Na equação 3.26, certas variáveis apresentam os seguintes valores:  $C_\mu = 0,09$ ;  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ;  $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$

$$G_{k,g} = \mu_{t,g} \left( \nabla v_g + (\nabla v_g)^T \right) : \nabla v_g \quad (3.27)$$

### Coefficiente de arrasto gás-sólido:

Para o cálculo do coeficiente de arrasto (equação 3.30), é possível calcular o termo  $\beta$  de duas formas diferentes. A primeira forma considera que a fração de volume do gás  $\alpha_g$  seja menor que 0,8 e, assim, utiliza-se a equação 3.28. Agora caso a  $\alpha_g$  seja maior ou igual a 0,8, então utiliza-se a equação 3.29.

$$\beta = 150 \frac{\alpha_g^2 \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1,75 \frac{\alpha_s \rho_g |v_g - v_s|}{d_s}, \alpha_g < 0,8 \quad (3.28)$$

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |v_g - v_s|}{d_s} \alpha_g^{-2,65}, \alpha_g \geq 0,8 \quad (3.29)$$

$$C_D = \left\{ \frac{24}{\alpha_g R_s} \left( 1 + 0,15 (\alpha_g R_s)^{0,687} \right) \rightarrow (Re_s < 1000) 0,44 \rightarrow (Re_s \geq 1000) \right. \quad (3.30)$$

Na equação 3.30 o termo  $Re$  refere-se ao número de Reynolds, que obtido a partir da equação 3.31.

$$R_s = \frac{\rho_g d_s |v_g - v_s|}{\mu_g} \quad (3.31)$$

## 3.2.3 Análise Numérica

Para a resolução dessas equações é necessário transformá-las em sua forma discreta, para isso existem diversos métodos de discretização, alguns dos principais são: diferenças finitas, volumes finitos, elementos finitos, método híbrido (volumes finitos/elementos finitos) e métodos espectrais. O método dos volumes finitos é o mais comumente utilizado, pois garante bons resultados mesmo utilizando malhas grosseiras ou não estruturadas, e além disso, é o principal método aplicado pela maioria dos *softwares* de CFD (Barcelos, 2016; Duarte, 2006).

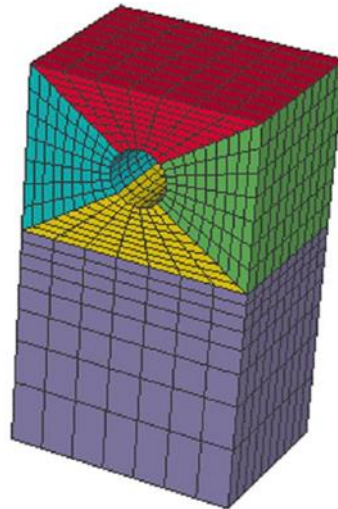
### 3.2.3.1 Tipos de malhas

A geração de malha é crucial na análise de CFD e consome tempo significativo. A

qualidade da malha afeta diretamente a qualidade da análise, independentemente do resolvidor de fluxo usado. Conhecer os métodos de geração de malha é fundamental para selecionar a ferramenta adequada. Os métodos disponíveis atualmente são: malhas estruturadas, malhas não estruturadas e malhas mistas (Barcelos, 2016; Duarte, 2006).

Os métodos de malha estruturada (Figura 3.11) utilizam elementos quadriláteros em 2D e hexaédricos em 3D organizados em blocos regulares, oferecendo controle e flexibilidade ao usuário para ajustar a densidade da malha. Embora a geração de malhas estruturadas demande tempo e habilidades, especialmente em geometrias complexas, elas apresentam vantagens como a capacidade de ajustar a malha de acordo com os gradientes de fluxo e a utilização eficiente de memória e velocidade de cálculo. O desenvolvimento dos sistemas multiblocos estruturados permite a conexão de vários blocos, aumentando a liberdade na construção da malha, mas também introduz desafios de conectividade que podem afetar a precisão da solução e a eficiência do resolvidor (Barcelos, 2016; Duarte, 2006).

Figura 3.11 – Malha multibloco estruturada usando conexão ponto a ponto.

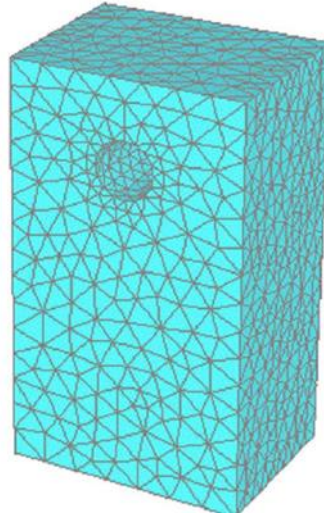


Fonte: Duarte (2006).

Métodos de malha não-estruturada (Figura 3.12) utilizam uma coleção arbitrária de elementos, como triângulos em 2D e tetraedros em 3D, para preencher o domínio. Essas malhas oferecem maior automatização e exigem menos esforço e tempo do usuário para sua construção, pois não requerem preocupação com a disposição de blocos ou conexões. No entanto, a falta de controle do usuário sobre a disposição da malha é uma desvantagem, pois os elementos triangulares e tetraédricos não se adaptam facilmente a deformações do corpo, resultando em malhas isotrópicas com elementos de tamanho e formato semelhantes. Além disso, códigos que utilizam malhas não-estruturadas requerem mais memória e têm execução mais lenta em

comparação com códigos que utilizam malhas estruturadas (Barcelos, 2016; Duarte, 2006).

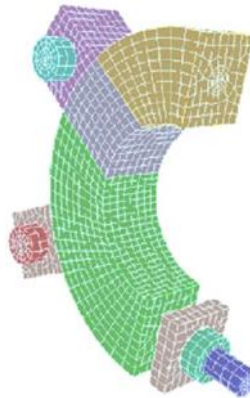
Figura 3.12 – Malha não-estruturada composta de elementos triangulares e tetraédricos.



Fonte: Duarte (2006).

Métodos de malha híbrida (Figura 3.13) combinam elementos de malhas estruturadas e não-estruturadas, aproveitando as propriedades positivas de cada abordagem. Eles permitem o controle da forma e distribuição da malha localmente, resultando em malhas de alta qualidade e resultados satisfatórios. No entanto, a geração de malhas híbridas requer prática e experiência, especialmente em corpos com geometrias complexas, e pode apresentar problemas de conexão devido à natureza complicada das porções estruturadas da malha. Além disso, os métodos de malha híbrida geralmente são menos robustos do que os métodos de malha não-estruturada (Barcelos, 2016; Duarte, 2006).

Figura 3.13 – Malha híbrida.

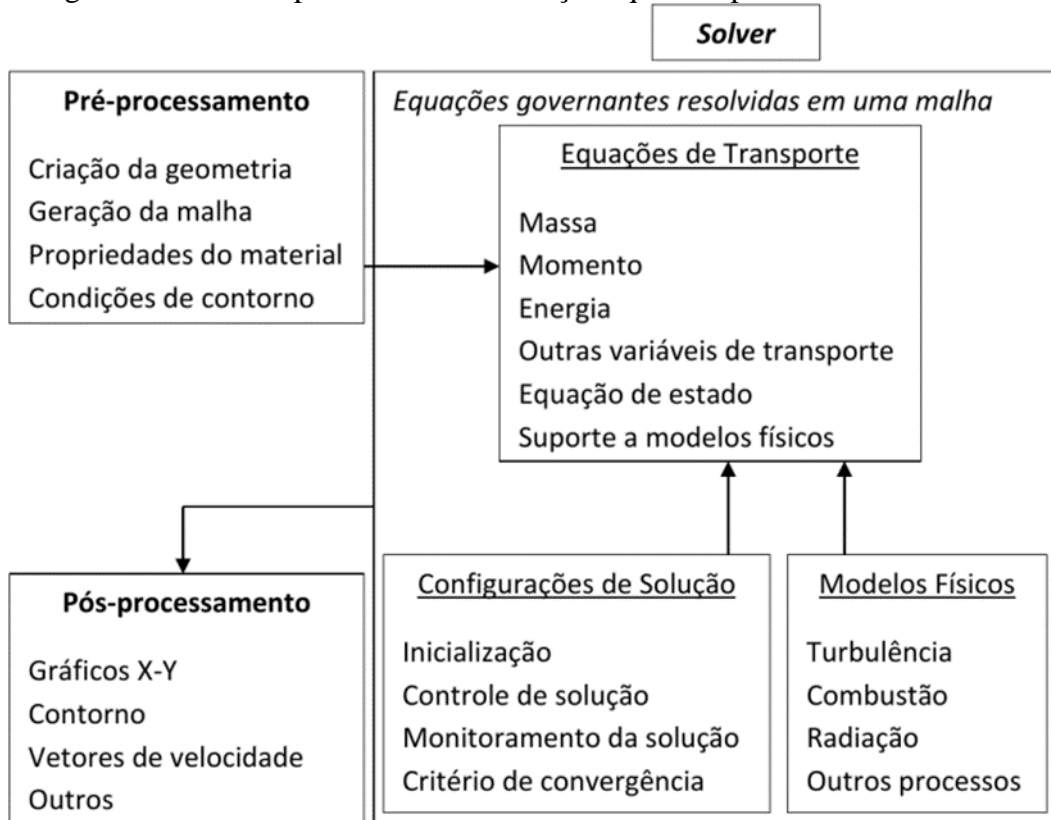


Fonte: Duarte (2006).

### 3.2.3.2 Etapas de processamento

Segundo Barcelos (2016), para a execução da técnica de CFD é necessário a realização de três etapas principais, o pré-processamento, o solver, e o pós-processamento. Na Figura 3.14 é apresentado o esquema das três etapas para a realização do CFD.

Figura 3.14 – Principais elementos e funções que compõem a técnica CFD.



Fonte: Barcelos (2016).

O pré-processamento é a primeira etapa a ser realizada, nela são definidos fenômenos físicos e químicos que irão ser simulados. Também é definido o domínio da simulação, ou seja, a geometria, a confecção das malhas e a definição das condições de contorno. No solver é onde ocorre a resolução das equações de conservação, para isso as equações diferenciais são transformadas em equações algébricas para a solução delas por meio de métodos iterativos. No pós-processamento são analisados os resultados obtidos a partir da etapa anterior, a partir de diversas visualizações do processo simulado (campos escalares e vetoriais).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção serão apresentados todos os materiais, equipamentos e a metodologia que foram empregados para a realização dos ensaios experimentais e das simulações computacionais.

### 4.1 Material particulado

Para o estudo experimental foi selecionado um material particulado de tamanho relativamente uniforme, com uma esfericidade não muito baixa e que mantivesse suas propriedades constantes durante a execução dos experimentos. Um material sólido com essas características teria uma representação mais adequada na etapa de simulação CFD com os métodos selecionados neste estudo. Também era desejado que este material tivesse uma baixa densidade ou um pequeno tamanho, quando comparado a outras sementes semelhantes, propriedades essas que favorecem a elutrição no escoamento em leito de jorro. Sabe-se que um material com tais características conduz a uma condição de jorro instável, e, portanto, permitiria uma melhor avaliação da contribuição do defletor na estabilização do escoamento.

Desta forma, foram selecionadas sementes de mamão sem exotesta secas como material particulado (Figura 4.1) As características do escoamento deste sólido já eram bem conhecidas pelo grupo de pesquisa envolvido neste estudo.

Figura 4.1 – Sementes de mamão sem exotesta e secas.



Fonte: Do autor (2024).

As sementes foram caracterizadas quanto às suas propriedades físicas e quanto às propriedades do meio poroso formado por elas, sendo determinadas as seguintes propriedades: diâmetro médio, esfericidade, densidade aparente, densidade *bulk*, porosidade *bulk*, umidade e ângulo de repouso. Todas as análises foram realizadas em triplicata, sendo obtidos os resultados médios e desvio padrão.

## 4.2 Caracterização das partículas

### 4.2.1 Densidade aparente

A densidade aparente das sementes foi obtida pela técnica de picnometria líquida utilizando água destilada. Utilizou-se picnômetros de 25 mL, água destilada à temperatura de 24°C (0,997 g/cm<sup>3</sup>) e uma balança analítica modelo AD2000 com precisão de 0,001 g.

### 4.2.2 Umidade

A umidade em base úmida (B.U.) das sementes foi determinada pela técnica gravimétrica de secagem em estufa a 105°C por 24 h, conforme a equação 4.1. Para isso, as amostras foram pesadas em placa Petri previamente seca e anotou-se a massa da amostra antes e após a secagem na estufa.

$$\%umidade = \frac{N}{P} * 100 \quad (4.1)$$

Em que N representa a massa de água retirada, e P representa o peso inicial do material antes da secagem.

Para obter a umidade em base seca (B.S.), ou seja, a quantidade de água presente no material em relação a sua massa seca, utiliza-se a equação 4.2, em que o termo M<sub>ss</sub> representa o peso do material após a secagem.

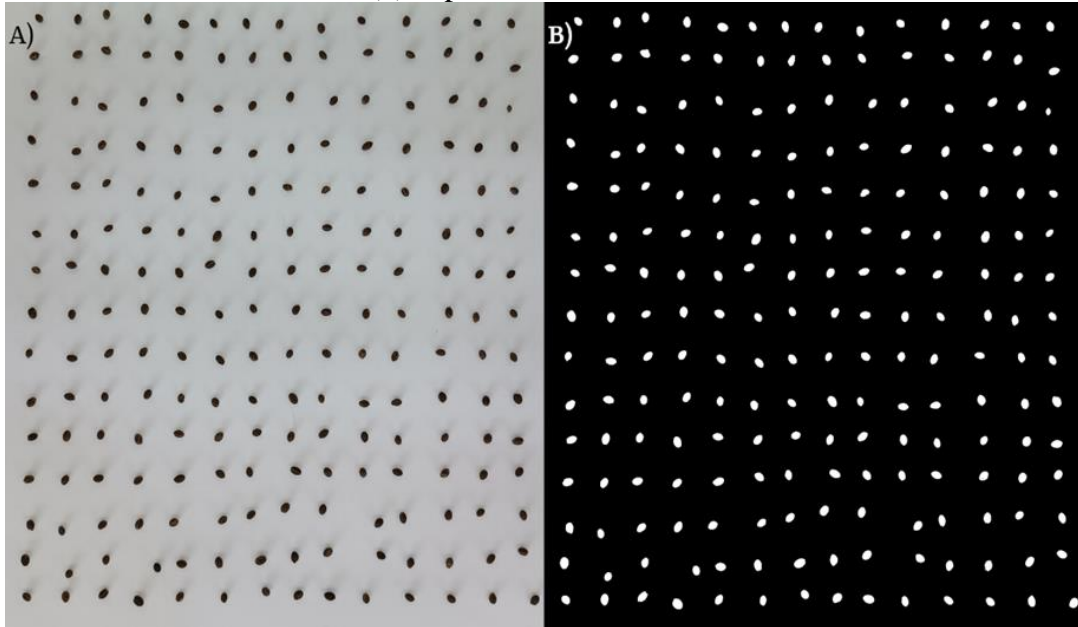
$$\%umidade = \frac{N}{M_{ss}} * 100 \quad (4.2)$$

### 4.2.3 Diâmetro médio

O diâmetro médio das sementes (diâmetro da esfera com mesma área de projeção da partícula) foi obtido a partir de análise de imagens pelo *software* FIJI versão 2.15. Para isso foram recolhidas amostras de 200 sementes que foram dispostas organizadamente em uma folha

branca (Figura 4.2.A). Após isso, as sementes foram fotografadas e em seguida, tiveram suas imagens tratadas e analisadas utilizando o *software* de análise de imagens FIJI (Figura 4.2.B).

