



AMANDA APARECIDA DE LIMA SANTOS

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL DA SECAGEM DE SEMENTES DE
MAMÃO EM LEITO DE JORRO**

**LAVRAS – MG
2022**

AMANDA APARECIDA DE LIMA SANTOS

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA
SECAGEM DE SEMENTES DE MAMÃO EM LEITO DE JORRO**

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.

Prof^a. Dr^a. Isabele Cristina Bicalho
Orientadora

Prof^a. Dr^a. Iara Hernandez Rodriguez Ansoni
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2022**

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

Santos, Amanda Aparecida de Lima.

Estudo experimental e de simulação computacional da secagem
de sementes de mamão em leito de jorro / Amanda Aparecida de
Lima Santos. - 2022.

132 p. : il.

Orientador(a): Isabele Cristina Bicalho.

Coorientador(a): Iara Hernandez Rodriguez Ansoni.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Resíduos de mamão. 2. Secador convectivo. 3.
Fluidodinâmica computacional. I. Bicalho, Isabele Cristina. II.
Ansoni, Iara Hernandez Rodriguez. III. Título.

AMANDA APARECIDA DE LIMA SANTOS

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA
SECAGEM DE SEMENTES DE MAMÃO EM LEITO DE JORRO
EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL SIMULATION STUDY OF THE
DRYING OF PAPAYA SEEDS IN A SPOUT BED**

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.

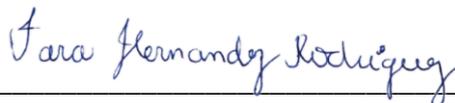
APROVADA em 10 de maio de 2022.

Prof^a. Dr^a. Renata de Alquino Brito Lima Corrêa UFLA

Prof. Dr. Ricardo Corrêa de Santana UFU



Prof^a. Dr^a. Isabele Cristina Bicalho
Orientadora



Prof^a. Dr^a. Iara Hernandez Rodriguez Ansoni
Coorientadora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me permitiu chegar até aqui. Agradeço a Ele por me dar forças, iluminar o meu caminho e estar sempre ao meu lado, guiando os meus passos.

Agradeço a Deus pela família maravilhosa que tenho ao meu lado. Aos meus pais amados, Caroline e Luciano, por todo o suporte, por confiarem em mim, pelos conselhos maravilhosos e por estarem sempre ao meu lado, me motivando. Aos demais familiares, pelo amor, orações e por toda a torcida.

Agradeço ao meu marido, Felipe, que esteve presente durante toda a minha trajetória ao meu lado, fortalecendo minhas energias, torcendo por mim, trazendo alegria para a minha vida, me motivando e me amparando.

À minha orientadora e coorientadora, Isabele e Iara, meu muito obrigada pela confiança em mim depositada, pela paciência, por sempre estarem disponíveis para me auxiliar, compartilhando seus conhecimentos e pela dedicação neste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do módulo didático de leito de jorro utilizado, que possibilitou a realização dos ensaios experimentais no presente trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos e à Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Engenharia, ao Departamento de Ciência dos Alimentos e aos professores, que contribuíram para minha formação e elaboração desse trabalho, através dos conhecimentos compartilhados, ensinamentos passados e disponibilidade de equipamentos.

Agradeço também a todos que de alguma forma colaboraram para meu desenvolvimento profissional e pessoal. Deixo aqui, meu muito obrigada, de todo coração. A ajuda de vocês foi fundamental para a realização desse trabalho.

RESUMO

O mamão papaia e formosa são amplamente cultivados no Brasil para seu comércio como fruta fresca, produção de geleias, doces, entre outros. Nos seus processamentos há geração de grande quantidade de sementes que possuem como destino o descarte. Ao se tratar de desenvolvimento sustentável, a utilização das sementes poderá contribuir com este, visto que elas podem ter grande utilidade em indústrias farmacêuticas, alimentícias e cosméticas, advinda do óleo das sementes por possuírem alto valor agregado graças a presença de ácidos graxos como o oleico, linoleico, esteárico e palmítico. No entanto, esse resíduo pode conter alta umidade o que contribui para sua degradação rápida e, por isso, é importante que ele passe por uma etapa de secagem. Essa operação pode ser realizada em um leito de jorro, equipamento que se destaca pelas suas altas taxas de transferência de massa e calor que contribuem para uma redução satisfatória da umidade das partículas. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi realizar caracterização das sementes de mamão com e sem exotesta e *in natura* e seca, investigar experimentalmente a secagem desse material em uma unidade piloto de leito de jorro. Além de estabelecer correlação empírica para a previsão da taxa de secagem da semente de mamão em função dos parâmetros velocidade e temperatura do ar, encontrar a condição que favorece a secagem dentre as condições estudadas e realizar simulações computacionais para investigar as características do escoamento no interior do leito. Primeiramente, foi feita a caracterização física das sementes de mamão por meio da obtenção do diâmetro médio de Sauter, esfericidade, densidade aparente e *bulk* solta e compactada, porosidade *bulk*, peso de mil sementes, umidade e ângulo de repouso. Após isso, foram realizados experimentos de secagem em leito de jorro variando-se a temperatura em 40, 50 e 64 °C e velocidade do ar em 21, 34 e 36 m/s. Ademais, com o auxílio de técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) foram realizadas simulações do escoamento no interior do leito. Como resultados, as sementes de mamão *in natura* sem exotesta apresentaram maior porosidade, menor umidade e melhores condições de manuseio e foram utilizadas nos estudos de secagem. Essa semente foi classificada de acordo com o grau de escoabilidade como sendo de boa fluidez e de acordo com o diagrama de Geldart como pertencentes ao grupo particulado D. A curva característica do leito de jorro apresentou comportamento coerente com o padrão típico e permitiu identificar a velocidade e queda mínima de jorro de 22 m/s e 21 Pa, respectivamente. As simulações computacionais realizadas se mostraram capazes de representar a fluidodinâmica das sementes no interior do leito. No entanto, os valores de queda de pressão experimental e simulados não se mostraram próximos. Além disso, identificou-se que maiores valores de temperatura e velocidade proporcionam maiores taxas de secagem. De maneira geral alcançou-se uma remoção de umidade satisfatória das sementes dentro do pequeno tempo de operação, além da obtenção de um maior entendimento da operação de secagem em leito de jorro proporcionado pelos resultados experimentais e simulados.

Palavras-chave: Resíduos de mamão. Secador convectivo. Fluidodinâmica computacional.

ABSTRACT

Papaya and Formosa are widely cultivated in Brazil for their trade as fresh fruit, production of jellies, sweets, among others. In their processing there is generation of a large amount of seeds that are discarded. When it comes to sustainable development, the use of the seeds can contribute to it, since they can have great utility in pharmaceutical, food, and cosmetic industries, coming from the oil from the seeds because they have high added value thanks to the presence of fatty acids such as oleic, linoleic, stearic, and palmitic. However, this residue may contain high humidity, which contributes to its rapid degradation and, therefore, it is important that it goes through a drying stage. This operation can be performed in a spouted bed, equipment that stands out for its high rates of mass and heat transfer that contribute to a satisfactory reduction of particle humidity. In view of the above, the objective of this work was to perform characterization of papaya seeds with and without exotest and in natura and dried, experimentally investigate the drying of this material in a pilot unit of a spouted bed. In addition to establish empirical correlation for predicting the drying rate of papaya seed as a function of air velocity and temperature parameters, find the condition that favors drying among the conditions studied and perform computer simulations to investigate the characteristics of the flow inside the bed. Firstly, the physical characterization of papaya seeds was performed by obtaining the average Sauter diameter, sphericity, bulk and loose bulk density, bulk porosity, weight of one thousand seeds, moisture and angle of repose. After that, drying experiments were performed in a jet bed, varying the temperature in 40, 50 and 64 °C and air velocity in 21, 34 and 36 m/s. Furthermore, with the aid of Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques, simulations of the flow inside the bed were performed. As results, the fresh papaya seeds without exotest presented higher porosity, lower humidity and better handling conditions and were used in the drying studies. This seed was classified according to the degree of flowability as being of good fluidity and according to the Geldart diagram as belonging to the particulate group D. The characteristic curve of the spouted bed presented behavior consistent with the typical pattern and allowed the identification of the minimum spouting velocity and minimum pressure drop of 22 m/s and 21 Pa, respectively. The computer simulations performed were able to represent the fluid dynamics of the seeds inside the bed. However, the experimental and simulated pressure drop values were not close. In addition, it was identified that higher values of temperature and velocity provide higher drying rates. In general, a satisfactory moisture removal of the seeds was achieved within the short operation time, besides obtaining a better understanding of the drying operation in a spouted bed provided by the experimental and simulated results.