Figura 4.2 – Imagem utilizada para análise no programa FIJI e cálculo do diâmetro médio (a) antes de ser tratada, (b) depois de tratada.



Fonte: Do autor (2024).

Utilizando a equação 4.3 para cada uma das áreas calculadas pelo *software*, foi possível obter o diâmetro de cada semente. Em seguida, calculou-se a média dos diâmetros para cada repetição, e com as três médias dos diâmetros foi obtido o diâmetro médio das sementes.

$$D = \left( \frac{4 \cdot \text{área}}{\pi} \right)^{\left( \frac{1}{2} \right)} \quad (4.3)$$

Em que D representa o diâmetro obtido para cada partícula, área é o valor obtido pelo FIJI da área de cada semente e  $\pi$  representa o número Pi.

#### 4.2.4 Esfericidade média

A esfericidade média das partículas ( $\emptyset$ ) também foi obtida pelo *software* de análise de imagem FIJI. Para o seu cálculo foram seguidos os mesmos processos descritos para a obtenção do diâmetro médio, porém com a diferença que o *software* neste caso utiliza a equação 4.4 para calcular a esfericidade de cada semente.

$$\emptyset = 4\pi \left( \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \right) \quad (4.4)$$

### 4.3 Caracterização do leito de partículas (*bulk*)

O leito de partículas (*bulk*) foi analisado em relação a sua densidade, porosidade e ângulo de repouso dinâmico e estático.

#### 4.3.1 Densidade *bulk*

A densidade do leito, também conhecida como densidade *bulk* ( $\rho_{bulk}$ ), foi obtida a partir da técnica de deposição em proveta. A técnica consiste na deposição de uma massa conhecida de sementes a partir de uma altura fixa, dentro de uma proveta até preencher o seu volume. Utilizou-se uma proveta de 50 mL e a densidade *bulk* das sementes foi determinada pela Equação 4.5.

$$\rho_{leito} = \rho_{bulk} = \frac{m_{sem}}{V} \quad (4.5)$$

Em que  $m_{sem}$  é a massa das sementes, e  $V$  é o volume total ocupado pelo leito de sementes.

#### 4.3.2 Porosidade *bulk*

A porosidade *bulk* ( $\varepsilon$ ) foi obtida a partir da relação entre o volume dos interstícios e o volume total ocupado pelo leito de sementes. Para isso foi utilizada a Equação 4.6.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{sem}}{V} = \frac{V_{vazio}}{V} \quad (4.6)$$

Onde:  $V_{vazio}$  é o volume dos interstícios ou espaços vazios,  $V_{sem}$  é o volume ocupado pelas sementes, e o  $V$  é o volume total (volume dos interstícios mais o volume das sementes).

A porosidade *bulk* foi calculada utilizando-se uma proveta de 100 mL e adicionando água até completar o volume. Após isso, o sistema proveta+água foi pesado, e utilizando a densidade da água, calculou-se o volume ocupado por ela. Esse procedimento foi repetido utilizando as sementes. Com a densidade das sementes foi possível calcular o volume ocupado por elas. Com a razão entre os volumes obteve-se a porosidade *bulk*.

### 4.3.3 Ângulo de repouso das partículas

#### 4.3.3.1 Ângulo de repouso estático

Para a obtenção do ângulo de repouso estático, foi utilizado um funil com o diâmetro da base menor de 3 cm, base maior com um diâmetro de 15 cm, e posicionado a uma altura de 19 cm da bancada (Figura 4.3). As sementes foram despejadas e acumularam-se formando um ângulo com a base horizontal. A vista frontal da pilha de partículas foi obtida e o ângulo formado calculado através do *software* FIJI.

Figura 4.3 – Imagem utilizada para o cálculo do ângulo de repouso estático das sementes de mamão secas.



Fonte: Do autor (2024).

O ângulo de repouso estático pode ser utilizado para previsão do comportamento das partículas durante a fluidização, e assim classificá-las segundo a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores para o ângulo de repouso estático e o escoamento de partículas esperado.

| Ângulo de repouso (°) | Escoabilidade     |
|-----------------------|-------------------|
| > 60                  | Sem fluidez       |
| 45-60                 | Fluidez regular   |
| 30-45                 | Boa fluidez       |
| 10-30                 | Excelente fluidez |
| <10                   | Aerado            |

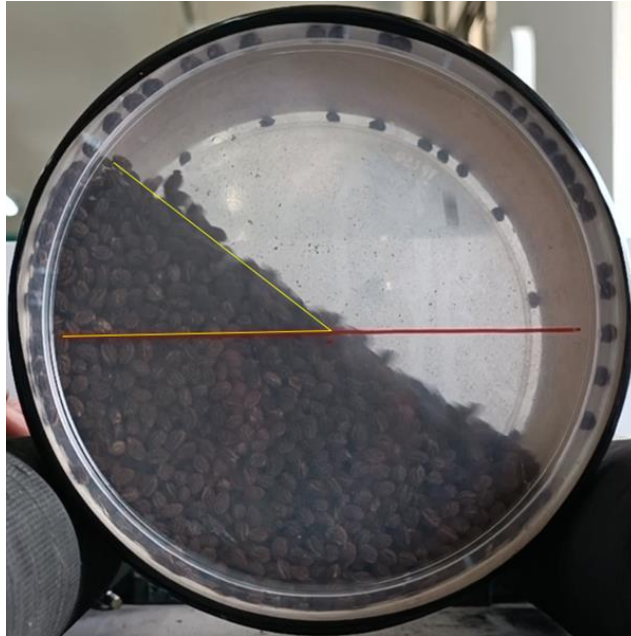
Fonte: Adaptada de Nascimento (2014).

#### 4.3.3.2 Ângulo de repouso dinâmico

Para a obtenção do ângulo de repouso dinâmico, foi utilizado um tambor dotado de uma lateral transparente e com uma marcação no centro (Figura 4.4). O tambor foi preenchido até a metade de seu volume com as sementes e colocado sobre 2 rolos de movimentação. Com o tambor girando, foram capturadas imagens de vídeo por 5 min, e após o término, 5 frames da gravação foram aleatoriamente selecionados e analisados para medição do ângulo formado

pelas sementes em relação à linha de referência central.

Figura 4.4 – Imagem utilizada para análise do ângulo de repouso dinâmico das sementes de mamão secas.



Fonte: Do autor (2024).

Outra forma de obter uma previsão sobre o comportamento fluidodinâmico das partículas é utilizando o Diagrama de Geldart, no qual as partículas são classificadas em grupos de acordo com a diferença entre a densidade da partícula e do fluido, e o diâmetro da partícula.

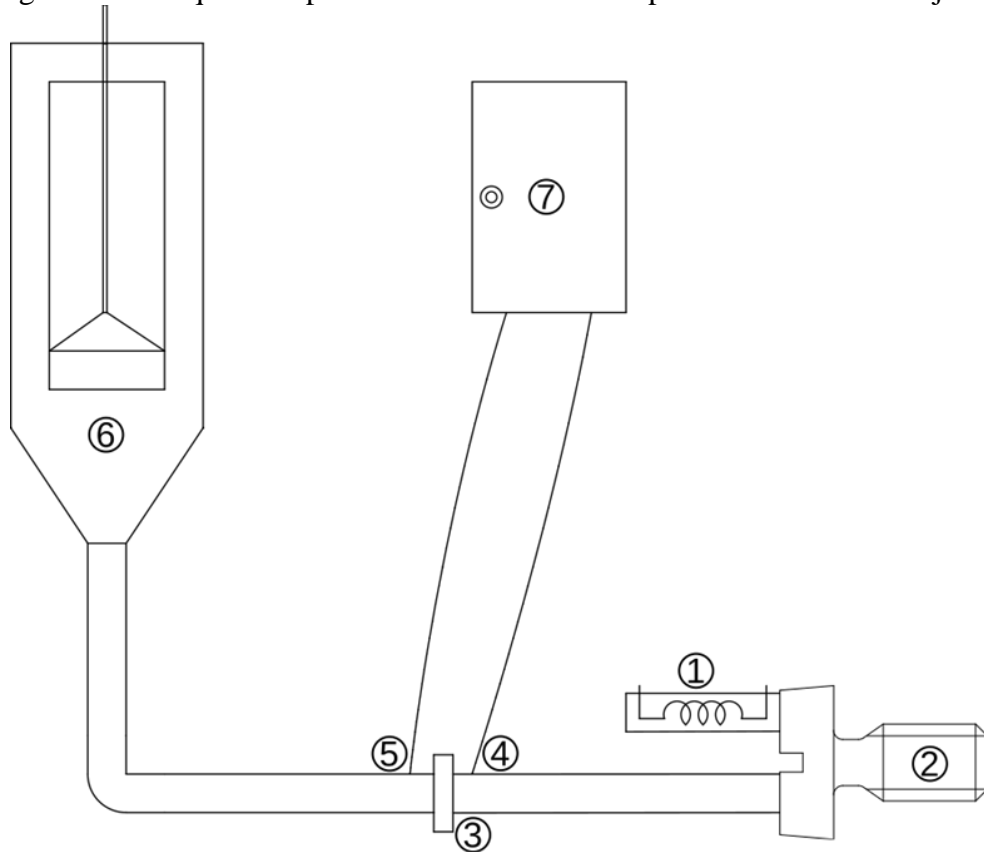
#### 4.4 Unidade experimental

Para a realização dos experimentos foi utilizada uma unidade de leito de jorro presente no Laboratório de Processos de Separação Mecânica (LPSM) localizado no prédio das Engenharias ABI da Universidade Federal de Lavras.

A unidade experimental (Figura 4.5) é construída em aço inoxidável, dotada de um sistema de aquecimento composto por uma resistência (1), um soprador de potência de 7,5 CV (2), válvula do tipo gaveta para o controle da vazão de ar, placa de orifício (3) dotada de sensores de pressão para a aferição da velocidade do ar de secagem (4, 5). O leito (6) tem uma parte em formato cilíndrico com diâmetro de 25,6 cm e altura de 50,8 cm, dotado de um visor transparente de acrílico que permite a visualização interna do equipamento. A base do leito é formada por um tronco de cone com o diâmetro maior igual ao do cilindro, e o diâmetro menor de 5 cm, altura de 17,6 cm e um ângulo de abertura de  $60^\circ$ . Para a operação do sistema a unidade

contém um inversor de frequência (7) que é controlado por um computador utilizando *software* específico, que também permite a aquisição de dados.

Figura 4.5 – Esquema representativo da unidade experimental de leito de jorro.



Fonte: Do autor (2024).

O defletor de fonte (Figura 4.6) foi projetado baseando-se na geometria do confinador de fonte utilizado por Altzibar *et al.* (2017) e nos defletores apresentados em Mathur e Epstein (1974). O dispositivo é composto por um corpo de formato cônico (Figura 4.6 B-C) com diâmetro de 18 cm e altura de 7 cm, e construído em aço inoxidável. O dispositivo é acoplado a uma haste de fixação (Figura 4.6 A), que permite o ajuste de sua altura/posição dentro do leito.

Figura 4.6 – Defletor de fonte.



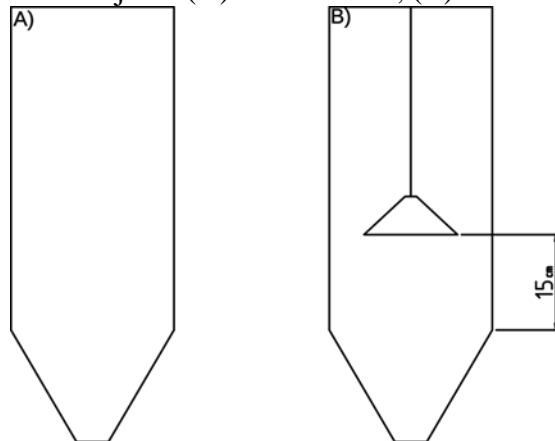
Fonte: Do autor (2024).

## 4.5 Metodologia experimental

### 4.5.1 Caracterização fluidodinâmica do equipamento

A caracterização fluidodinâmica do leito foi realizada a partir do levantamento da curva característica para o leito com o defletor de fonte posicionado a 15 cm de altura em relação a base cônica do leito e para a condição sem defletor (Figura 4.7), e os resultados foram comparados.

Figura 4.7 – Esquema do leito de jorro (A) sem defletor, (B) com o defletor na altura de 15 cm.



Fonte: Do autor (2024).

Para o levantamento da curva fluidodinâmica adicionou-se uma carga de 400 g de sementes de mamão secas, o que corresponde a uma altura do leito de partículas de 14,1 cm, sendo em seguida injetado ar pelo orifício de entrada do leito. A vazão de ar foi variada de forma crescente, sendo medida com o auxílio da placa de orifício, e o valor correspondente da queda de pressão do leito era registrado. Durante esse processo, os valores de queda de pressão e de velocidade do ar foram obtidos por meio de um *software* de aquisição de dados. Quando

atingida a capacidade máxima do soprador, iniciou-se o procedimento inverso, ou seja, a velocidade do ar foi diminuída gradualmente e mediu-se a queda de pressão do leito. À medida que o processo foi realizado, alterações observadas visualmente no comportamento do leito de jorro foram anotadas.

#### 4.6 Metodologia numérica

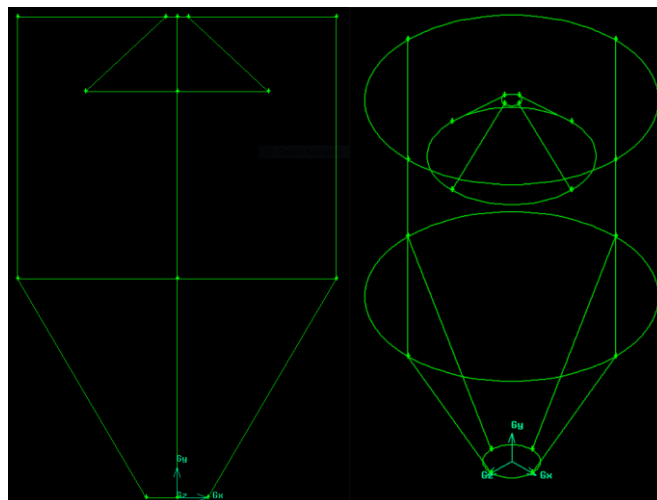
As simulações numéricas foram realizadas com o objetivo de auxiliar nos estudos do comportamento fluidodinâmico do leito de jorro com o defletor. Para isso foi utilizado o *software* ANSYS Fluent® 21.0 versão acadêmica. Para a simulação dos casos escolhidos foi adotado o procedimento descrito a seguir.

##### 4.6.1 Geometria

Utilizando o *software* Gambit versão 2.4.2, foi criada a geometria tridimensional do leito de jorro e do defletor de fonte posicionado a 15 cm na parte cilíndrica do leito.

Optou-se por confeccionar o leito sem o defletor, com uma altura coincidente com o topo do defletor de fonte, dessa forma totalizando 21 cm de altura para a parte cilíndrica (Figura 4.8). As demais medidas foram fiéis às medidas originais do equipamento sendo elas a base cônica de 17,6 cm de altura, a base menor e maior medindo 5 e 25,6 cm de diâmetro, respectivamente, e o diâmetro do corpo de 25,6 cm. O defletor de fonte foi confeccionado com a altura de 7 cm e diâmetro da sua base de 18 cm.

Figura 4.8 – Geometria do leito de jorro reduzido com o defletor em 15 cm de altura.

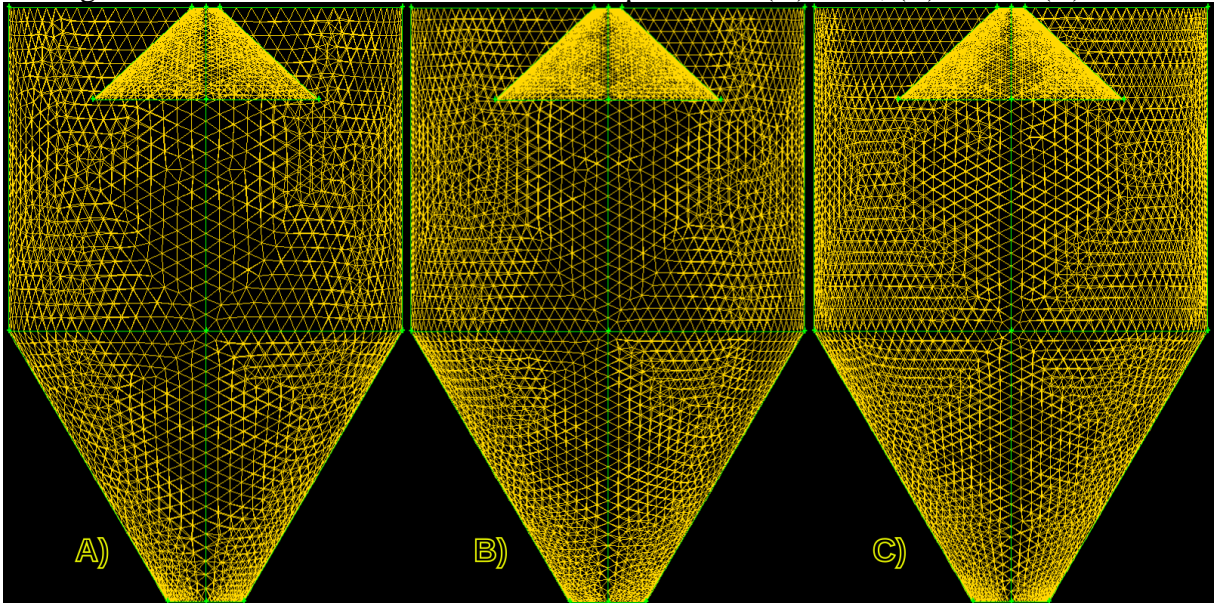


Fonte: Do autor (2024).

#### 4.6.2 Malhas

Para a criação da malha também foi utilizado o *software* Gambit. Foram confeccionadas três malhas (217.610, 334.573, 408.312 elementos) para posteriormente serem utilizados no teste de independência (Figura 4.9).

Figura 4.9 – Malhas utilizadas no teste de dependência (A) 217k, (B) 334k e (C) 408k.



Fonte: Do autor (2024).

Utilizou-se elementos tetraédricos na geração das malhas e então os parâmetros de qualidade da malha (métricas) foram avaliados. Os fatores que afetam a qualidade da malha são a conectividade, a forma e a disposição dos elementos em comparação aos seus vizinhos, a quantidade de elementos e suas transições dentro da malha. Esses parâmetros são chamados de métricas, e os mais comuns de serem analisados são razão de aspecto (*aspect ratio*), assimetria ou distorção (*skewness*) e a ortogonalidade (*orthogonal quality*). Os parâmetros de *aspect ratio*, *skewness* e *orthogonal quality* foram obtidos utilizando os *softwares* Gambit e ANSYS Fluent®.

O *aspect ratio* indica o nível de deformação a partir da razão entre as arestas dos elementos da malha, dessa forma o valor que indicaria a melhor qualidade nesse parâmetro seria um, o que indicaria a maior proporcionalidade dos elementos.

O parâmetro *skewness* é relacionado a simetria dos elementos da malha, ele pode variar de zero que indica o maior nível de simetria até um que seria o pior nível de simetria, sendo este caracterizando que os elementos da malha são coplanares, ou seja, indicando elementos 2D e assim, reduzindo a qualidade dos resultados a serem obtidos na simulação, Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Relação entre *skewness* e qualidade da célula.

| <i>Skewness</i> | Qualidade da célula |
|-----------------|---------------------|
| 1               | Degenerada          |
| 0,90 - < 1      | Ruim                |
| 0,75 - 0,90     | Pobre               |
| 0,50 - 0,75     | Razoável            |
| 0,25 - 0,50     | Boa                 |
| > 0 - 0,25      | Excelente           |
| 0               | Equilateral         |

Fonte: Adaptado de Ansys (2010).

O parâmetro *orthogonal quality* está associado a relação entre os vetores normais e as faces dos elementos, dessa forma ele associa o quão próximo da angulação ideal os elementos se encontram, sendo esta angulação ideal de 90° para componentes hexaédricos, e de 60° para componentes tetraédricos. Esse parâmetro também varia de zero a um, sendo que o zero indica a pior ortogonalidade e um a melhor.

#### 4.6.2.1 Independência das malhas

O teste de independência das malhas tem como objetivo identificar a malha com menor número de elementos, que não afete a qualidade dos resultados obtidos. Sabe-se que quanto maior for o número de elementos presentes na malha, maior será o seu nível de refinamento, porém o esforço computacional necessário também será maior. Foram avaliados três diferentes números de células (217k, 334k, 408k) para a malha da geometria com o defletor e realizada a simulação sob as mesmas condições. Dessa forma os resultados obtidos foram comparados para a escolha da malha de menor refinamento, mas que forneça resultados semelhantes às mais refinadas, e ao mesmo tempo, leve ao menor esforço computacional possível.

O grau de refinamento da malha escolhida foi mantido para a geração das demais malhas correspondentes às geometrias sem defletor.

#### 4.6.3 Definições físicas e cálculos

Todas as características físicas do problema como parede, interior, entrada e saída, barreiras internas como o defletor, e as fases compostas em seu interior, fluido (ar) e sólido

(sementes), foram previamente definidas. Além das definições físicas, para a realização dos cálculos, foram definidas a interação fluido-partícula, a discretização espacial, os parâmetros de relaxação, o modelo de turbulência, o critério de convergência, o número de iterações e o tempo de simulação, sendo todos esses parâmetros apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Condições de contorno e parâmetros utilizados nas simulações.

|                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Modelo</b>                                 | Euleriano Multifásico: Implícito                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Interação fluido-partícula</b>             | Gidaspow                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Partícula Granular</b>                     | Viscosidade granular: Syamlal-Obrien<br>Viscosidade <i>bulk</i> granular: Lun <i>et al.</i><br>Viscosidade friccional: Não habilitada<br>Temperatura granular: algébrica<br>Pressão de sólidos: Lun <i>et al.</i><br>Distribuição radial: Lun <i>et al.</i><br>Módulo de elasticidade: Derivado<br>Limite de empacotamento: 0,402 |
| <b>Condição de entrada</b>                    | Velocity Intel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Referência de pressão</b>                  | Saída do leito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Modelo de turbulência</b>                  | K-epsilon padrão                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Acoplamento pressão-velocidade</b>         | SIMPLE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Discretização espacial</b>                 | Gradiente: Least Squares Cell Based<br>Pressão: PRESTO<br>Momento: <i>First Order Upwind</i><br>Fração de volume: <i>First Order Upwind</i>                                                                                                                                                                                       |
| <b>Parâmetros de relaxação</b>                | Pressão: 0,3<br>Densidade: 1<br>Forças de corpo: 1<br>Momento: 0,1<br>Fração de volume: 0,5<br>Temperatura granular: 0,2<br>Energia cinética turbulenta: 0,8<br>taxa de dissipação específica: 0,8<br>viscosidade turbulenta: 1                                                                                                   |
| <b>Critérios de convergência dos resíduos</b> | $1 \times 10^{-3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Time step (Regime Transiente)</b>          | $1 \times 10^{-4}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Tempo de simulação</b>                     | até 4 s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

Fonte: Do autor (2024).

Cabe ressaltar que a partícula selecionada para os estudos experimentais e/ou numéricos apresenta características uniformes, não variáveis com o tempo, e que mantêm sua estrutura (não sofre desintegração) na faixa de operação utilizada para os escoamentos analisados. Ademais, tal partícula é pequena e leve, apresentando assim características favoráveis à sua

elutriação e obtenção de regimes instáveis no escoamento em leito de jorro. O que pode mostrar a importância do defletor.

#### **4.7 Infraestrutura computacional**

Para a realização das simulações foram utilizados os seguintes computadores: notebook com processador quadcore Intel® Core i7-7500U 2.70GHz com 8 GB de memória ram e SSD de 1 TB, um computador INTEL® Core i7-8700 3.2GHz 16GB de memória ram e SSD 240GB PRO Certo PC, e 20 computadores do tipo workstation da marca Dell com processador 6 processadores Intel® Xeon® w-1350 4.5GHz com 32 GB de memória ram e SSD de 512 GB localizados no laboratório de informática da UEMG unidade Passos, Bloco 1.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização das sementes e do leito de partículas

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores médios das propriedades medidas para caracterizar as sementes de mamão secas e o leito de partículas.

Tabela 5.1 – Resultados da caracterização física das sementes de mamão secas e do leito de partículas.

| Parâmetros                     | Valores      |
|--------------------------------|--------------|
| Densidade aparente (g/mL)      | 0,61 ± 0,03  |
| Umidade (B.U.) (%)             | 6,48 ± 0,12  |
| Diâmetro médio (mm)            | 4,50 ± 0,03  |
| Esfericidade média (%)         | 84,50 ± 4,7  |
| Densidade <i>bulk</i> (g/mL)   | 0,16 ± 0,01  |
| Porosidade <i>bulk</i> (%)     | 73,00 ± 0,01 |
| Ângulo de repouso estático (°) | 34,42 ± 3,33 |
| Ângulo de repouso dinâmico (°) | 38,53 ± 2,41 |

Fonte: Do autor (2024).

As sementes de mamão secas apresentaram densidade aparente de 0,61 ( $\pm 0,03$ ) g/mL assemelhando-se ao valor obtido por Santos, Rodriguez e Bicalho (2023), 0,56 ( $\pm 0,01$ ) g/mL. O teor de umidade (em base úmida) presente nas sementes foi de 6,48%, valor que se encontra na faixa de valor de umidade da semente de mamão seca avaliada por Chielle *et al.* (2016), que variou entre 5 e 9%.

O valor de diâmetro médio de 4,50 ( $\pm 0,03$ ) mm obtido neste trabalho apresentou-se relativamente alto quando comparado com o valor medido por Santos, Rodriguez e Bicalho (2023) que obtiveram para o diâmetro médio da semente de mamão seca um valor de 3,055 ( $\pm 0,03$ ) mm. Já o valor obtido para a esfericidade média foi de 84,50 ( $\pm 4,7$ ) %, em comparação com o valor de 77,867 ( $\pm 4,88$ ) % medidos por Santos, Rodriguez e Bicalho (2023). O diâmetro médio da semente de mamão seca encontrada por Chielle *et al.* (2016) foi 3,24 ( $\pm 0,10$ ) mm enquanto a esfericidade média foi 77 ( $\pm 0,03$ ) %.

Essa diferença entre os resultados poderia ser explicada pelas diferentes metodologias empregadas na obtenção desses parâmetros. Santos, Rodriguez e Bicalho (2023) e Chielle *et al.* (2016) encontraram o diâmetro médio das sementes a partir da obtenção do diâmetro médio de

Sauter de acordo com os dados de peneiramento, e para a obtenção da esfericidade utilizaram a medição por paquímetro. Porém, mesmo com essa diferença, o diâmetro médio obtido junto com o valor da densidade das sementes possibilitou enquadrá-las na classificação de partículas do tipo D no diagrama de Geldart (1973), como também descrito por Santos, Rodriguez e Bicalho (2023) e Chielle *et al.* (2016). De acordo com isso, as sementes de mamão secas podem ser classificadas segundo Geldart (1973) como partículas grandes jorráveis, indicando que são adequadas para a utilização no leito de jorro.

A esfericidade obtida mostrou-se alta, indicando a alta proximidade com o formato esférico, característica essa também descrita por Santos, Rodriguez e Bicalho (2023) e Chielle *et al.* (2016). A esfericidade da partícula é um fator de importância a ser considerado nos processos utilizando-se leito de jorro. Partículas de maior esfericidade como as reportadas neste trabalho demonstram uma maior facilidade no processo de formação do jorro (Kalman, 2021).

A densidade e a porosidade *bulk* foram de  $0,16 (\pm 0,01)$  g/mL e 73 %, respectivamente. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Santos, Rodriguez e Bicalho (2023) no qual a densidade *bulk* medida foi  $0,192 (\pm 0,003)$  g/mL e a porosidade *bulk*  $71,7 (\pm 0,011)$  % para sementes de mamão secas. Esses valores mostram a taxa de compactação e aglomeração das partículas quando disposta em um leito, dessa forma, valores baixos para a densidade *bulk* e altos para a porosidade *bulk* mostram que as partículas apresentam baixa compactação quando dispostas em um leito.

Segundo Nascimento (2014), valores de ângulo de repouso estático ou dinâmico acima de  $60^\circ$  indicam que as partículas não apresentam fluidez, e valores menores que  $10^\circ$  indicam que as partículas formam leito aerado, dessa forma os valores do ângulo de repouso estático e dinâmico medidos neste trabalho que foram  $34,42^\circ$  e  $38,53^\circ$ , respectivamente, indicam que as sementes de mamão secas apresentam uma boa fluidez.

O valor do ângulo de repouso estático está consistente com o valor de  $38,53^\circ$  encontrado por Santos, Rodriguez e Bicalho (2023) para semente de mamão seca.

Os parâmetros apresentados são importantes para uma melhor compreensão da capacidade de escoabilidade da partícula estudada. Kalman (2021) mostra em seu estudo que partículas com altos ângulos de repouso levam a uma redução da escoabilidade, e a um aumento da coesividade entre as partículas, dificultando assim a fluidização e formação de jorro durante o processamento.