Keywords: Papaya residues. Convective dryer. Computational fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Partes do mamão separadas em casca, semente e polpa	19
Figura 3.2 – Corte longitudinal de uma semente de mamão ilustrando suas camadas.....	21
Figura 3.3 – Ácidos graxos presentes no óleo de sementes de mamão	23
Figura 3.4 – Diagrama do processo de secagem	25
Figura 3.5 – Curvas de (a) variação da umidade em função do tempo, (b) taxa de secagem do material em função do teor de umidade	27
Figura 3.6 – Representação do leito de jorro.....	30
Figura 3.7 – Regiões características do leito de jorro.....	31
Figura 3.8 – Diferentes formas de bico da região da fonte.....	32
Figura 3.9 – Transição dos regimes devido ao aumento do fluxo de gás.....	33
Figura 3.10 – Curva característica do leito de jorro	35
Figura 3.11 – Representação dos fatores geométricos em um leito de jorro.....	39
Figura 3.12 – Diagrama de Geldart	46
Figura 3.13 – Malha multibloco estruturada usando conexão ponto a ponto.....	58
Figura 3.14 – Malha não-estruturada composta de elementos triangulares e tetraédricos.....	59
Figura 3.15 – Malha híbrida	59
Figura 3.16 – Esquema de análise da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD)	61
Figura 4.1 – Sementes de mamão (a) com exotesta em perfeito estado; (b) com exotesta aparentemente desidratando; (c) sem exotesta com seus poros a vista	62
Figura 4.2 – Sementes de mamão <i>in natura</i> (a) com exotesta e (b) sem exotesta.....	63
Figura 4.3 – Sementes de mamão após a secagem em estufa (a) com exotesta e (b) sem exotesta.....	63
Figura 4.4 – As três principais dimensões da semente	65
Figura 4.5 – Aparato experimental para determinação de densidade <i>bulk</i> compactada.....	68
Figura 4.6 – Esquema de medição do ângulo de repouso do material	70
Figura 4.7 – Módulo de secagem de leito de jorro	72
Figura 4.8 – Etapas do estudo de simulação utilizando a técnica CFD.....	73
Figura 4.9 – Geometria do leito de jorro	73
Figura 4.10 – Testes de malha (a) malha 1 (b) malha 2 (c) malha 3	74
Figura 5.1 – Curva granulométrica das sementes de mamão <i>in natura</i> com exotesta	83
Figura 5.2 – Curva granulométrica das sementes de mamão <i>in natura</i> sem exotesta.....	84
Figura 5.3 – Medição da densidade aparente de sementes de mamão <i>in natura</i> sem exotesta	

utilizando como solvente (a) água destilada; (b) álcool isopropílico.....	87
Figura 5.4 – Classificação das sementes de mamão pelo diagrama de Geldart	87
Figura 5.5 – Obtenção do ângulo de repouso para as sementes com exotesta após secas	91
Figura 5.6 – Cinética de secagem em estufa da semente de mamão <i>in natura</i> sem exotesta...	92
Figura 5.7 – Teste de independência de malha.....	94
Figura 5.8 – Malha computacional tridimensional do leito de jorro: (a) vista lateral e (b) vista com inclinação do leito	95
Figura 5.9 – Regimes de escoamento para (a) 2m/s (b) 5m/s (c) 8m/s (d) 15m/s (e) 20m/s e (f) 22m/s	95
Figura 5.10 – Fração volumétrica dos sólidos para altura de sólidos equivalente a 0,08 m e velocidade de entrada de ar equivalente a (a) 10 (b) 15 e (c) 20 m/s.....	97
Figura 5.11 – Fração volumétrica dos sólidos para altura de sólidos equivalente a 0,10 m e velocidade de entrada de ar equivalente a (a) 10 (b) 15 e (c) 20 m/s.....	97
Figura 5.12 – Fração volumétrica dos sólidos para altura de sólidos equivalente a 0,12 m e velocidade de entrada de ar equivalente a (a) 10 (b) 15 e (c) 20 m/s.....	98
Figura 5.13 – Perfil de escoamento dado com (a) vetor velocidade do ar; (b) fração de volume para as sementes	98
Figura 5.14 – Comparação da altura da fonte para uma altura do leito de sementes de 0,08 m e velocidades do ar de entrada no leito de (a) 10 (b) 15 e (c) 20 m/s.....	99
Figura 5.15 – Comparação da altura da fonte para a velocidade do ar de entrada no leito de 20 m/s e alturas do leito de sementes de (a) 0,08 (b) 0,10 e (c) 0,12 m.....	100
Figura 5.16 – Curva característica do escoamento de sementes de mamão em leito de jorro.	102
Figura 5.17 – Tela utilizada para fechar a saída do leito de partículas.....	103
Figura 5.18 – Distribuição de resíduos para a equação de taxa de secagem	108
Figura 5.19 – Normalidade dos resíduos para a equação de taxa de secagem	108
Figura 5.20 – Superfície de resposta para a taxa de secagem em função da temperatura e da velocidade do ar	109
Figura 5.21 – Sementes de mamão sem exotesta (a) <i>in natura</i> e após secas em (b) estufa por 24 h a 105 °C e em (c) leito de jorro por 15 min a 50 °C.	110
Figura A.1 – Equação obtida para a calibração da velocidade	123
Figura B.1 – Curva granulométrica das sementes de mamão após secas sem exotesta	124
Figura B.2 – Curva granulométrica das sementes de mamão após secas com exotesta.....	124
Figura C.1 – Sementes <i>in natura</i> sem exotesta	125
Figura C.2 – Sementes <i>in natura</i> com exotesta.....	125