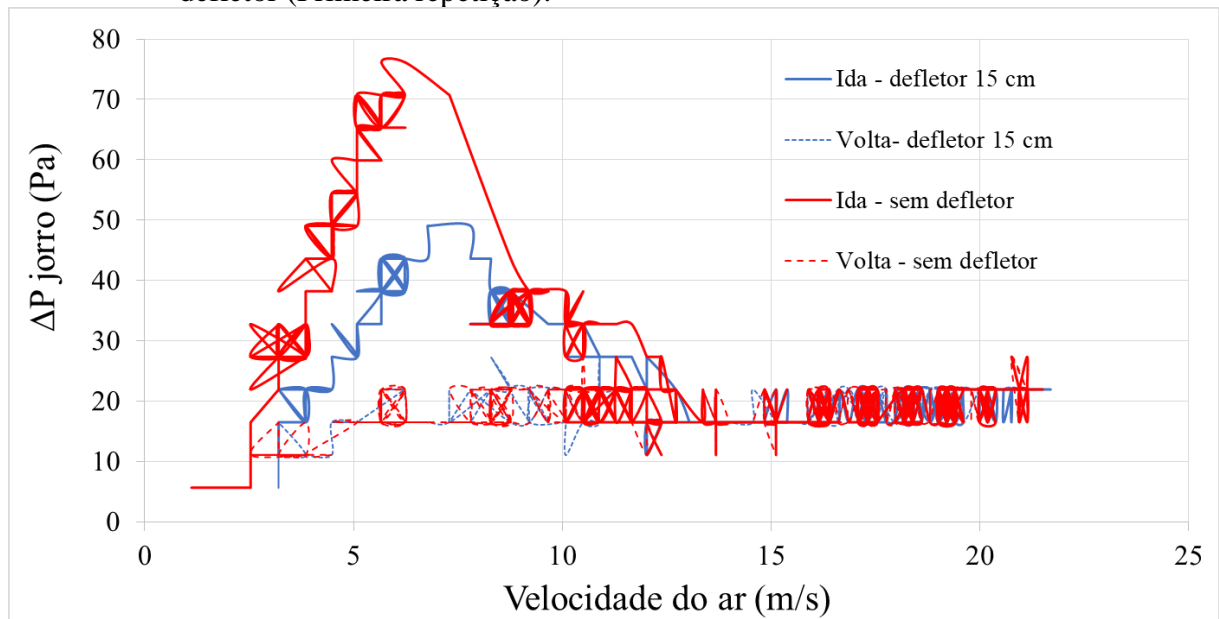
## 5.2 Caracterização fluidodinâmica do leito

### 5.2.1 Análises experimentais

#### 5.2.1.1 Curva característica

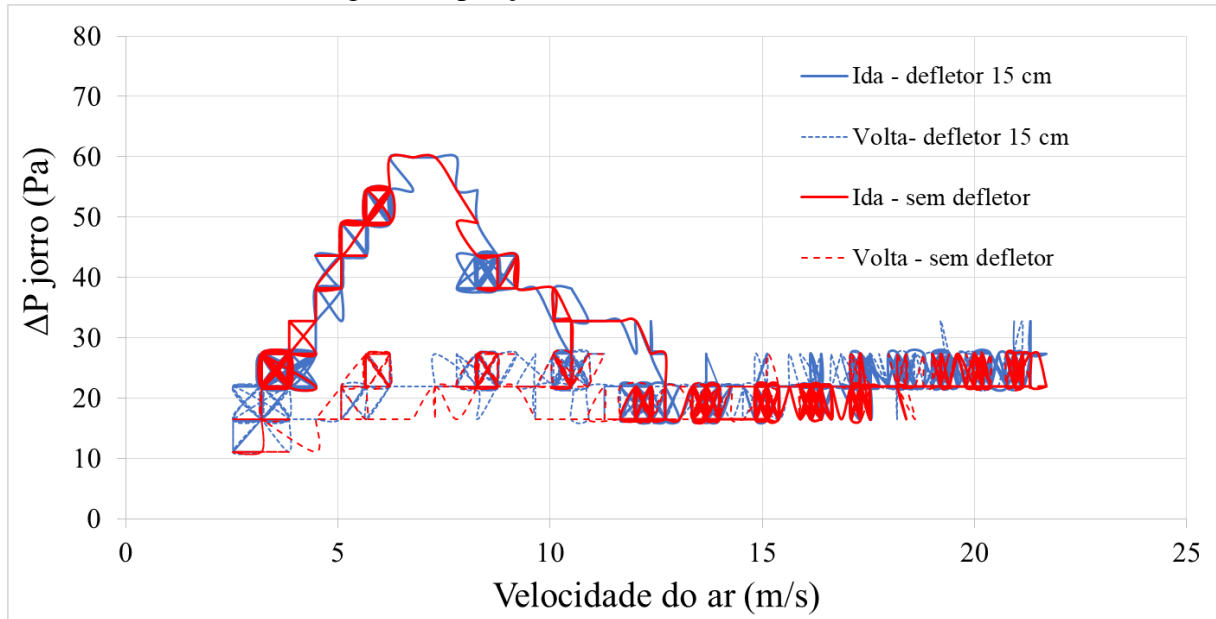
Nas Figuras 5.1 a 5.3 são apresentadas as curvas fluidodinâmicas obtidas para o leito de jorro com o defletor posicionado na altura de 15 cm em relação à base cônica e sem o defletor, para três repetições realizadas. As linhas contínuas representam o processo de ida, em que a velocidade do ar é aumentada gradualmente até não ser mais notada uma variação expressiva na queda de pressão com a velocidade do ar. As linhas tracejadas representam o processo de volta, em que a velocidade do ar é reduzida progressivamente até a parada total. As linhas tracejadas são apresentadas respectivamente nas cores correspondentes das linhas contínuas.

Figura 5.1 – Curvas fluidodinâmicas para o leito com o defletor na altura de 15 cm e sem defletor (Primeira repetição).



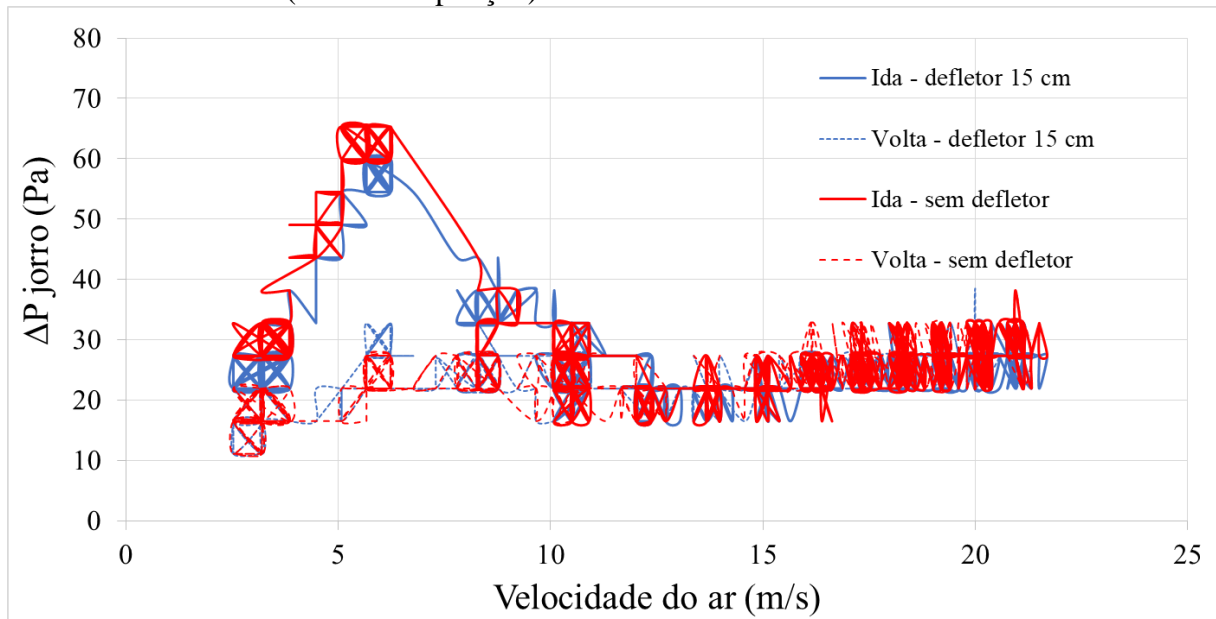
Fonte: Do autor (2024).

Figura 5.2 – Curvas fluidodinâmicas para o leito com o defletor na altura de 15 cm e sem defletor (Segunda repetição).



Fonte: Do autor (2024).

Figura 5.3 – Curvas fluidodinâmicas para o leito com o defletor na altura de 15 cm e sem defletor (Terceira repetição).



Fonte: Do autor (2024).

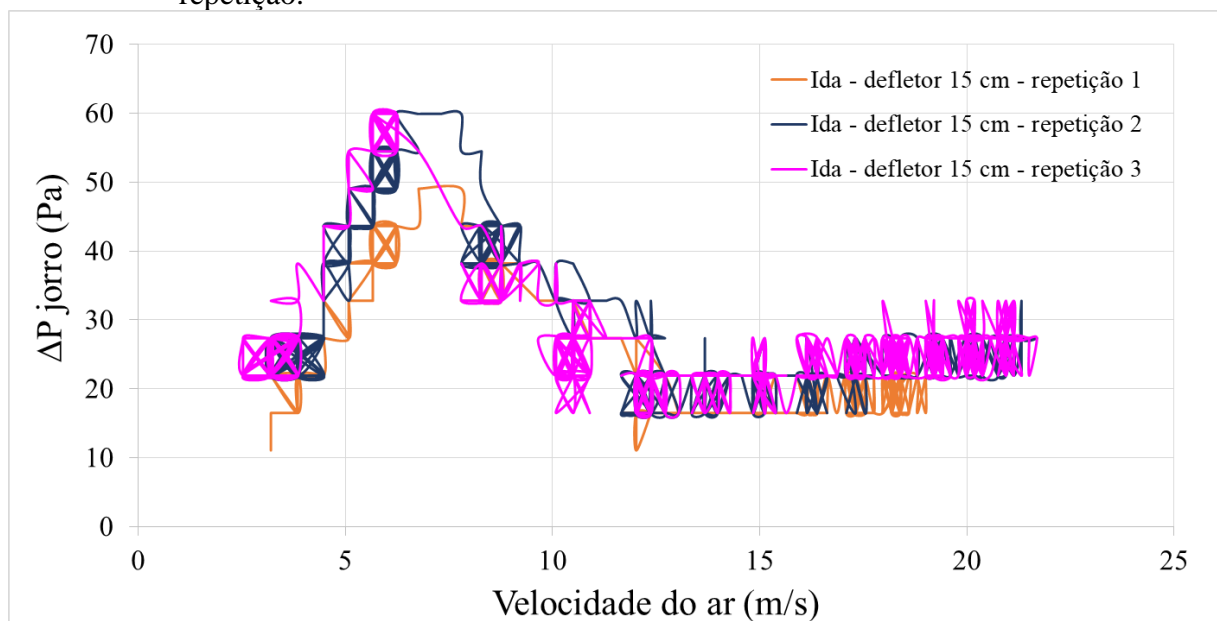
Da análise das Figuras 5.1-5.3, percebe-se que o defletor de fonte não afetou o comportamento típico esperado para a variação da queda de pressão com a velocidade do ar em leitos de jorro. No início das curvas contínuas se observa uma região de aumento da queda de pressão enquanto a velocidade do ar é aumentada. Nesta região o leito permanece fixo, com o ar somente percolando entre as partículas. Com o aumento da velocidade do ar, haverá a

formação de uma cavidade interna que empurrará o leito empacotado acima dela, então a queda de pressão continuará a subir até atingir um máximo. Quando essa cavidade interna se torna grande em relação ao leito empacotado acima dela, a resistência do leito ao escoamento diminui e a queda de pressão começa a cair. Em seguida ocorre a expansão do leito e o rompimento de sua superfície. Esse rompimento leva a uma redução brusca da queda de pressão, que indica a formação do jorro. A partir desse ponto, incrementos da velocidade do ar só irão aumentar a altura da fonte não mais alterando a queda de pressão.

Da observação da Figura 5.2 nota-se não haver diferença entre as curvas fluidodinâmicas obtidas para o leito com e sem o uso do defletor. O mesmo comportamento não se repetiu para as outras duas repetições mostradas nas Figuras 5.1 e 5.3. Nestas, observa-se uma clara tendência de redução do valor de queda de pressão máxima obtida no leito com a inclusão do defletor de fonte. Já uma tendência que se repete nas Figuras 5.1-5.3 é a obtenção de um valor de velocidade de jorro mínimo bem próximo para o leito com ou sem o uso do defletor. Nota-se que as curvas de todas as repetições mantêm o estabelecimento do jorro estável na mesma faixa de velocidades, em torno de 13 m/s.

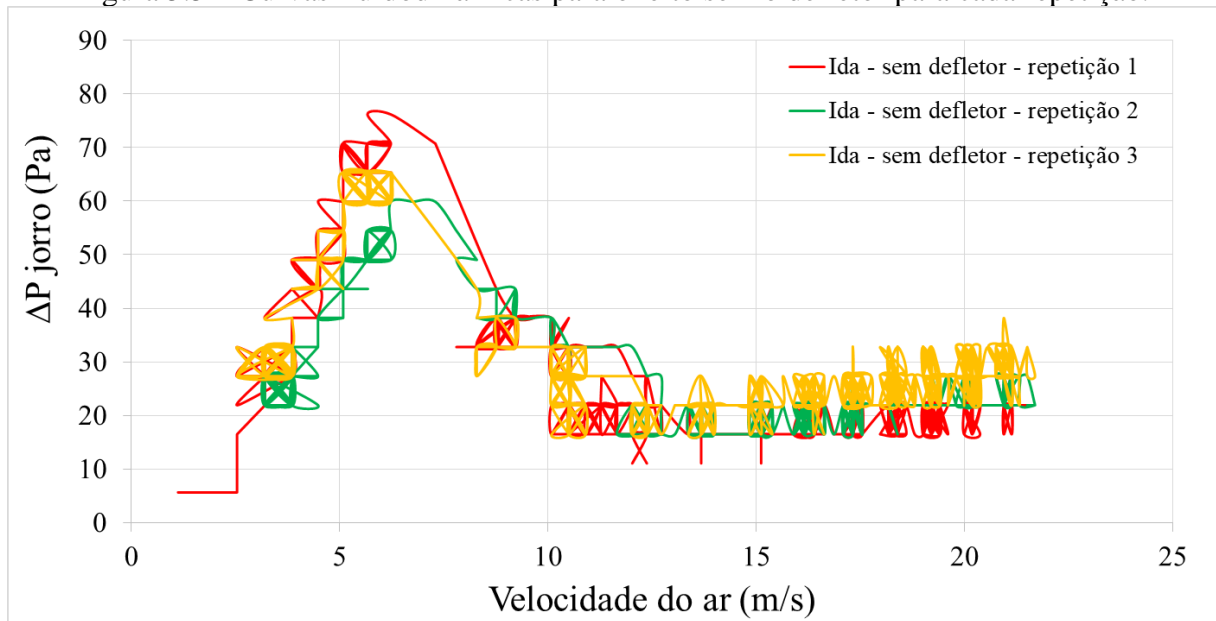
Para uma melhor visualização e comparação das curvas obtidas nas três repetições, são apresentados os dados das curvas fluidodinâmicas de ida (velocidade crescente) sem defletor e com o defletor posicionado na altura de 15 cm em relação à base cônica, de forma separada, nas Figuras 5.4 e 5.5.

Figura 5.4 – Curvas fluidodinâmicas para o leito com o defletor na altura de 15 cm para cada repetição.



Fonte: Do autor (2024).

Figura 5.5 – Curvas fluidodinâmicas para o leito sem o defletor para cada repetição.



Fonte: Do autor (2024).

A partir da comparação das repetições das curvas fluidodinâmicas apresentadas nas Figuras 5.4 e 5.5, nota-se que os resultados foram semelhantes de certa forma, porém, com algumas oscilações que poderiam ser atribuídas às instabilidades das medidas feitas pelo sistema de aquisição de dados. Cabe ressaltar que além da questão de precisão dos instrumentos usados para a medição da pressão, havia problemas de interferência elétrica de outros equipamentos no sistema de aquisição de dados da unidade de leito de jorro, que não consta de um sistema de aterramento adequado.

A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros fluidodinâmicos, pressão máxima de jorro ( $\Delta P_{\text{máx}}$ ) e velocidade de jorro mínima ( $V_{\text{mj}}$ ), obtidas através das curvas fluidodinâmicas das Figuras 5.1-5.3 bem como através de observação visual durante os experimentos.