Figura C.3 – Sementes após secas sem exotesta	126
Figura D.1 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 10 m/s e altura do leito de sementes de 0,08 m.....	127
Figura D.2 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 15 m/s e altura do leito de sementes de 0,08 m.....	127
Figura D.3 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 20 m/s e altura do leito de sementes de 0,08 m.....	128
Figura D.4 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 10 m/s e altura do leito de sementes de 0,10 m.....	128
Figura D.5 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 15 m/s e altura do leito de sementes de 0,10 m.....	129
Figura D.6 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 20 m/s e altura do leito de sementes de 0,10 m.....	129
Figura D.7 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 10 m/s e altura do leito de sementes de 0,12 m.....	130
Figura D.8 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 15 m/s e altura do leito de sementes de 0,12 m.....	130
Figura D.9 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 20 m/s e altura do leito de sementes de 0,12 m.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Produção brasileira de mamão em 2020.....	20
Tabela 3.2 – Composição centesimal das sementes de mamão dos grupos Solo e Formosa...	22
Tabela 3.3 – Correlações para obtenção do diâmetro de bico	39
Tabela 3.4 – Correlações para obtenção da altura máxima de jorro.....	40
Tabela 3.5 – Correlações para obtenção da velocidade mínima de jorro	41
Tabela 4.1 – Comportamento de escoabilidade de sólidos em relação ao ângulo de repouso..	71
Tabela 4.2 – Relação entre <i>skewness</i> e qualidade da célula	75
Tabela 4.3 – Espectro de qualidade ortogonal da malha	76
Tabela 4.4 – Condições de contorno e parâmetros utilizados nas simulações	78
Tabela 4.5 – Simulações realizadas para diferentes alturas de partículas no leito	79
Tabela 4.6 – Planejamento dos ensaios de secagem em leito de jorro com variáveis codificadas	80
Tabela 5.1 – Diâmetro médio de Sauter das sementes de mamão.....	82
Tabela 5.2 – Medida de esfericidade das sementes	85
Tabela 5.3 – Valores de densidade aparente das sementes.....	86
Tabela 5.4 – Valores de densidade <i>bulk</i> e densidade <i>bulk</i> compactada das sementes	88
Tabela 5.5 – Valores de porosidade do leito de partículas formado pelas sementes.....	88
Tabela 5.6 – Peso de 1000 sementes	89
Tabela 5.7 – Medida da umidade das sementes <i>in natura</i>	89
Tabela 5.8 – Medida do ângulo de repouso para as sementes de mamão	90
Tabela 5.9 – Variação da densidade com a umidade ao longo da secagem em estufa.....	93
Tabela 5.10 – Análise de qualidade dos três tipos de malha gerados.....	93
Tabela 5.11 – Quedas de pressão na entrada do leito segundo as simulações	101
Tabela 5.12 – Queda de pressão simulada <i>versus</i> experimental.....	105
Tabela 5.13 – Resultados de umidade e taxa de secagem em base úmida	106
Tabela 5.14 – Resultados da regressão para a taxa de secagem	107
Tabela A.1 – Dados utilizados para a calibração da pressão.....	122
Tabela A.2 – Dados utilizados para a calibração da velocidade	123
Tabela E.1 – Dados e resultados de umidade inicial e final e taxa de secagem	132

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivos específicos.....	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Processamento de frutos e geração de resíduos	18
3.1.1	Origem e cultivo de mamão	19
3.1.2	Características das sementes	21
3.1.3	Óleo da semente de mamão.....	22
3.2	Secagem.....	24
3.2.1	Curvas de secagem	26
3.2.2	Secagem de sementes de mamão	28
3.3	Leito de jorro.....	30
3.3.1	Regiões características do leito de jorro	31
3.3.2	Regimes de escoamento	32
3.3.3	Tipos de leito de jorro.....	34
3.3.4	Fluidodinâmica do Leito de jorro.....	34
3.3.4.1	Curva característica.....	35
3.3.4.2	Queda de pressão máxima e queda de pressão de jorro estável	37
3.3.4.3	Velocidade mínima de jorro.....	37
3.3.4.4	Altura máxima do leito.....	38
3.3.4.5	Previsão de parâmetros fluidodinâmicos.....	38
3.3.5	Aplicações do leito de jorro	41
3.3.6	Limitações do leito de jorro	44
3.3.7	Classificação de partículas	45
3.4	Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD).....	46
3.4.1	Princípios de CFD	48
3.4.2	Revisão dos modelos matemáticos utilizados nas simulações CFD	50
3.4.2.1	O modelo Euleriano Granular Multifásico aplicado ao leito de jorro	51
3.4.3	Análise Numérica	57
3.4.3.1	Tipos de malhas.....	58
3.4.3.2	Etapas de processamento	60
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
4.1	Matéria-prima	62

4.2	Caracterização das sementes	63
4.2.1	Diâmetro médio das sementes.....	63
4.2.2	Esfericidade	65
4.2.3	Densidade aparente.....	65
4.2.4	Peso de 1000 sementes	66
4.2.5	Umidade das sementes	67
4.3	Caracterização do meio poroso	68
4.3.1	Densidade <i>bulk</i> e <i>bulk</i> compactada.....	68
4.3.2	Porosidade <i>bulk</i>	69
4.3.3	Ângulo de repouso.....	69
4.4	Unidade experimental	71
4.5	Metodologia numérica.....	72
4.5.1	Geometria.....	73
4.5.2	Escolha do tipo de malha.....	74
4.5.3	Teste de independência de malha	76
4.5.4	Definição física e cálculos	76
4.5.5	Padrões de escoamento para diferentes alturas de partículas no leito	78
4.5.6	Infraestrutura computacional.....	79
4.6	Metodologia experimental	79
4.6.1	Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro	79
4.6.2	Ensaio de secagem	80
4.6.3	Determinação da taxa de secagem.....	81
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
5.1	Caracterização das sementes e do meio poroso	82
5.2	Análises numéricas	93
5.2.1	Escolha do tipo de malha.....	93
5.2.2	Teste de independência de malha	94
5.2.3	Análise do padrão de escoamento para diferentes condições no leito de partículas.....	96
5.3	Análises experimentais	102
5.3.1	Curva característica do escoamento de sementes de mamão em leito de jorro.....	102
5.3.2	Secagem das sementes de mamão em leito de jorro.....	106
6	CONCLUSÕES.....	111

REFERÊNCIAS.....	113
APÊNDICE A – Calibração dos sensores	122
APÊNDICE B – Distribuição granulométrica das sementes de mamão após secas	124
APÊNDICE C – Determinação do ângulo de repouso	125
APÊNDICE D – Simulação de padrões de escoamento no leito de jorro	127
APÊNDICE E – Resultados de umidade e taxa de secagem em leito de jorro.....	132

1 INTRODUÇÃO

No processamento de frutas têm-se a geração de 45 a 65% de resíduos, dentre cascas e sementes, um indicativo do grande desafio e potencial que as indústrias possuem com o fluxo orgânico. Além disso, esses resíduos podem causar problemas ambientais se não forem descartados de maneira correta (GORINSTEIN et al., 2001) ou reaproveitados como subprodutos. No contexto mundial sustentável, o reaproveitamento de resíduos tem ganhado grande destaque e atenção. Conseqüentemente, pesquisas científicas com o intuito de verificar a possibilidade de utilização de resíduos como fontes nutricionais ganham cada vez mais espaço.

Alguns estudos indicam que os resíduos de algumas frutas podem apresentar maior atividade antioxidante do que a própria polpa (GORINSTEIN et al., 2001). Segundo Diaz et al. (1997 apud DA SILVA et al., 2013), essa atividade antioxidante é responsável por prevenir ou inibir os processos de oxidação em produtos para o corpo e para a alimentação humana. Dessa maneira, embora esses resíduos sejam na maioria das vezes descartados, eles possuem em sua composição compostos bioativos de alto valor agregado, que poderiam ser empregadas, por exemplo, para aumentar o valor nutritivo da dieta da população ou melhorar a qualidade de produtos cosméticos (RINALDI; LIMA; PALMIRO, 2010).

Dentre as indústrias de processamento de frutas no Brasil, pode-se destacar a indústria de mamão, que se encontra em constante crescimento. O país está entre os cinco maiores produtores do mundo (DE MELO et al., 2020). De acordo com dados do IBGE, em 2020 foram produzidas 1.235.003 toneladas de mamão com valor de produção superior a R\$1 bilhão. O mamão é rico em vitaminas A, B e C, carboidratos, proteínas, alcalóides, enzimas proteolíticas e isotiocianato de benzila (BARROSO et al., 2016). No entanto, tanto no consumo do fruto *in natura* quanto no seu processamento, as sementes são usualmente descartadas, constituindo cerca de 15 a 20% em massa do fruto (HAMEED, 2009).