Tabela 5.2 – Parâmetros fluidodinâmicos na operação do leito com o defletor em 15 cm e sem o uso do defletor.

|                              | com defletor em 15 cm |             |             | sem defletor |             |             |
|------------------------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|                              | repetição 1           | repetição 2 | repetição 3 | repetição 1  | repetição 2 | repetição 3 |
| $\Delta P_{\text{máx}}$ (Pa) | 49                    | 60          | 60          | 76           | 60          | 65          |
| $V_{\text{mj}}$ (m/s)        | 12,18                 | 12,18       | 10,43       | 12,18        | 12,18       | 10,43       |

Fonte: Do autor (2024).

Da Tabela 5.2 é possível observar o efeito do defletor de fonte sobre a queda de pressão máxima de jorro. Para duas das três repetições (1 e 3), notou-se um maior valor de queda de

pressão máxima de jorro ( $\Delta P_{\text{máx}}$ ) para a curva sem o defletor de fonte, sendo observado um aumento de 35,5% para a primeira repetição e 7,7% para a terceira repetição em comparação aos valores obtidos pelas respectivas curvas com o defletor de fonte. Tal resultado poderia indicar que o leito convencional necessitaria de mais energia para formar o jorro do que quando utilizado o defletor. Sabendo que o parâmetro  $\Delta P_{\text{máx}}$  está associado com o dimensionamento da potência do soprador necessário para a condução da operação, a diminuição do seu valor implicaria em uma economia da energia gasta no processo.

Por outro lado, a observação apenas das repetições 2 e 3, indicaria que praticamente não há diferença no valor de queda de pressão máxima com a inclusão do defletor. Acredita-se que esse seja o comportamento mais representativo da operação, visto que as repetições 2 e 3 se mostram muito coerentes e parecidas para todos os pontos da curva fluidodinâmica.

Já o valor da velocidade de jorro mínima ( $V_{\text{mj}}$ ) não apresentou uma diferença expressiva quando comparados os valores com e sem o uso do defletor, o que implicaria que a operação estável do leito de jorro poderia ser alcançada nas mesmas velocidades com ou sem o uso do defletor.

### **5.2.1.2 Impacto da utilização do defletor de fonte no escoamento de sementes de mamão em leito de jorro**

Como discutido anteriormente, o uso do defletor praticamente não interferiu nos parâmetros operacionais  $\Delta P_{\text{max}}$  e  $V_{\text{mj}}$  do leito de jorro. Esses resultados indicam que a operação com o uso do defletor a uma altura de 15 cm mantém a mesma energia inicial para a formação do jorro, e para manter o jorro estável apresenta praticamente a mesma velocidade de ar que seria necessária para o equipamento sem o defletor.

Outro aspecto que merece destaque sobre a operação do leito de jorro com o defletor de fonte diz respeito à estabilidade do escoamento. Foi observado que o uso do defletor de fonte praticamente eliminou a elutrição das partículas, atuando como uma barreira que forçava o seu retorno para o topo da região anular. Santos, Rodriguez e Bicalho (2023) utilizando o mesmo equipamento empregado neste trabalho, observaram instabilidades no escoamento de sementes de mamão secas. Segundo os autores, paralelamente à formação do jorro ocorria o transporte pneumático de uma parcela significativa do material. No presente trabalho não foi observado tal comportamento com a utilização do defletor, sendo possível gerar escoamentos com movimentos bem definidos na região entre a base e o defletor de fonte, o que caracteriza um

escoamento de jorro altamente estável.

Os resultados encontrados neste trabalho para a fluidodinâmica do leito com o defletor de fonte vão de encontro ao descrito em outros trabalhos da literatura utilizando um acessório semelhante, conhecido como confinador de fonte. Altzibar *et al.* (2017) desenvolveram o dispositivo confinador de fonte para auxiliar na estabilização de operações envolvendo partículas finas e ultrafinas em leitos de jorro. O confinador de fonte atuaria possibilitando o escoamento em jorro estável de partículas que normalmente seriam elutriadas em um leito. Eles observaram que o uso do confinador de fonte junto a um tubo *draft* não poroso, reduziu em aproximadamente 70% a perda (ou elutriação) das partículas, quando comparada ao leito de jorro sem o confinador. Além disso, também relataram que o sistema obteve uma redução de aproximadamente 14% no valor obtido para  $\Delta P_{\max}$ . Eles também testaram o tubo *draft* aberto nas laterais, e obtiveram uma redução na perda de partículas de aproximadamente 62% e uma redução no valor do  $\Delta P_{\max}$  de aproximadamente 11%.

Pablos *et al.* (2019) descreveram um comportamento semelhante ao descrito neste trabalho, ao estudar a utilização de confinador de fonte e tubo *draft* poroso e não poroso em leito de jorro, operando com partículas finas e ultrafinas. Os autores observaram que a utilização do conjunto confinador de fonte e tubo *draft* (poroso ou não poroso) causou a redução dos valores da queda de pressão máxima e da velocidade mínima de jorro. Além disso, foi descrito que a utilização do confinador de fonte reduziu a elutriação das partículas e auxiliou no seu retorno à região anular do leito, mostrando dessa forma a forte influência do confinador de fonte na fluidodinâmica do equipamento.

### **5.3 Resultados numéricos**

#### **5.3.1 Qualidade das malhas**

Parâmetros de qualidade foram avaliados para as três diferentes malhas confeccionadas para a geometria do leito com defletor na posição de 15 cm (Tabelas 5.3 e 5.4). Para analisar a qualidade de malhas tetraédricas, são utilizados principalmente os parâmetros *Skewness* e *Smoothness* (Ansys, 2010).

Tabela 5.3 – Parâmetros de qualidade *Skewness* para as três malhas geradas.

| Parâmetros de qualidade <i>Skewness</i> (%) |                          |                          |                    |                          |                    |                 |
|---------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|-----------------|
| Número de elementos                         | Excelente<br>0,00 - 0,25 | Muito bom<br>0,25 - 0,50 | Bom<br>0,50 - 0,75 | Aceitável<br>0,75 – 0,90 | Ruim<br>0,90 - < 1 | Degenerada<br>1 |
| 217.610                                     | 30,07                    | 55,18                    | 14,65              | 0,08                     | 0,01               | 0               |
| 334.573                                     | 30,14                    | 55,48                    | 14,29              | 0,07                     | 0,01               | 0               |
| 408.312                                     | 31,29                    | 54,81                    | 13,85              | 0,03                     | 0,01               | 0               |

Fonte: Do autor (2024).

Na Tabela 5.3 são apresentadas as métricas de qualidade referentes ao *Skewness*. *Skewness* é um dos principais parâmetros de qualidade a ser analisado, pois indica o grau de distorção dos elementos em relação ao ideal. Dessa forma, na Tabela 5.3 é possível observar que para as três malhas produzidas, mais de 85% de seus elementos apresentaram uma baixa distorção (situando-se na faixa de ‘excelente’ e ‘muito bom’), e sendo assim se assemelham ao formato tetraédrico escolhido na sua confecção. Além disso, todas as malhas apresentaram menos de 0,1% de seus elementos na faixa de ‘aceitável’ ou ‘ruim’, o que indica a boa qualidade das malhas.

Tabela 5.4 – Parâmetros de qualidade *Smoothness* para as três malhas geradas.

| Parâmetros de qualidade <i>Smoothness</i> (%) |                          |                          |                    |                          |                    |                 |
|-----------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|-----------------|
| Número de elementos                           | Excelente<br>0,00 - 0,25 | Muito bom<br>0,25 - 0,50 | Bom<br>0,50 - 0,75 | Aceitável<br>0,75 – 0,90 | Ruim<br>0,90 - < 1 | Degenerada<br>1 |
| 217.610                                       | 13,89                    | 73,77                    | 12,27              | 0,07                     | 0                  | 0               |
| 334.573                                       | 14,05                    | 73,81                    | 12,08              | 0,06                     | 0                  | 0               |
| 408.312                                       | 14,42                    | 73,92                    | 11,61              | 0,06                     | 0                  | 0               |

Fonte: Do autor (2024).

Na Tabela 5.4 são apresentadas as métricas de qualidade referentes ao parâmetro *Smoothness*. *Smoothness* indica o grau de mudança de tamanho entre as células. Mudanças muito bruscas de tamanho entre as células podem reduzir a qualidade dos resultados e dificultar o processo de convergência durante a simulação. É possível observar que mais de 80% das células apresentaram-se na faixa de ‘muito bom’ ou ‘excelente’, e que menos de 1% das células situam-se abaixo do quesito ‘aceitável’. Assim, as malhas apresentaram uma boa homogeneidade nos tamanhos das células, o que também indica uma boa qualidade.

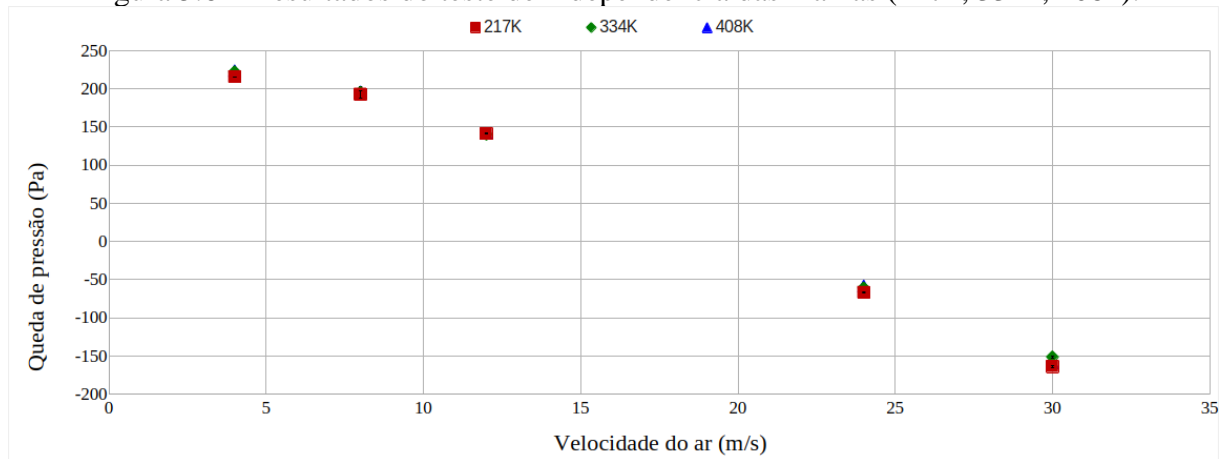
Assim, as três malhas confeccionadas são adequadas para o uso nas simulações segundo os parâmetros *Skewness* e *Smoothness*. A próxima etapa foi a realização do teste de

independência para as malhas.

### 5.3.2 Teste de independência de malha

Para a realização do teste de independência das malhas foram simuladas as curvas características do leito de jorro com defletor (posição de 15 cm). Simulações foram feitas com as três malhas para diferentes velocidades de entrada do ar (4, 8, 12, 24 e 30 m/s), conforme apresentado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Resultados do teste de independência das malhas (217k, 334k, 408k).



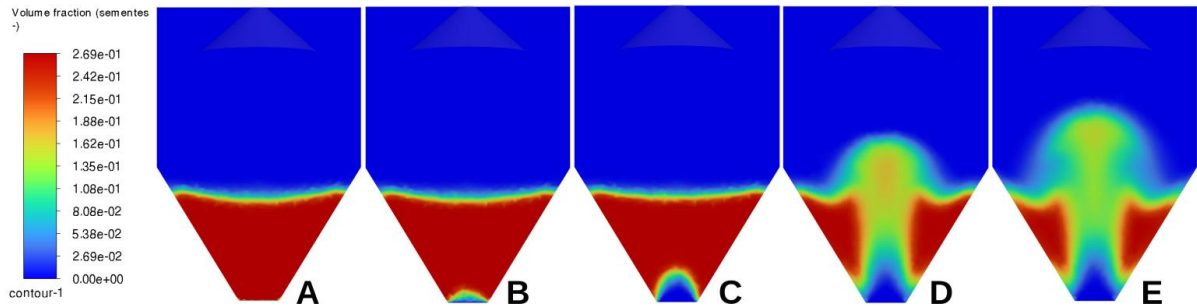
Fonte: Do autor (2024).

Ao analisar os resultados obtidos a partir do teste de independência, é possível observar que as três malhas apresentaram comportamentos semelhantes, sendo obtidos valores de queda de pressão iguais ou próximos para a mesma faixa de velocidade do ar. Dessa forma, a malha de 334k foi escolhida para a realização das próximas simulações, devido ao seu número de células intermediário e um menor esforço computacional quando comparada à malha de 408k.

No teste de independência das malhas, a faixa de velocidade escolhida (4, 8, 12, 24, 30 m/s) permitiu a identificação das etapas características do escoamento em leito de jorro. Na Figura 5.7 são apresentados os contornos de fração de sólidos para cada uma das velocidades simuladas para a malha de 334 mil células. Nela é possível observar o leito estático quando empregada a velocidade do ar de 4 m/s (Figura 5.7 (a)). Para tal velocidade, o ar percola o leito sem movimentar as partículas. Nas velocidades de 8 e 12 m/s, é possível observar as etapas de transição entre o leito estático e o jorro, em que primeiro tem-se uma ligeira movimentação na base do leito de jorro (Figura 5.7 (b)), e o ar empurra as partículas que se encontram próximas ao bocal de injeção, iniciando-se, em seguida, a formação de uma cavidade no leito de partículas

(Figura 5.7 (c)). Nas velocidades de 24 m/s (Figura 5.7 (d)) e 30 m/s (Figura 5.7 (e)) já ocorreu a formação do jorro. Nesta etapa todo o leito de partículas se tornou móvel e um jorro contínuo foi estabelecido, sendo possível a identificação das regiões características do leito de jorro.

Figura 5.7 – Fração volumétrica dos sólidos para as velocidades de entrada de ar equivalentes.

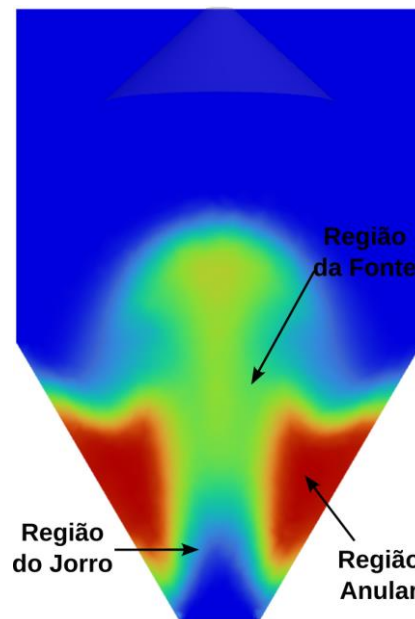


Legenda: (a) 4, (b) 8, (c) 12, (d) 24, (e) 30 m/s.

Fonte: Do autor (2024).

A Figura 5.8 destaca o perfil de contornos de fração de sólidos para a velocidade de entrada do ar de 30 m/s simulada para a malha de 334 mil células (Figura 5.7 (e)). Nela é possível identificar as três regiões características formadas durante o escoamento no leito de jorro. A região anular pode ser identificada na zona de coloração vermelha forte, o que indica um alto volume de partículas compactadas. A região do jorro pode ser identificada a partir da coloração azul forte que é formada a partir da base, essa coloração indica a ausência de partículas e a formação de um canal formado pelo ar. À medida em que a região do jorro avança é possível observar o aumento de partículas pelo clareamento da coloração azul e aparecimento da coloração amarela, o que leva a formação da região de fonte. A região de fonte é caracterizada na imagem pela estrutura semelhante a uma fonte de coloração amarelada, nela as partículas são jogadas para cima, caindo na parte superior da região anular.

Figura 5.8 – Regiões características do leito de jorro para a velocidade de 30 m/s.



Fonte: Do autor (2024).

É importante ressaltar que a simulação não foi capaz de prever o comportamento típico da curva característica do leito de jorro no que se refere aos valores da queda de pressão em função da velocidade de ar. Note-se que apesar da Figura 5.7 mostrar a transição de regimes até a obtenção de um jorro estabelecido, este comportamento não corresponde à variação esperada nos valores de queda de pressão apresentada na Figura 5.6. Na Figura 5.6 observa-se uma redução constante dos valores de queda de pressão com o aumento da velocidade do ar, não sendo possível a identificação da velocidade de mínimo jorro. Tal comportamento também foi observado nas simulações do escoamento usando modelo TFM no trabalho de Batista (2021).

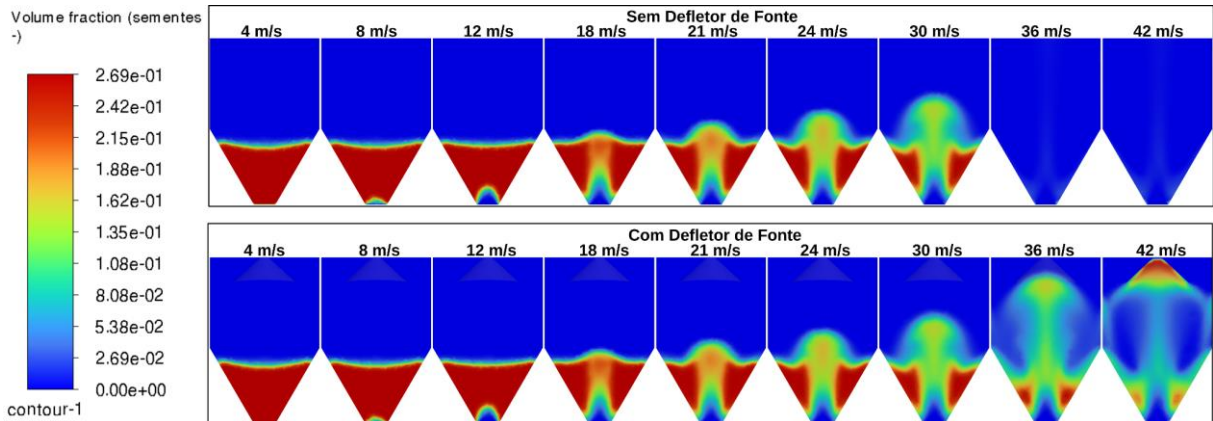
Batista (2021) estudou a fluidodinâmica de leitos de jorro cônicos operando com grãos de sorgo de forma experimental e por meio de simulações TFM (2D e 3D) e CFD-DEM. A autora observou que a simulação por meio de CFD-DEM conseguiu prever adequadamente o comportamento do leito de jorro, permitindo a detecção de etapas importantes do processo como a transição do leito e condições de jorro estável. Para as simulações TFM 2D e 3D, as curvas fluidodinâmicas não apresentaram o comportamento típico esperado, não sendo possível assim, a identificação da velocidade de mínimo jorro, para isto, os autores utilizaram perfis de contorno de sólidos.

### 5.3.3 Comparação do padrão de escoamento com e sem o uso do defletor de fonte

Para a comparação do escoamento simulado no equipamento com e sem o uso do

defletor de fonte, foram realizadas mais quatro simulações com as velocidades de 18, 21, 36 e 42 m/s para a malha com o defletor posicionado a 15 cm, e simulações das velocidades de 4, 8, 12, 18, 21, 24, 30, 36 e 42 m/s para a malha correspondendo a geometria sem defletor. Na Figura 5.9 são apresentados os contornos de fração de sólidos obtidos nas simulações.

Figura 5.9 – Perfis de contorno de sólidos simulados para o leito com e sem o uso do defletor.



Fonte: Do autor (2024).

As simulações para a geometria sem o defletor indicaram o comportamento típico de leito de jorro com o estabelecimento do jorro a partir da velocidade de 21 m/s. Resultados semelhantes foram obtidos para a geometria com o defletor. Na velocidade de 36 m/s o leito de jorro sem o defletor teve a perda total das sementes que foram arrastadas para fora do leito, já o equipamento com o defletor tem o jorro com a sua altura máxima que é limitada pela presença do defletor. Percebe-se que o defletor de fonte atua como uma barreira física, esse fenômeno foi observado nos experimentos em laboratório, o que mostra que a altura escolhida para a geometria não influenciou nos resultados. Na velocidade de 42 m/s é possível observar a formação de zonas de partículas nas paredes laterais do equipamento abaixo do defletor. Nota-se também que apesar da região da fonte ser contida, as regiões anular e de jorro são preservadas.

É importante ressaltar que não foi possível realizar a comparação quantitativa dos resultados de queda de pressão simulados com os valores obtidos de forma experimental por alguns motivos. Primeiro, que a simulação não conseguiu estimar os valores de queda de pressão seguindo o comportamento típico da curva fluidodinâmica de um leito de jorro. Segundo, devido a impossibilidade de adicionar na geometria simulada todos os acessórios presentes na unidade experimental, como por exemplo, a tela de retenção de sólidos posicionada na base do leito. O terceiro ponto a ser destacado é a diferença entre a localização da medição

da pressão experimental e simulada. Na unidade experimental, a medição é feita abaixo da tela de retenção na entrada do leito, já na simulação a medida é feita na entrada do leito que não possui essa tela.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados de caracterização física das partículas, conclui-se que as sementes de mamão secas apresentam alta esfericidade, baixa densidade, baixo teor de umidade e diâmetro médio grande. Além disso, as sementes foram classificadas como sendo pertencentes ao grupo D do diagrama de Geldart, onde se encontram partículas jorráveis grandes e/ou com alta densidade. Também foi possível obter o ângulo de repouso estático e dinâmico das partículas, que apresentaram valores baixos indicando boa fluidez entre as partículas. E em relação ao leito de partículas, foi observada uma baixa densidade *bulk*. As características físicas observadas para as sementes de mamão e o meio poroso classificam o material como ideal para realização de estudos em leito de jorro.

Foram obtidas as curvas fluidodinâmicas para o leito de jorro com e sem o uso do defletor de fonte. As curvas mostraram-se adequadas, uma vez que apresentaram o comportamento característico esperado para um leito de jorro. A partir das curvas foi possível identificar e obter o valor de parâmetros operacionais como a queda de pressão máxima ( $\Delta P_{\max}$ ) e a velocidade mínima de jorro ( $V_{mj}$ ) para o equipamento com e sem o uso do defletor de fonte.

Ao se comparar as curvas fluidodinâmicas obtidas experimentalmente para o leito de jorro, sem e com o uso do defletor de fonte, foi possível observar que praticamente não houve diferença entre elas, sendo possível concluir que o uso do defletor de fonte tendeu a não afetar a fluidodinâmica do equipamento.

A partir dos estudos fluidodinâmicos realizados utilizando da técnica CFD-TFM, não foi possível obter uma curva fluidodinâmica que representasse o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro. Porém, foi possível observar a partir da simulação as etapas da formação do jorro, e o efeito de retenção causado pela presença do defletor de fonte.

Por fim, é possível concluir que o defletor de fonte não afetou de forma expressiva a fluidodinâmica do leito de jorro, porém, o dispositivo poderia ser utilizado para reduzir ou evitar a elutrição de partículas, auxiliando na utilização do equipamento com partículas de baixa densidade ou que apresentam uma forte tendência ao arraste.

## REFERÊNCIAS

ABYZOV, Andrey M. Chemical vapor deposition from metal (Cr, Mo, W) carbonyls in a conical spouted bed vacuum reactor with a downflow reactant feeding. **Chemical Engineering Science**, [United States], v. 260, p. 117916, Oct. 2022.

ALTZIBAR, Haritz *et al.* Fountain confined conical spouted beds. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 312, p. 334–346, May 2017.

ANABTAWI, Mohammed Zohdi; UYSAL, Bekir Zuhtu; JUMAH, Rami Yussuf. Flow characteristics in a rectangular spout-fluid bed. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 69, n. 3, p. 205–211, Mar. 1992.

ANSYS. **ANSYS Fluent - CFD Software – ANSYS**. 2016. Disponível em: <http://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. Acesso em: 18 ago. 2024.

ANSYS. **ANSYS Meshing User's guide**. 13th ed. Canonsburg, 2010. 350 p.

BARCELOS, Kamilla Malverdi. **Análise do potencial do leito de jorro como reator para pirólise da casca de coco**: estudo experimental e simulação via CFD. 2016. 115 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, São Matheus, 2016.

BARROS, João Pedro Alves de Azevedo; FREIRE, Fábio Bentes; FREIRE, José Teixeira. Fluid dynamics, velocity profile and average cycle time in different configurations of the modified mechanically stirred spouted bed. **Korean Journal of Chemical Engineering**, [South Korea], v. 39, n. 11, p. 2896–2906, Nov. 2022.

BATISTA, Júnia Natália Mendes *et al.* Experimental and CFD Study of Heat Transfer in Spouted Beds: Analysis of Nusselt Number Correlations. **Theoretical Foundations of Chemical Engineering**, [Rússia], v. 54, n. 6, p. 1314–1326, Nov. 2020.

BATISTA, Júnia Natália Mendes. **Fluidodinâmica e transferência de calor em leitos de jorro visando a secagem de grãos de Sorgo**: análise experimental e simulação numérica por CFD-DEM e TFM. 2021. 141 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

BRITO, Ronaldo Correia de *et al.* Drying of particulate materials in draft tube conical spouted beds: Energy analysis. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 388, p. 110–121, Aug. 2021.

CENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2015.

CHIELLE, Daniel Padoin *et al.* Spouted bed drying of papaya seeds for oil production. **LWT - Food Science and Technology**, [England], v. 65, p. 852–860, Jan. 2016.

CORTAZAR, M. *et al.* Behaviour of primary catalysts in the biomass steam gasification in a fountain confined spouted bed. **Fuel**, [England], v. 253, p. 1446–1456, Oct. 2019.

CREMASCO, Marco Aurélio. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Editora Interciência, 2017.

DU, Jiali; WU, Feng; MA, Xiaoxun. Progress in research of process intensification of spouted beds: A comprehensive review. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, [China], v. 62, p. 238-260, Oct. 2023.

DU, Shoucheng *et al.* Catalytic pyrolysis of miscanthus  $\times$  giganteus in a spouted bed reactor. **Bioresource Technology**, [Netherlands], v. 169, p. 188–197, Oct. 2014.

DUARTE, Claudio Roberto. **Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro**. 2006. 217 p. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

EICHNER, Eduard *et al.* Use of spouted-bed spray granulation process for fabrication of metal/ceramic-polymer composites. **Chemie Ingenieur Technik**, [Germany], v. 88, n. 9, p. 1351–1351, Sept. 2016.

GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 7, n. 5, p. 285-292, Jan. 1973.

HAN, Chen *et al.* CFD–DEM simulation and experimental study of flow pattern transition in a rectangular spouted bed. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 399, Feb. 2022.

HOOSHDARAN, B. *et al.* CFD modeling of heat transfer and hydrodynamics in a draft tube conical spouted bed reactor under pyrolysis conditions: Impact of wall boundary condition. **Applied Thermal Engineering**, [England], v. 127, p. 224–232, Dec. 2017.

HOSSEINI, Seyyed Hossein; FATTAHI, Mohsen; AHMADI, Goodarz. CFD Study of hydrodynamic and heat transfer in a 2D spouted bed: Assessment of radial distribution function. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, [Taiwan], v. 58, p. 107–116, Jan. 2016.

KALMAN, Haim. Effect of moisture content on flowability: Angle of repose, tilting angle, and Hausner ratio. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 393, p. 582–596, Nov. 2021.

KMIEĆ, Andrzej. Hydrodynamics of flows and heat transfer in spouted beds. **The Chemical Engineering Journal**, [Switzerland], v. 19, n. 3, p. 189–200, Jan. 1980.

LAN, Xingying *et al.* Influence of solid-phase wall boundary condition on CFD simulation of spouted beds. **Chemical Engineering Science**, [United States], v. 69, n. 1, p. 419–430, Feb. 2012.

LIU, Malin *et al.* Investigation of fluidization behavior of high density particle in spouted bed using CFD–DEM coupling method. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 280, p. 72–82, Aug. 2015.

LIU, Xuejiao *et al.* Prediction of minimum spouting velocity by CFD-TFM: Approach development. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, [Canadá], v. 92, n. 11, Sept. 2013.

LIU, Xuejiao *et al.* Mixing behaviors in an industrial-scale spout-fluid mixer by 3D CFD-TFM. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 314, p. 455–465, June 2017.

MALEKJANI, Narjes; JAFARI, Seid Mahdi. Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD) recent advances and approaches. **Trends in Food Science & Technology**, [England], v. 78, p. 206–223, Aug. 2018.

MANURUNG, Firman. **Studies in the spouted bed technique with particular reference to low temperature coal carbonization**. 1964. 470 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of New South Wales, Kensington, Australia, 1964.

MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. Hydrodynamic characteristics of jet-spouted beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, [Canadá], v. 61, p. 377–381, Jan. 1983.

MARRETO, Ricardo Neves. **Estudo da técnica de leito de jorro convencional para secagem de microcápsulas de caseína e pectina**. 2006. 199 p. Tese (Doutorado em Ciências Farmacêuticas) - Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2006.

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. Canadá: Academic Press Inc, 1974.

MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. A technique for contacting gases with coarse solid particles. **AIChE Journal**, [United States], v. 1, n. 2, p. 157–164, June 1955.

MELO, Jardel Leno Zancanella. **Análise do leito de jorro como sistema de contato para pirólise de composto PEBD/AL**. 2014. 72 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2014.

MOLINER, Cristina *et al.* Modelling of spouted and spout-fluid beds: key for their successful scale up. **Energies**, [Switzerland], v. 10, n. 11, p. 1729, Oct. 2017.

MOLINER, Cristina *et al.* CFD simulation of a spouted bed: Comparison between the Discrete Element Method (DEM) and the Two Fluid Model (TFM). **Chemical Engineering Journal**, [Switzerland], v. 377, Dec. 2019.

NASCIMENTO, Lidiane Diniz do. **Caracterização, análise fluidodinâmica e secagem de sementes de painço em leito de jorro**. 2014. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

NORTON, Tomás; SUN, Da-Wen. Computational fluid dynamics (CFD) an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. **Trends in Food Science & Technology**, [England], v. 17, n. 11, p. 600–620, Nov. 2006.

OLAZAR, Martin *et al.* Hydrodynamics of nearly flat base spouted beds. **The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal**, [*s.l.*], v. 55, n. 1-2, p. 27–37, Aug. 1994.

OLAZAR, Martin *et al.* Pressure drop in conical spouted beds. **The Chemical Engineering Journal**, [*s.l.*], v. 51, n. 1, p. 53–60, Jan. 1993.

PABLOS, Aitor *et al.* Effect of operating conditions on the drying of fine and ultrafine sand in a fountain confined conical spouted bed. **Drying Technology**, [United States], v. 38, n. 11, p. 1446–1461, Aug. 2019.