Segundo Chielle et al. (2016), as sementes de mamão possuem potencial para obtenção de subprodutos valiosos, dentre eles, o óleo de mamão, podendo ser amplamente utilizado para produção de oleoquímicos, formulações cosméticas para cuidado com a pele, óleos de banho, maquiagem e produtos de cabelo (YANTY et al., 2014; MALACRIDA; KIMURA; JORGE, 2011). Além disso, devido a sua composição, o óleo de mamão é considerado como substituto aceitável para outros óleos insaturados (MALACRIDA; KIMURA; JORGE, 2011), criando assim uma alternativa interessante para o aproveitamento das sementes, que até então, em sua grande maioria, são descartadas como resíduo.

Apesar das aplicações acima mencionadas, esse resíduo pode conter alta umidade, o

que contribui para sua rápida degradação, inviabilizando seu aproveitamento. Desta maneira, a etapa de secagem é fundamental para sua preservação e armazenamento. Essa operação reduz o teor de umidade do material, o que retarda o processo de deterioração devido à redução da atividade de água, além de aumentar o tempo de armazenamento, sem que haja perda considerável de suas qualidades fisiológicas (DE BRITO et al., 2017).

Para que não se altere a qualidade física e fisiológica do material, é indispensável que a operação de secagem seja realizada com o uso de equipamentos e condições de operação adequadas (SOUZA; FREIRE; BÉTTEGA, 2018). O leito de jorro é um equipamento utilizado na secagem de sementes (DE BRITO et al., 2017), polpas (SOARES; PEREIRA, 2020), recobrimento de partículas (DE ALMEIDA; ROCHA, 2008), processos de pirólise (FERREIRA et al., 2017; LOPEZ et al., 2019), dentre outras aplicações. A principal característica do equipamento é o movimento cíclico das partículas em seu interior o que proporciona alto contato entre as fases sólida e fluida, isto é, alto grau de mistura e altas taxas de circulação. Esse movimento cíclico beneficia o processo de secagem dos materiais devido às altas taxas de transferência de calor e massa que podem ser alcançadas durante o processo. Além disso, a operação de secagem em leito de jorro pode ser otimizada através de estudos de condições operacionais que aumentem o contato entre as fases no sistema (DE BRITO et al., 2017; SOUZA; FREIRE; BÉTTEGA, 2018).

De acordo com Silva et al. (2018), estudos fluidodinâmicos em leitos de jorro são de extrema importância, pois fornecem informação a respeito dos parâmetros que influenciam no desempenho do processo realizado no equipamento e no resultado final. Os parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro disponíveis na literatura estão intimamente ligados ao tipo de partícula e fluido presentes no interior do leito, altura do leito estático de partículas e a geometria do equipamento (ALMEIDA et al., 2020; ARROTÉIA et al., 2017; ARTUR et al., 2020; BEZERRA et al., 2013; JITTANIT; SRZEDNICKI; DRISCOLL, 2010). Nesse sentido, pode-se notar que existe uma série de parâmetros que estão envolvidos no projeto, na análise de desempenho desse tipo de equipamento e no desenvolvimento de seus procedimentos operacionais, os quais podem influenciar na qualidade do produto final e nos custos da operação. Assim, o estudo de secagem em leito de jorro é um importante campo de pesquisa a ser explorado.

No entanto, devido à presença de grande quantidade de partículas em movimento no interior do leito de jorro, se torna difícil a obtenção de informações detalhadas sobre a dinâmica entre as fases no interior do leito através de medidas experimentais. Assim, a simulação computacional surge como alternativa para prever o comportamento dinâmico no

interior do equipamento (BÉTTEGA; CORRÊA; FREIRE, 2009). As simulações computacionais por meio da técnica CFD (*Computational Fluid Dynamics*) possuem a vantagem de permitir o estudo de diferentes condições operacionais, diferentes materiais com propriedades diversas e parâmetros geométricos distintos, além de permitir que se obtenham informações detalhadas sobre o comportamento fluido-partícula sem perturbar o sistema (BARCELOS, 2016; VIEIRA NETO et al., 2008).

Há na literatura, estudos sobre a extração (SENRAYAN; VENKATACHALAM, 2018; TAN; TAN; TAN, 2020) e a aplicação industrial de óleo de semente de mamão (AFOLABI et al., 2015). Foram encontrados também estudos sobre as sementes de mamão que incluem a análise de sua qualidade fisiológica em função da secagem e de seu armazenamento (BERBERT et al., 2008), efeito da secagem no condicionamento osmótico (LOPES; SOUZA, 2008), caracterização física e química (RINALDI; LIMA; PALMIRO, 2010) e estudos morfo-anatômicos (SANTOS et al., 2009). Além disso, há estudos sobre a secagem das sementes de mamão utilizando diferentes equipamentos como secador de bandeja (BERBERT et al., 2008), leito fixo (CARLESSO, 2009) e estufa (TOME; AUGUSTINHA, 2018; VENTURINI et al., 2012). No entanto, até o presente momento, de acordo com a literatura disponível nos bancos de dados pesquisados, apenas Chielle et al. (2016) estudaram a secagem de sementes de mamão especificamente em leito de jorro, o que demonstra a importância de realizar mais estudos sobre a operação de secagem desse tipo de material em leito de jorro.

Diante do exposto, no presente trabalho investigou-se experimentalmente a secagem de sementes de mamão papaia e formosa em leito de jorro, avaliando-se as variáveis de processo de maior importância, como velocidade e temperatura do ar de secagem. Além disso, para a investigação das características fluidodinâmicas do escoamento e dos regimes de escoamento ar-partícula no interior do leito de jorro, foram realizadas simulações numéricas por meio da técnica de CFD, de forma a complementar os resultados experimentais.

2 OBJETIVOS

Com base no exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a secagem de sementes de mamão papaia e formosa em um secador de leito de jorro.

2.1 Objetivos específicos

- Caracterizar as sementes de mamão fisicamente por meio da obtenção do diâmetro médio de Sauter, densidade aparente, densidade *bulk* solta e compactada, esfericidade, porosidade *bulk*, peso de mil sementes, umidade e ângulo de repouso;
- Avaliar a influência das variáveis de processo envolvidas na secagem das sementes tais como: temperatura e velocidade do ar de secagem;
- Obter um modelo empírico que permita estimar a taxa de secagem como uma função da temperatura e velocidade do ar de secagem;
- Encontrar a condição experimental que favorece a obtenção da taxa máxima de remoção de umidade do material;
- Realizar a caracterização fluidodinâmica do equipamento através da obtenção da curva característica de queda de pressão em função da velocidade de ar de jorro, e
- Realizar simulações computacionais empregando a ferramenta CFD para investigar as características do escoamento no interior do leito, de forma a complementar os resultados experimentais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Serão discutidos nessa seção tópicos que foram considerados de maior importância para o desenvolvimento do trabalho. Primeiramente serão abordados a geração de resíduos pelas indústrias de processamento de frutas e a importância do aproveitamento desses resíduos, de forma a destacar a indústria mamoneira, sua origem, cultivo e importância econômica. Em seguida, serão decorridas as características das sementes de mamão e do óleo obtido delas. Serão definidos, posteriormente, os embasamentos teóricos a respeito da operação de secagem, bem como a descrição do equipamento utilizado neste trabalho para realizar o processo, suas regiões características, tipos de regimes de escoamento, variedades de leito de jorro, utilizações e limitações. Além disso, serão descritos tópicos relacionados à classificação de partículas e à fluidodinâmica do leito de jorro, trazendo seus principais parâmetros e equações para a realização de estimativas. Por fim, serão abordados tópicos sobre a técnica de fluidodinâmica computacional, etapas de uma simulação, fundamentos, modelos matemáticos e a abordagem numérica.