PIETSCH, Swantje *et al.* Measurement of granule layer thickness in a spouted bed coating process via optical coherence tomography. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 356, p. 139–147, Nov. 2019.

SALDARRIAGA, Juan F. *et al.* Bed-to-surface heat transfer in conical spouted beds of biomass–sand mixtures. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 283, p. 447–454, Oct. 2015.

SAN JOSÉ, Maria J. *et al.* Cycle time in draft tube conical spouted bed dryer for sludge from paper industry. **Chemical Engineering Science**, [United States], v. 100, p. 413–420, Aug. 2013.

SANTOS, Kássia G. *et al.* Spouting behavior of binary particle mixtures of different densities: Fluid dynamics and particle segregation. **Particuology**, [China], v. 42, p. 58–66, Feb. 2019.

SANTOS, Amanda Aparecida de Lima; RODRIGUEZ, Iara Hernandez; BICALHO, Isabele Cristina. Experimental study of the drying of papaya seeds in a spouted bed and simulation of the fluid dynamics behaviour of the material. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [São Paulo], v. 41, June 2023.

SHI, Zhansheng; WANG, Wei; LI, Jinghai. A bubble-based EMMS model for gas–solid bubbling fluidization. **Chemical Engineering Science**, [United Kingdom], v. 66, n. 22, p. 5541–5555, Nov. 2011.

SUKUNZA, Xabier *et al.* Effect of the Solid Inlet Design on the Continuous Drying of Fine and Ultrafine Sand in a Fountain Confined Conical Spouted Bed. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [United States], v. 59, n. 19, p. 9233–9241, Apr. 2020.

TELLABIDE, Mikel *et al.* Minimum spouting velocity of fine particles in fountain confined conical spouted beds. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 374, p. 597–608, Sept. 2020.

TELLABIDE, Mikel *et al.* Bed symmetry in the fountain confined conical spouted beds with open-sided draft tubes. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 399, Feb. 2022.

YANG, L.; LIM, J. C.; EPSTEIN, N. Aerodynamic aspects of spouted beds at temperatures up to 580 °C. **Journal of the Serbian Chemical Society**, [Serbia], v. 61, p. 253–266, Jan. 1996.

YANG, Shiliang *et al.* Parallel CFD-DEM modeling of the hydrodynamics in a lab-scale double slot-rectangular spouted bed with a partition plate. **Chemical Engineering Journal**, [Switzerland], v. 236, p. 158–170, Jan. 2014.

YUE, Yuanhe; SHEN, Yansong. CFD-DEM study of spout incoherence phenomena in a conical spouted bed. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 406, July 2022.

YUE, Yuanhe; WANG, Shuai; SHEN, Yansong. Spout deflection in spouted beds and countermeasures: A review. **Powder Technology**, [Switzerland], v. 389, p. 309–327, Sept. 2021.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Determinação do ângulo de repouso

Abaixo são apresentadas as figuras para a obtenção do ângulo de repouso estático para as sementes secas sem exotesta (Figura C).

Figura C.1 – Sementes secas sem exotesta.



Fonte: Do autor (2024).

Figura C.2 – Sementes secas sem exotesta.



Fonte: Do autor (2024).

Figura C.3 – Sementes secas sem exotesta.



Fonte: Do autor (2024).

Figura C.4 – Sementes secas sem exotesta.



Fonte: Do autor (2024).

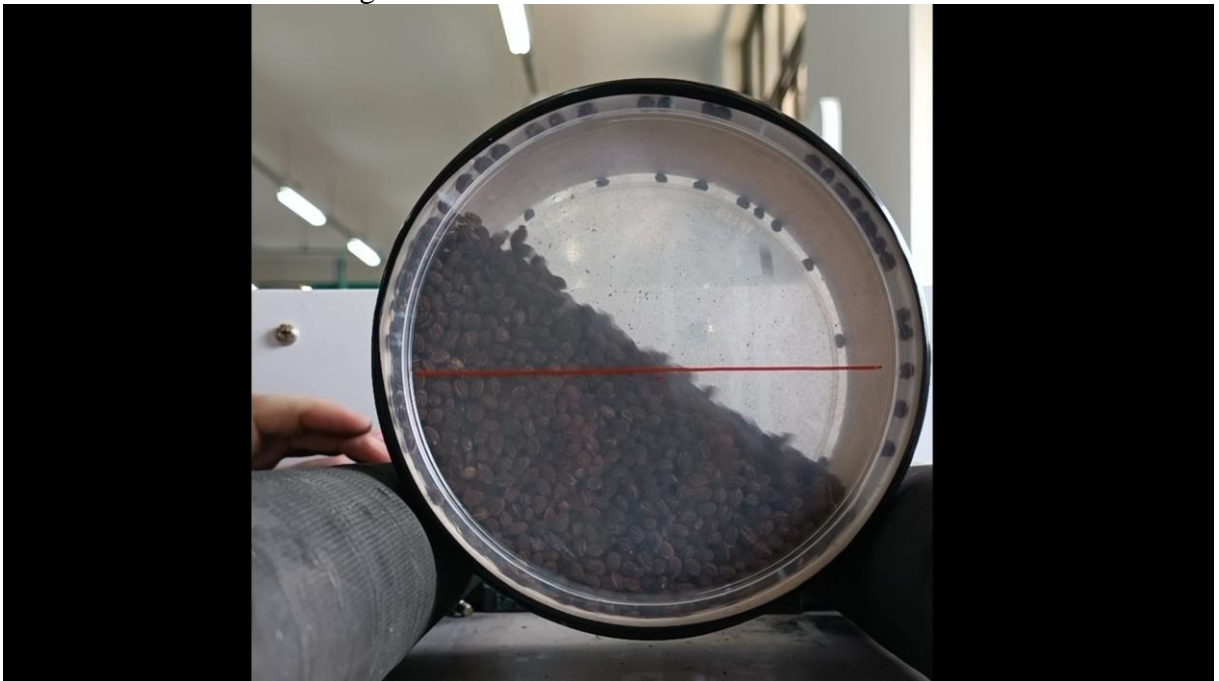
Figura C.5 – Sementes secas sem exotesta.



Fonte: Do autor (2024).

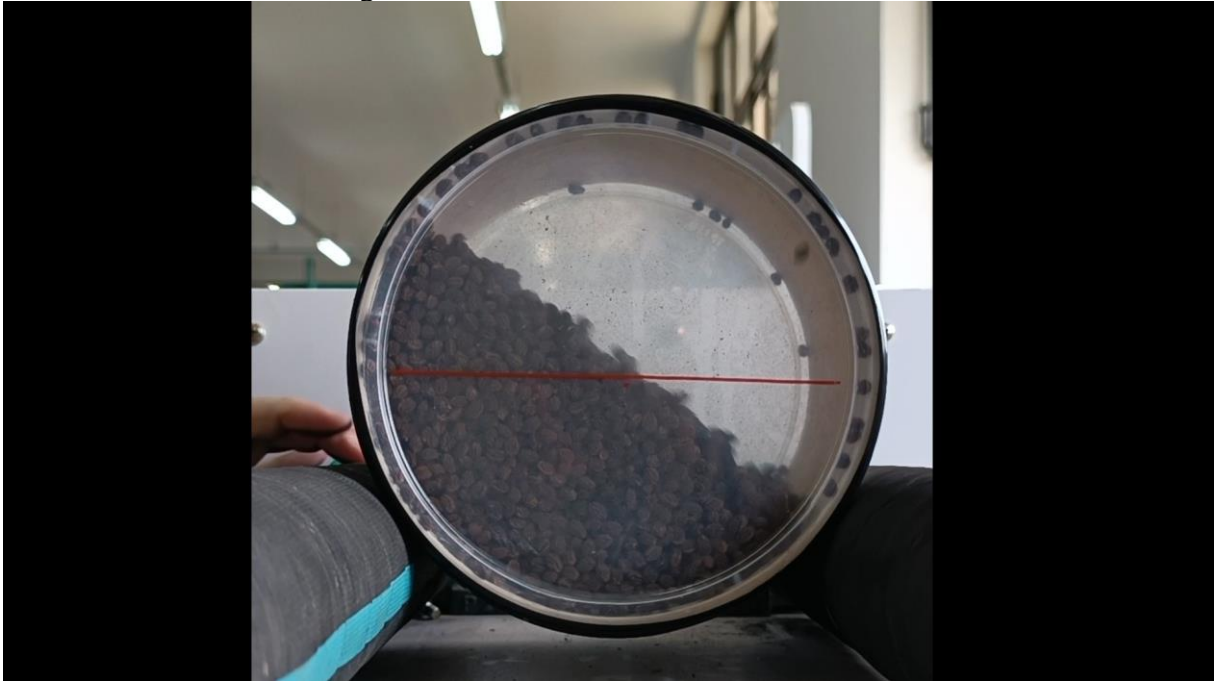
Abaixo são apresentadas as figuras para a obtenção do ângulo de repouso dinâmico para as sementes secas sem exotesta (Figura D).

Figura D.1 – Sementes secas sem exotesta.



Fonte: Do autor (2024).

Figura D.2 – Sementes secas sem exotesta.



Fonte: Do autor (2024).

Figura D.3 – Sementes secas sem exotesta.



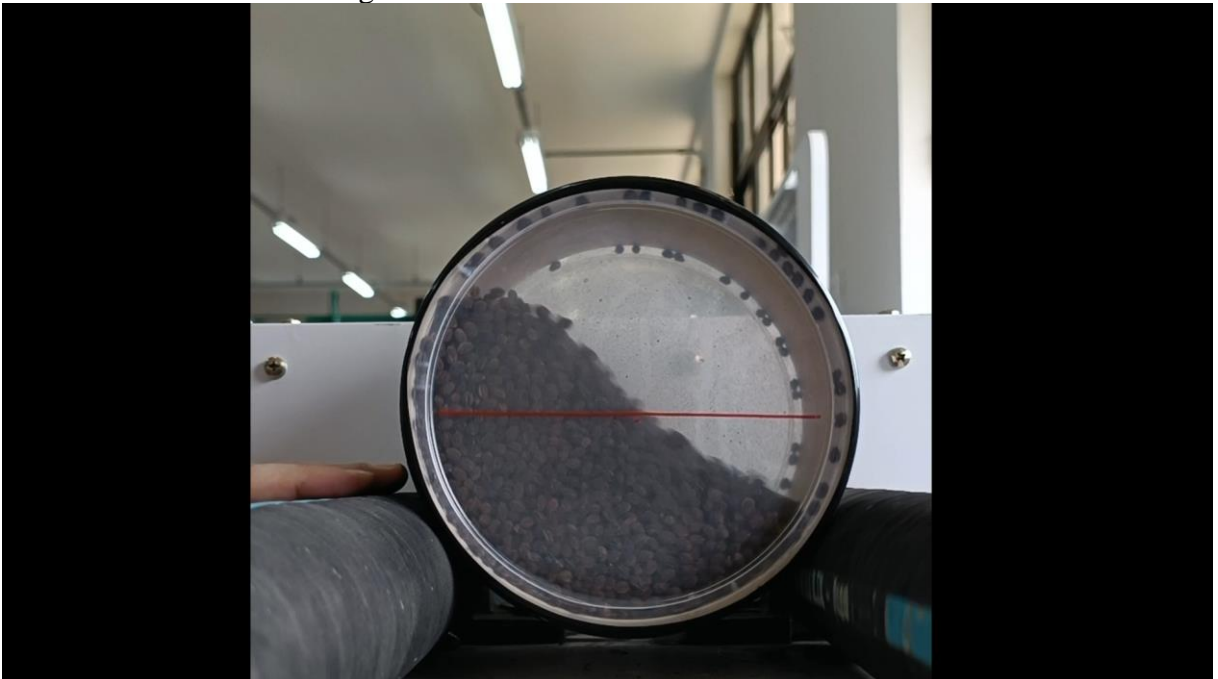
Fonte: Do autor (2024).

Figura D.4 – Sementes secas sem exotesta.



Fonte: Do autor (2024).

Figura D.5 – Sementes secas sem exotesta.

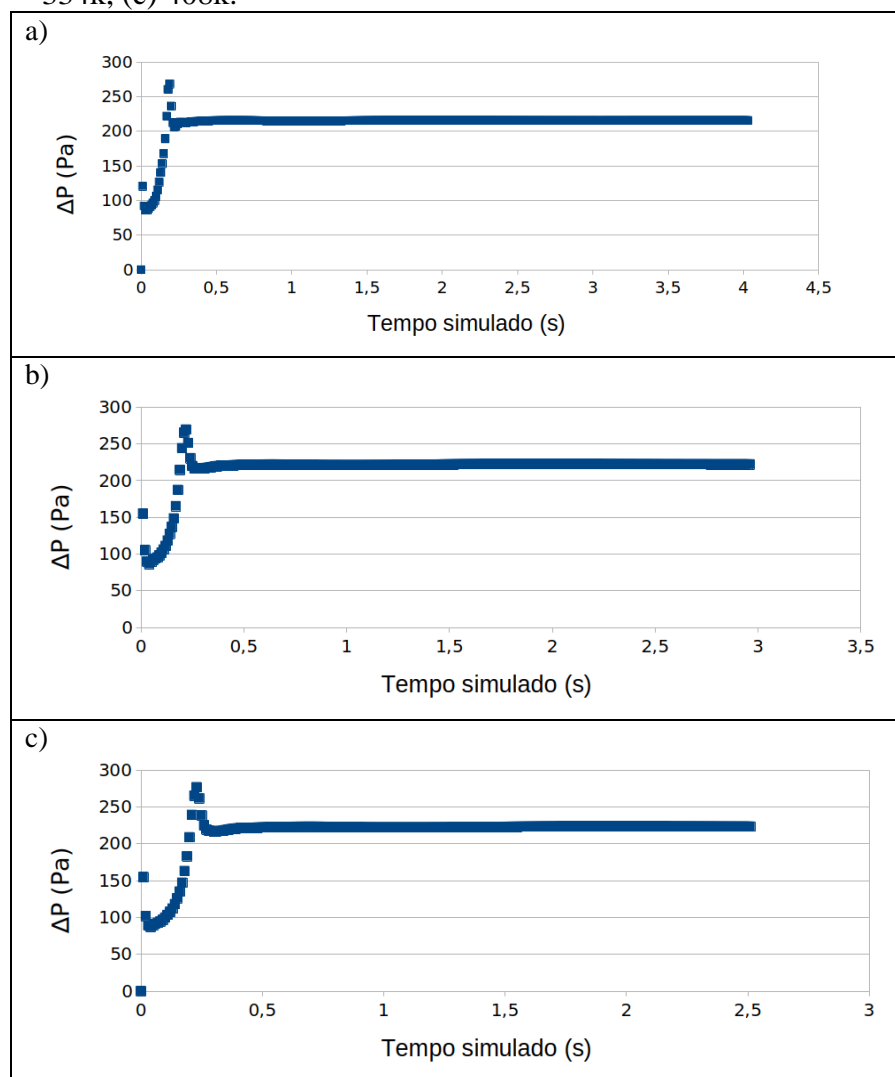


Fonte: Do autor (2024).