3.1 Processamento de frutos e geração de resíduos

As indústrias de processamento de frutas geram grandes quantidades de cascas, sementes e polpas, consideradas como resíduos da produção e fontes para poluição ambiental. De acordo com Duzzioni et al. (2013), algumas cascas, polpas e sementes de frutas podem conter atividade antioxidante, compostos fenólicos, ácido cítrico e ácido ascórbico. Os compostos fenólicos como flavonóides trazem vários benefícios à saúde por apresentarem atividade antioxidante, antiviral e anti-inflamatória. O ácido cítrico auxilia na decomposição de gordura, regulação dos níveis de pH no corpo e evita disfunção intestinal; já o ácido ascórbico, mais conhecido como vitamina C, desempenha um papel importante na hidroxilação do colágeno, resistência aos ossos e atividade antioxidante.

Ao se considerar um desenvolvimento sustentável, o aproveitamento desses resíduos pode contribuir ao serem utilizados em indústrias farmacêuticas, alimentícias e cosméticas (CUNHA et al., 2009). De acordo com Kowalska et al. (2017), resíduos vegetais aproveitados como subprodutos têm potencial para serem utilizados como aditivos alimentares e nutracêuticos. Ainda, segundo os autores, a valorização de resíduos gerados tanto na indústria de alimentos como em atividades domésticas constitui uma solução benéfica de reaproveitamento e geração de subprodutos, contribuindo para o aumento da saúde da população para uma cadeia alimentar mais sustentável do ponto de vista ambiental e econômico.

No entanto, esse tipo de resíduo pode conter alta umidade, o que contribui para sua degradação rápida, inviabilizando muitas vezes o seu aproveitamento. Por isso, é importante a utilização de operações que retardem essa degradação possibilitando manter os resíduos em condições adequadas para o seu aproveitamento. A secagem, que será abordada mais adiante, é uma das operações mais utilizadas para desidratar resíduos sem que haja perda considerável de suas propriedades fisiológicas, a depender das condições empregadas.

3.1.1 Origem e cultivo de mamão

No Brasil, existem comercialmente duas variedades de mamoeiro que pertencem aos grupos Solo e Formosa. Suas principais diferenças encontram-se no peso e formato do fruto. Os frutos do grupo Solo, conhecido popularmente como mamão papaia (*Carica papaya* var. *solo*) possuem tamanho pequeno, e peso na faixa de 300 a 650 g. Já os frutos do grupo Formosa, conhecidos popularmente como mamão formosa (*Carica papaya* var. *formosa*) possuem tamanho médio e peso de 1000 a 1300 g (EMBRAPA, 2009).

O mamão (*Carica papaya*), representado pela Figura 3.1, é uma planta herbácea de haste única pertencente à família Caricaceae (TAN; TAN; TAN, 2020). Esse tipo de mamão é nativo da América Central, cultivado em áreas tropicais e subtropicais e apresenta forma cilíndrica, oval ou alongada. A polpa desse fruto é alaranjada, macia e suculenta e possui cavidade central com grandes quantidades de sementes. Sua casca é fina e lisa e apresenta coloração verde, quando colhida, e torna-se, gradualmente, amarela ou laranja durante o seu amadurecimento (BARROSO et al., 2016; DESAI; WAGH, 1995 apud MALACRIDA; KIMURA; JORGE, 2011).

Figura 3.1 – Partes do mamão separadas em casca, semente e polpa.



Fonte: Rinaldi, Lima e Palmiro (2010).

O fruto é rico em vitaminas A, B e C, carboidratos, proteínas, alcalóides como a carpaína utilizada como ativador cardíaco, enzimas proteolíticas como a papaína utilizada

como amaciante de carnes e acelerador do processo de cicatrização e ainda é rico em isotiocianato de benzila, substância bioativa cujas aplicações vão desde relaxamento vascular até inibição da proliferação do câncer, possuindo, também, atividade anti-helmíntica (BARROSO et al., 2016).

O mamoeiro é considerado uma frutífera de crescimento rápido e elevada precocidade, iniciando seu florescimento de três a quatro meses do plantio e entre oito e dez meses está propício à colheita dos frutos. Comercialmente, o mamão é propagado a partir da venda de mudas oriundas de sementes (LYRA et al., 2007 apud SANTOS et al., 2009). Segundo Santos et al. (2009), no Brasil, problemas relacionados ao mamoeiro ocorrem devido a limitação de opções de híbridos comerciais para o plantio e, conseqüentemente, o elevado preço de algumas sementes híbridas.

O Brasil está entre os cinco maiores produtores de mamão do mundo devido a suas condições climáticas que favorecem a produção do fruto durante todo o ano (DE MELO et al., 2020). Além da grande importância econômica, o cultivo de mamoeiros no Brasil possui também relevância social pois, devido a seu rápido crescimento, é necessária a renovação periódica das lavouras, o que reflete em uma grande geração de empregos (EMPRAPA, 2009).

De acordo com dados do IBGE (2020), a produção brasileira de mamão concentra-se nas regiões nordeste e sudeste com 54,3% e 40,7% de participação, respectivamente. Os estados com maior produção de mamão no Brasil são Espírito Santo, Bahia, Ceará, Rio Grande do Norte e Minas Gerais, conforme apresentado na Tabela 3.1. Esses estados são responsáveis por 89,7% de toda a produção nacional de mamão. Ainda de acordo com dados do IBGE, em 2020 foram produzidas 1.235.003 toneladas de mamão com valor de produção superior a R\$1 bilhão.

Tabela 3.1 – Produção brasileira de mamão em 2020.

Estado	Área colhida (ha)	Produção (t)	Rendimento (t/ha)
Espírito Santo	7.309	438.855	60,04
Bahia	9.579	368.109	38,43
Ceará	2.067	152.558	73,81
Rio Grande do Norte	2.254	94.437	41,90
Minas Gerais	1.241	50.837	40,96
Outros	6.000	130.207	21,70

Fonte: IBGE (2020).

O mamão é cultivado principalmente para consumo fresco, mas ele pode ser processado para produção de geleia, doces, polpas, entre outras aplicações (CHIELLE et al.,

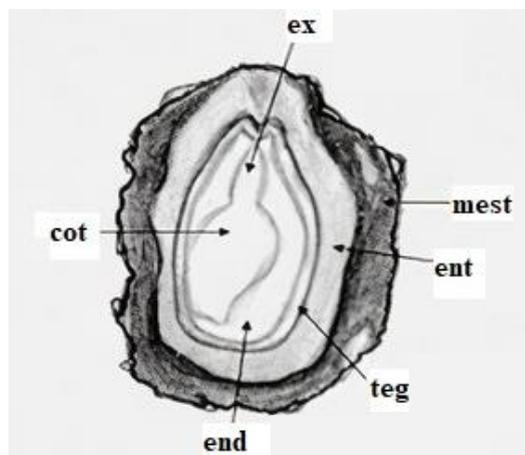
2016). Tanto para o consumo do fruto quanto para seu processamento, as sementes são usualmente descartadas, constituindo cerca de 15 a 20% em massa do fruto, que se descartado de maneira incorreta, pode gerar problemas ambientais (HAMEED, 2009).

Segundo Chielle et al. (2016), as sementes de mamão possuem potencial para obtenção de subprodutos valiosos como proteínas, fibras alimentares e óleo de mamão. Surge assim, uma alternativa para o aproveitamento das sementes, que até então, em geral, eram descartadas como resíduo. Portanto, a utilização de sementes de mamão para produção de óleo não traz apenas renda adicional, mas também pode reduzir a geração de resíduos, fator importante, principalmente, para indústrias de processamento de alimentos.

3.1.2 Características das sementes

As sementes de mamão são pequenas e possuem forma arredondada ou ovais com superfície rugosas e recobertas por uma camada mucilaginosa chamada de exotesta, uma película protetora dos poros da semente. No entanto, ainda não se têm na literatura muitos estudos sobre a caracterização das sementes, e não há um consenso a respeito da terminologia utilizada para definição de suas partes. De acordo com Santos et al. (2009), a parte externa possui uma coloração marrom escuro, caracterizada pela mesotesta (mest). Têm-se também uma camada marrom clara caracterizada pela endotesta (ent); nesta camada, pode-se observar o tegumento (teg), caracterizado por uma camada com coloração bege, que reveste o endosperma (end), o eixo embrionário (ex) e o cotilédone (cot). A Figura 3.2 ilustra essas camadas.

Figura 3.2 – Corte longitudinal de uma semente de mamão ilustrando suas camadas.



Fonte: Santos et al. (2009).

De acordo com o trabalho de Jorge e Malacrida (2008), as sementes de mamão são

excelentes fontes de fibras, proteínas, lipídeos e umidade, conforme apresentado na Tabela 3.2. As sementes são higroscópicas, ou seja, possuem a capacidade de troca de umidade entre elas e o ar ambiente que as circunda e, assim, sofrem variações no seu teor de água de acordo com as condições do ambiente (SARAVIA; PERES; RISSO, 2007).

Tabela 3.2 – Composição centesimal das sementes de mamão dos grupos Solo e Formosa.

Componentes	Formosa	Solo
Umidade	8,6	8,4
Lipídeos	27,5	25,8
Proteínas	25,3	26,6
Cinzas	7,8	7,5
Fibras	28,2	29,9
Carboidratos	2,8	1,8

Fonte: Jorge e Malacrida (2008).

A umidade de uma substância refere-se à quantidade de água ligada e não ligada nas estruturas dos sólidos. No interior das sementes, a água pode ter alguns tipos de ligações (ligações físicas e/ou químicas), de acordo com a força em que elas se encontram ligadas à superfície das macromoléculas (PARK et al., 2008).

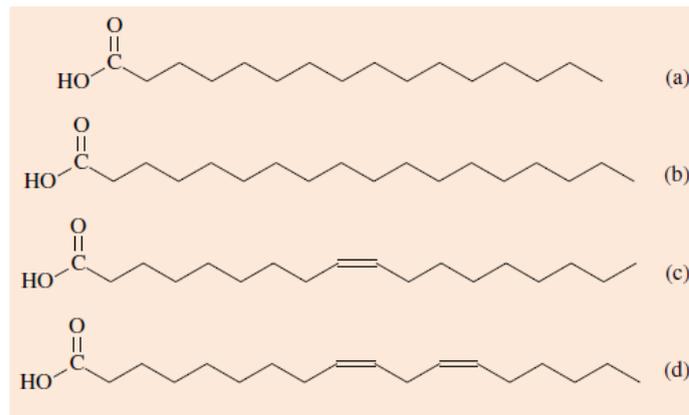
A água ligada refere-se à ligação das moléculas de água com os componentes não aquosos da semente de maneira extremamente forte e difícil de ser rompida. Essa água não se encontra disponível para o crescimento de microrganismos e ações enzimáticas. Já a água não ligada, também denominada de água livre, refere-se a água que está livre para reações enzimáticas e para o crescimento de microrganismos (ANDRADE et al., 2006; PARK et al., 2008). De acordo com Park et al. (2008, p. 84), “a água não ligada envolve a energia para sua evaporação ao nível de calor latente de vaporização, já a água ligada necessita de maior nível de energia para a sua evaporação”.

3.1.3 Óleo da semente de mamão

O processo de extração de óleos vegetais das mais diversas matérias-primas possui papel importante nas indústrias de alimentos, cosméticos, combustíveis, entre outras. Devido a importância da reutilização de resíduos sólidos, a extração de óleo das sementes de mamão, pode agregar valor econômico ao fruto, uma vez que as sementes em sua maioria são descartadas. O óleo da semente de mamão apresenta coloração amarela avermelhada e análises físico-químicas mostram que suas propriedades são semelhantes às de óleos de sementes convencionais como as do óleo de canola (MALACRIDA; KIMURA; JORGE, 2011).

Os trabalhos de Chielle et al. (2016) e Malacrida, Kimura e Jorge (2011) mostraram que as sementes de mamão papaia possuem alto teor de óleo (26,5 g óleo/100 g de sementes e 29,16 g óleo/100 g de sementes, respectivamente), sendo este rico em ácidos graxos como os ácidos oleico ($C_{18}H_{34}O_2$), palmítico ($C_{16}H_{32}O_2$), linoleico ($C_{18}H_{32}O_2$) e esteárico ($C_{18}H_{36}O_2$), cujas estruturas estão apresentadas na Figura 3.3. A presença desses ácidos graxos insaturados e em grande quantidade torna esse óleo um substituto aceitável para outros óleos insaturados.

Figura 3.3 – Ácidos graxos presentes no óleo de sementes de mamão.



Legenda: (a) Palmítico; (b) Esteárico; (c) Oleico e (d) Linoleico.

Fonte: Adaptada de Ramalho e Suarez (2013).

Os ácidos graxos são compostos orgânicos formados por uma cadeia de átomos de carbono ligados a átomos de hidrogênio e com um grupo de ácidos carboxílicos em uma de suas extremidades. Esses ácidos podem ser classificados dependendo da natureza da cadeia de hidrocarbonetos em ácidos graxos saturados, em que os carbonos apresentam ligações simples, ou ainda em ácidos graxos insaturados, em que os carbonos apresentam ligação dupla. Os ácidos graxos insaturados podem ser denominados monoinsaturados, com apenas uma ligação dupla, ou ácidos graxos poliinsaturados, com duas ou mais ligações duplas.

De acordo com Malacrida, Kimura e Jorge (2011), o óleo da semente de mamão mostrou ser rico em ácidos graxos insaturados (78,17%), apresentando em maior parte ácidos graxos monoinsaturados (71,89%). Segundo Tan, Tan e Tan (2020), em sua composição encontra-se em maior parte ácido oleico (66,74-76,80%) e ácido palmítico (12,80-19,70%). O alto teor de ácido oleico no óleo das sementes de mamão pode ser comparado aos óleos obtido de abacate (50,3%), amendoim (51,3%), azeitona (71%) e avelã (72,7%) (VINGERING et al., 2010).

Como o óleo da semente de mamão mostrou ter um perfil nutricional de ácidos graxos monoinsaturados, ele pode ser útil para a produção de oleoquímicos, formulações cosméticas

como cuidados com a pele, óleos de banho, maquiagem e produtos de cabelo e lubrificantes à base de óleo. Além disso, como o óleo de mamão contém baixo nível de ácido poliinsaturado (<5%), mas alto nível de ácido oleico (>66%), ele é adequado para aplicações domésticas de cozimento (MALACRIDA; KIMURA; JORGE, 2011; YANTY et al., 2014).