## APÊNDICE B – Simulação de padrões de escoamento no leito de jorro

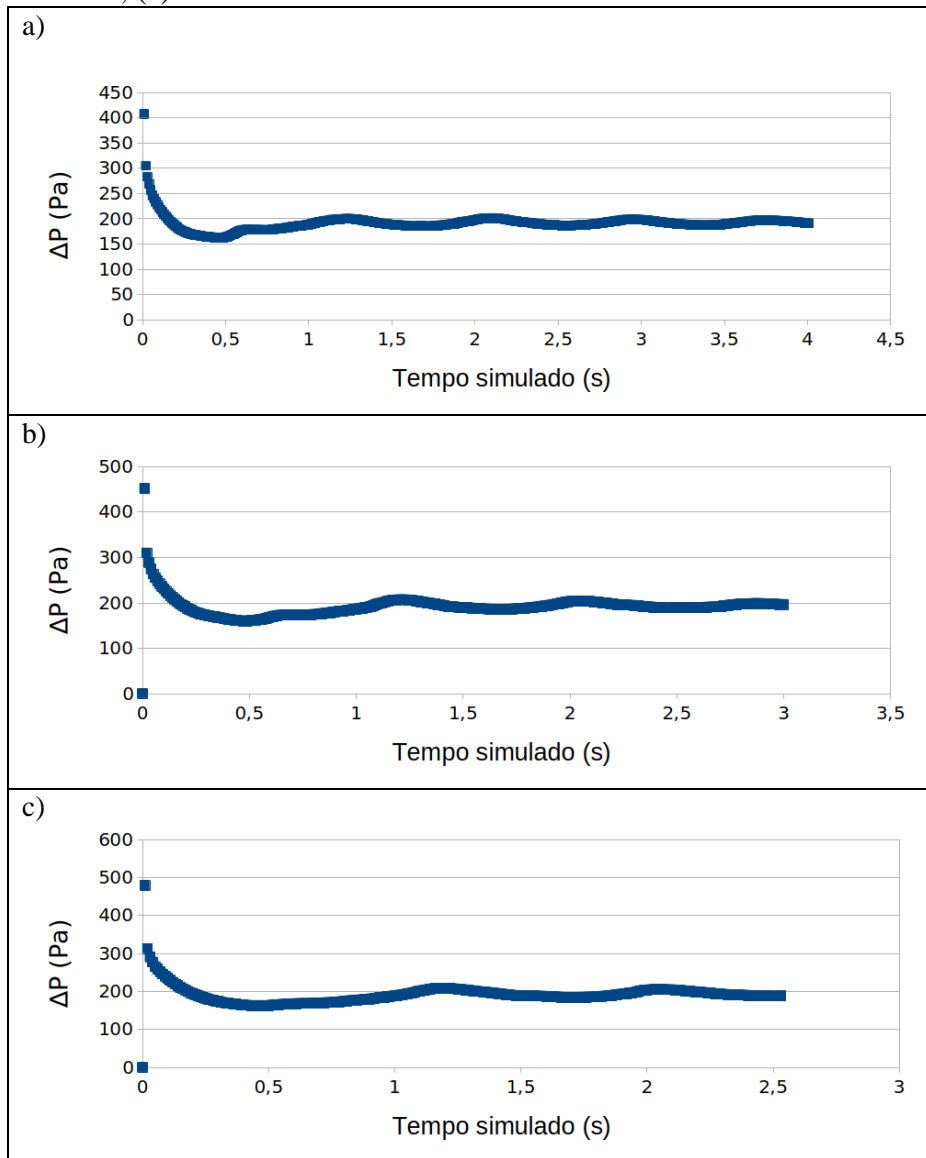
As Figuras a seguir apresentam os valores completos de queda de pressão na entrada do leito de jorro com defletor (posição de 15 cm) simuladas para as três malhas sob diferentes velocidades de entrada do ar (4, 8, 12, 24 e 30 m/s). A partir da média dos valores após estabilização foram obtidos os valores apresentados na Figura 5.6.

Figura D.1 – Queda de pressão versus tempo para a simulação do escoamento de ar na velocidade de 4 m/s na geometria com defletor para a malha de (a) 217k, (b) 334k, (c) 408k.



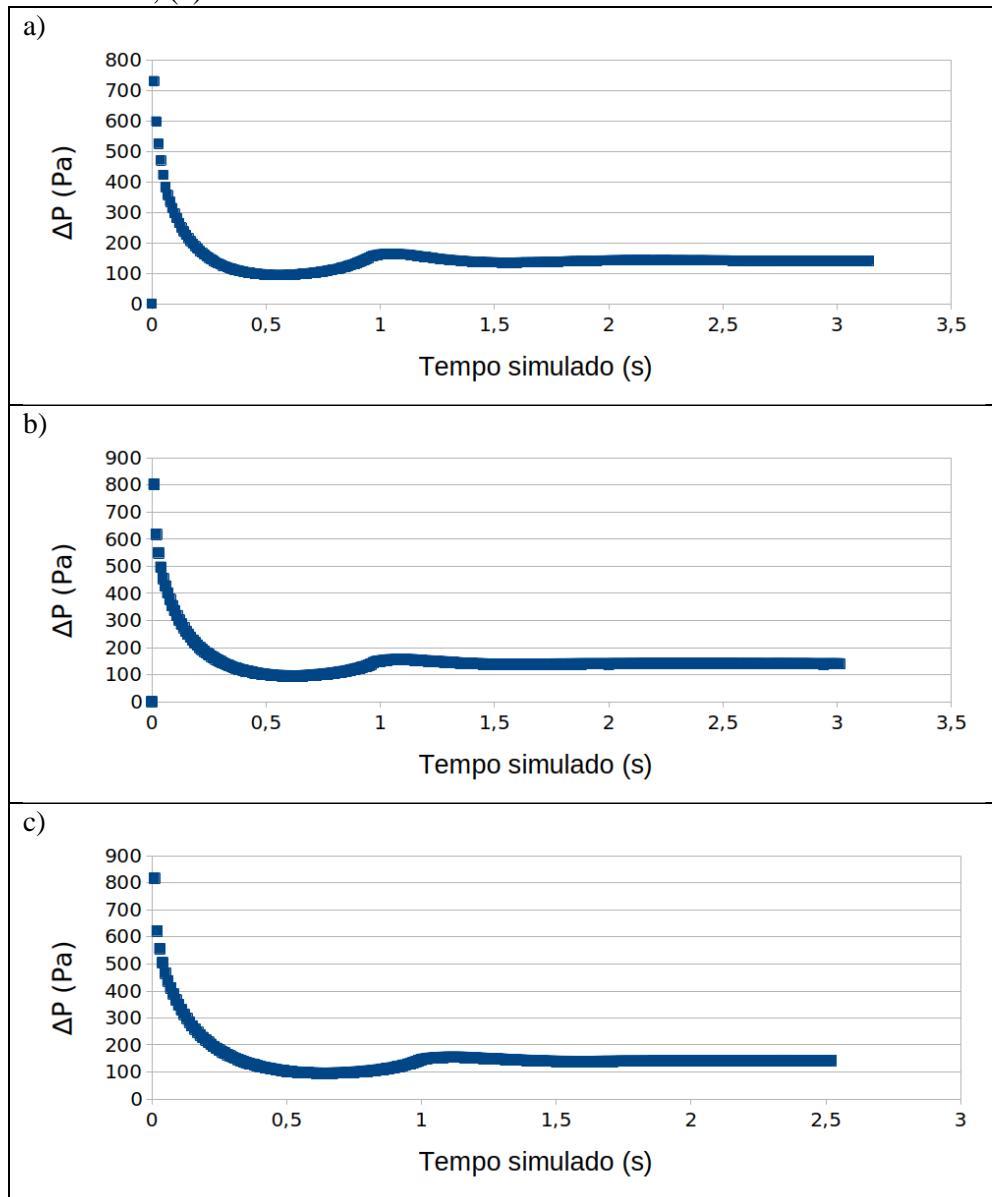
Fonte: Do autor (2024).

Figura D.2 – Queda de pressão versus tempo para a simulação do escoamento de ar na velocidade de 8 m/s na geometria com defletor para a malha de (a) 217k, (b) 334k, (c) 408k.



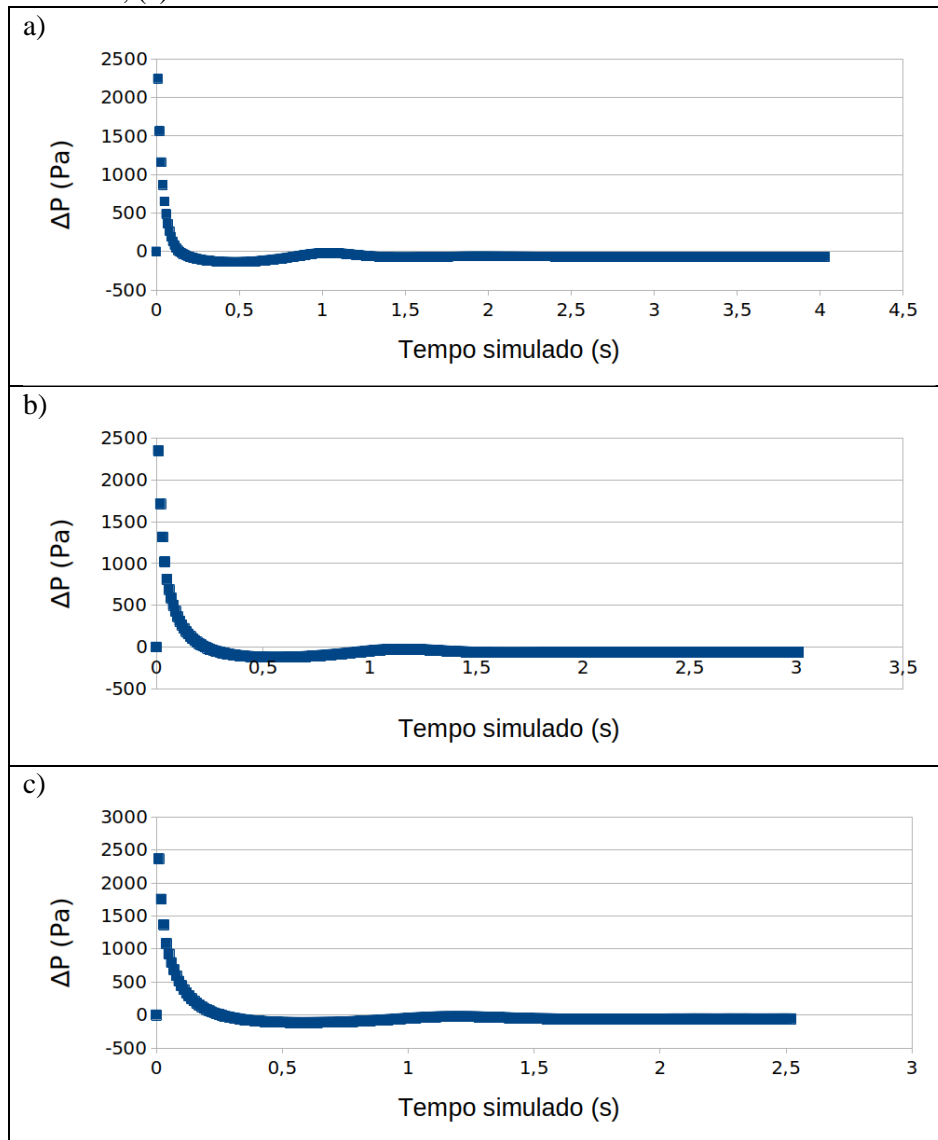
Fonte: Do autor (2024).

Figura D.3 – Queda de pressão versus tempo para a simulação do escoamento de ar na velocidade de 12 m/s na geometria com defletor para a malha de (a) 217k, (b) 334k, (c) 408k.



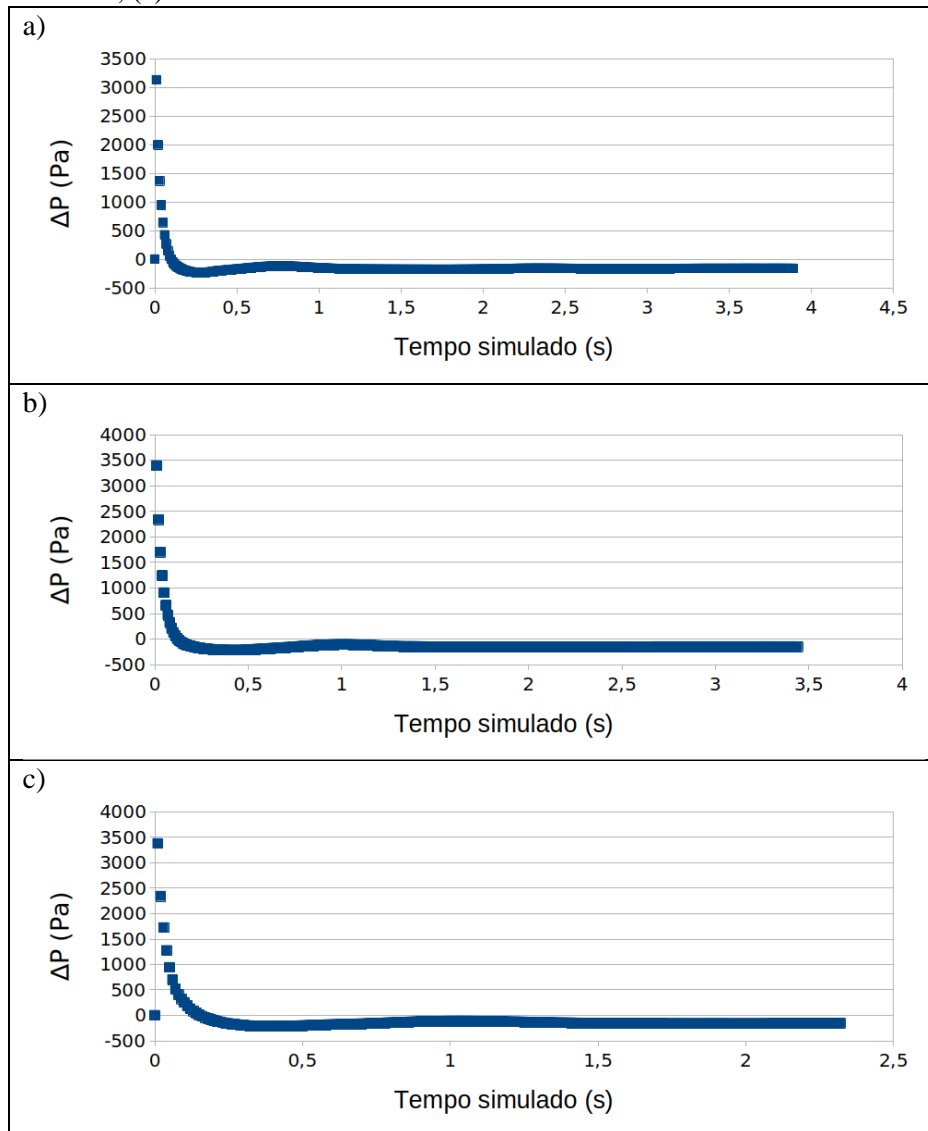
Fonte: Do autor (2024).

Figura D.4 – Queda de pressão versus tempo para a simulação do escoamento de ar na velocidade de 24 m/s na geometria com defletor para a malha de (a) 217k, (b) 334k, (c) 408k.



Fonte: Do autor (2024).

Figura D.5 – Queda de pressão versus tempo para a simulação do escoamento de ar na velocidade de 36 m/s na geometria com defletor para a malha de (a) 217k, (b) 334k, (c) 408k.



Fonte: Do autor (2024).