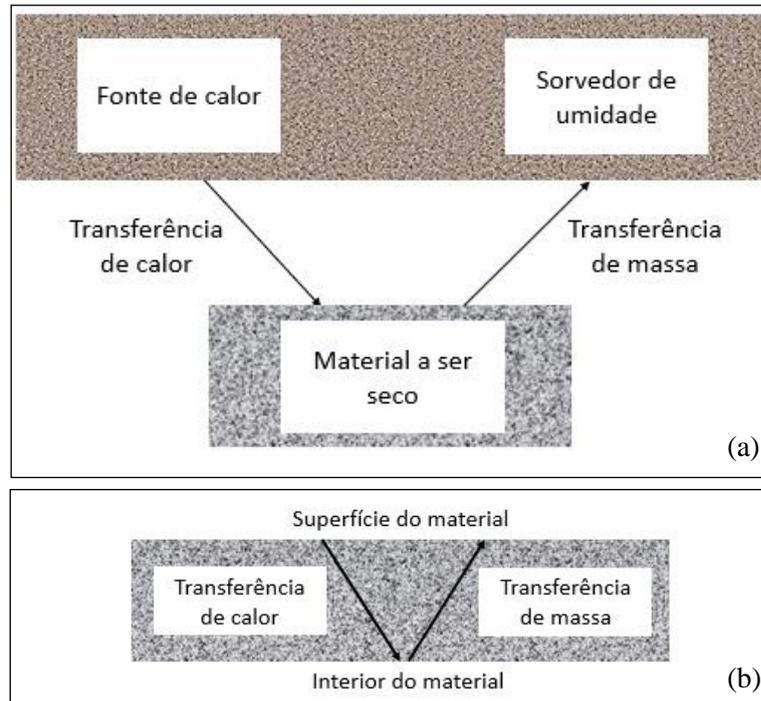
O ácido graxo oleico, presente em maior abundância no óleo das sementes de mamão, possui muitos benefícios para a saúde humana. Ele reduz os níveis de colesterol, pressão arterial, risco de aterogênese e risco de doenças cardiovasculares. Além de ter efeitos que induzem a ação anti-inflamatória, possui efeito protetor no câncer de mama e melhora a função do sistema imunológico (SENRAYAN; VENKATACHALAM, 2018).

3.2 Secagem

A secagem é uma operação que visa a remoção de substâncias voláteis, comumente água, de um sólido, pelo fornecimento de calor. O meio mais comum para transferir calor ao material é através de uma corrente de ar, responsável também pelo transporte de vapor úmido. Para a secagem de sólidos têm-se a vaporização do líquido contido no sólido, seguido da remoção da umidade pela corrente de fluido. Nesses processos, como ilustrado na Figura 3.4, ocorre a transferência de massa para remoção da umidade do sólido, no qual a água do interior do sólido é transferida principalmente por difusão para sua superfície, e o processo de transferência de calor para evaporar o líquido, sendo o vapor d'água da superfície do sólido posteriormente transferido para a corrente de ar por convecção. Devido a diferença de temperatura, o ar quente transfere calor para o sólido a ser secado e, simultaneamente, ocorre a transferência de água para o ar devido a diferença de pressão parcial de vapor d'água, existente entre o ar e a superfície do sólido (MUSSI et al., 2015).

A operação de secagem é uma etapa fundamental para a preservação e o armazenamento de alimentos. Pela redução da umidade do material e da atividade de água, essa operação aumenta a vida útil, diminui a atividade biológica, minimiza sua deterioração e facilita a extração do óleo presente no interior das sementes. Além disso, aumenta o tempo de armazenamento de sementes, de tal forma que pode-se conseguir secar sem que haja perda considerável das qualidades fisiológicas e mantém a qualidade sensorial e nutricional destas (DE BRITO et al., 2017; MALEKJANI; JAFARI, 2018). As sementes ao entrarem em contato com o ar, na secagem por ar quente, realizam trocas até que sua pressão de vapor e a temperatura tenham valores semelhantes de forma a alcançarem o equilíbrio energético, hídrico e térmico (SARAVIA; PERES; RISSO, 2007).

Figura 3.4 – Diagrama do processo de secagem.



Legenda: Diagrama da transferência de calor e massa (a) na superfície do sólido; (b) no interior do sólido.

Fonte: Adaptada de Park et al. (2014).

No entanto, se a secagem for realizada em condições inadequadas pode acarretar a perda de propriedades físico-químicas, sensoriais e nutricionais de alimentos, resultando em diminuição da qualidade do produto (MUSSI et al., 2015). A operação pode ser realizada de maneira natural ou artificial. A secagem natural é realizada expondo o material à radiação solar, já na secagem artificial, utiliza-se equipamentos para acelerar e melhorar o processo de secagem (DE BRITO et al., 2017).

Na secagem com ar quente, tem-se três fatores que podem apresentar maior interferência no tempo de exposição das sementes ao ar aquecido, e assim, nas propriedades das sementes. O primeiro deles é a temperatura do ar de secagem, seu limite é função da sensibilidade dos componentes químicos da semente. O outro fator é a velocidade do ar utilizada no processo, um aumento excessivo da velocidade pode aumentar a taxa de água removida, porém, pode causar também alterações qualitativas no produto (CARLESSO et al., 2005). E o terceiro fator que influencia o processo de secagem é a umidade relativa do ar. Ela estabelece a relação entre a quantidade de vapor d'água presente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que poderia existir na condição de saturação à mesma temperatura (ponto de saturação). A umidade relativa do ar responde de maneira inversa ao comportamento da temperatura, ou seja, uma cresce e a outra decresce e vice-versa. Dessa maneira, ao aumentar a temperatura

do ar ambiente, a sua umidade relativa diminui e, conseqüentemente, sua capacidade de absorver umidade aumenta (BEKKIOUI et al., 2009). Assim, esses parâmetros interferem diretamente na taxa de secagem, de forma a contribuir na redução ou aumento do tempo de operação.

De acordo com Park et al. (2014), a movimentação da água do interior do sólido até sua superfície, durante o processo de secagem, possui variados mecanismos de transferência de massa, são eles:

- Difusão líquida: gradiente de concentração da umidade provoca a movimentação do líquido;
- Difusão de vapor: diferença de pressão do vapor provocada pela diferença de temperatura causa o movimento da umidade por difusão de vapor;
- Escoamento capilar: força resultante da diferença de pressão hidrostática e dos efeitos da tensão superficial.

De acordo com Schmidt e Condotta (2020), a depender da taxa de difusão do líquido no interior do material sólido se comparado a taxa de evaporação da umidade para o fluido secante, a secagem pode ocorrer de três modos diferentes:

- Evaporação da camada líquida na superfície do sólido: taxa de difusão é maior que a taxa de evaporação;
- Evaporação na superfície do sólido: taxa de difusão é menor que a taxa de evaporação;
- Evaporação no interior da matriz: taxa de difusão é menor que a taxa de evaporação e seu transporte até a superfície do sólido.

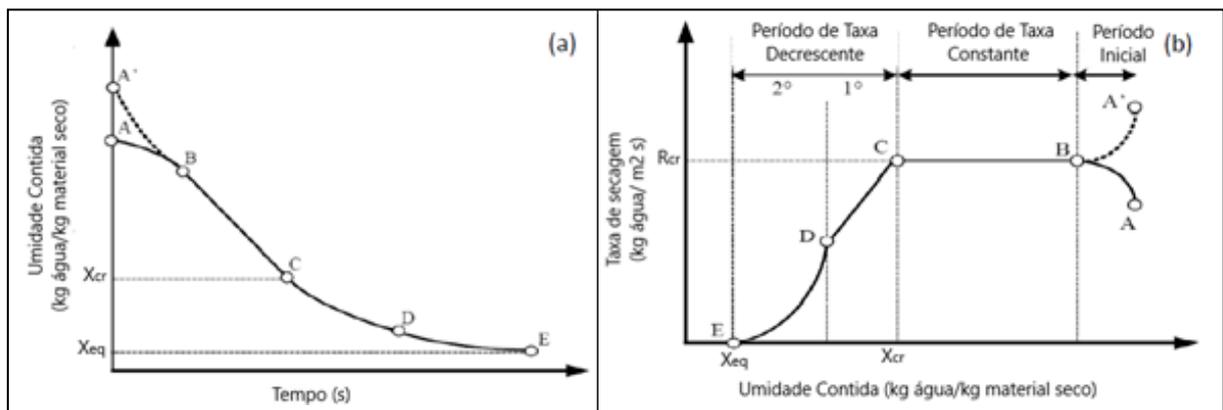
Segundo Mujumdar e Devahastin (2000), o processo de secagem possui grande complexidade devido as transferências de massa e calor ocorrerem de forma simultânea e transiente. Os autores citam que durante essa operação, pode-se ter transformações físicas e químicas no material, sendo estas responsáveis por influenciarem a transferência de massa e calor e, conseqüentemente, a taxa de secagem.

3.2.1 Curvas de secagem

A avaliação da operação de secagem é realizada via análise de curvas de secagem, conforme apresentado na Figura 3.5, em que é mostrado o comportamento típico. Estas curvas relacionam a umidade do sólido em função do tempo de operação (Figura 3.5 (a)) ou a taxa de secagem em função da umidade do sólido (Figura 3.5 (b)). No processo de secagem pode-se definir dois termos: umidade de equilíbrio (X_{eq}) e umidade crítica (X_{cr}). A umidade de

equilíbrio refere-se à quantidade de água que o sólido atinge depois de exposto à um ambiente com condições de secagem, ou seja, corresponde ao conteúdo de umidade, no qual obtém-se o equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no ambiente. Já a umidade crítica, é dependente das características do sólido a ser seco e das condições do fluido de secagem, e refere-se ao valor de umidade alcançado no momento em que a taxa de secagem passa de um valor constante para um valor decrescente (ARROTÉIA et al., 2017).

Figura 3.5 – Curvas de (a) variação da umidade em função do tempo, (b) taxa de secagem do material em função do teor de umidade.



Fonte: Foust et al. (1982 apud COSTA, 2013).

De acordo com Costa (2013), o período A-B ou A'-B representa o início da secagem (Figura 3.5 (a)). No período A-B, o sólido está a uma temperatura menor que a temperatura do fluido e ocorre o aquecimento do material. O fluido então fornece calor, o que proporciona o aumento da temperatura até a temperatura de bulbo úmido do ar, a partir da qual o líquido retirado da superfície é repostado pelo líquido do interior do sólido. O calor transferido ao produto é responsável por aumentar a pressão de vapor do sólido e sua taxa de secagem. Esse fenômeno continua a ocorrer até que a transferência de massa e calor se equilibrem. Na reta A'-B (Figura 3.5 (a)), a temperatura inicial do sólido é maior que a temperatura do fluido e ocorre o resfriamento do material. A temperatura do sólido tende a diminuir até atingir a temperatura de bulbo úmido do ar e, após, tem o mesmo comportamento de A-B.

A reta B-C (Figura 3.5 (a)) corresponde o período de taxa de secagem constante, que equivale ao coeficiente angular da reta e representa que o calor fornecido está sendo totalmente usado para evaporar a água presente na superfície do material sólido. A taxa de secagem nesse período é controlada pela transferência de calor e de massa externa. O mecanismo predominante de transferência de calor é a convecção e de transferência de massa é a difusão de vapor d'água, assim, a taxa de secagem é dependente da temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem. Além disso, nesse período a taxa de água que migra do

interior do material para sua superfície é a mesma que a taxa de evaporação da água na superfície (ALTINO, 2019; COSTA, 2013).

Quando o material atinge a umidade crítica inicia-se o período de taxa decrescente, etapa representada por C-E (Figura 3.5 (a)) que tem início a partir do ponto C. Neste período, a taxa de água que migra do interior do material para sua superfície não é a mesma que a taxa de evaporação da água na superfície. Assim, o processo passa a ser controlado pelo deslocamento da umidade no interior do material, podendo ser o período dividido em duas fases (COSTA, 2013; FOUST et al., 1980 apud ALTINO, 2019).

Na primeira fase de taxa decrescente, etapa C-D (Figura 3.5 (a)), a transferência externa de umidade ocorre mais rapidamente que a transferência interna, uma vez que o movimento da água do interior para a superfície do sólido encontra maior resistência. Como a superfície do material não se encontra mais totalmente saturada, a temperatura da superfície do sólido aumenta e a migração interna de umidade passa a controlar o processo, sendo que se predomina, no interior do sólido, o mecanismo de transferência de massa dada pela difusão de líquido devido ao gradiente de concentração ou por capilaridade resultante da diferença de pressão hidrostática provocada pela tensão superficial (ALTINO, 2019; COSTA, 2013).

Já na segunda fase de taxa decrescente, com início a partir do ponto D (Figura 3.5 (a)), a superfície do sólido encontra-se completamente seca, sendo que toda a umidade removida pela secagem é oriunda do interior do sólido. A temperatura da superfície aumenta e a taxa de secagem continua a diminuir até atingir o ponto E (Figura 3.5 (a)), que corresponde ao ponto em que a umidade de equilíbrio é atingida e a taxa de secagem tende a zero. Neste período, o mecanismo predominante de migração de umidade no interior do sólido é a difusão de vapor (COSTA, 2013; DA ROSA, 2010).

3.2.2 Secagem de sementes de mamão

Alguns trabalhos da literatura reportam a secagem de sementes de mamão por diferentes métodos. Berbert et al. (2008) realizaram a secagem das sementes à sombra até estas atingirem teor de água de 12,6% b.u. (base úmida) e, posteriormente, fizeram uma secagem complementar a 37 °C, por 5 horas, em secador de bandejas, até atingir teor de água de 7,7% b.u. Os autores avaliaram a qualidade fisiológica das sementes e constataram que o vigor das sementes inicialmente de 46% passou para 77% após os dois processos de secagem. E o percentual de germinação após o processo de secagem foi de 75%, aumentando para 87% e diminuindo para 66% após quatro e oito meses de armazenamento. Ademais, os autores concluíram que as sementes de mamão com menor teor de água possuem sua viabilidade

aumentada durante o armazenamento.

Venturini et al. (2012) realizaram a secagem das sementes em estufa de esterilização nas temperaturas de 60 e 70 °C. Os autores notaram que a temperatura exerceu influência significativa na cinética de secagem, cujo equilíbrio para as temperaturas de 60 e 70 °C foram atingidos a, respectivamente, 300 e 200 min. Além disso, eles verificaram a influência do tempo e do diâmetro da partícula para a extração do óleo de sementes de mamão, em que sementes com diâmetros menores expostas ao solvente por maior tempo apresentou maior eficácia de extração.

Carlesso (2009) realizou a secagem em um secador de leito fixo, em camada delgada, com fluxo de ar ascendente a 0,8 m/s e seis níveis de temperatura (35, 40, 45, 50, 55 e 60 °C), até teor de água final de aproximadamente 7% (b.u.) de sementes híbridas (sementes de mamão da geração F2 do híbrido UENF-CALIMAN 01 e da cultivar Golden). O autor avaliou a qualidade fisiológica das sementes antes, após a secagem e com 3, 6, 9 e 12 meses de armazenamento. Em relação ao vigor das sementes, a temperatura de 55 °C foi a única que apresentou efeito imediato positivo, independente do teor de água inicial. E após três e nove meses de armazenamento, esse resultado se repetiu. Além disso, o autor observou que a redução do teor de água inicial não influenciou no vigor das sementes secas a 35, 40, 45 e 50 °C. Em relação a germinação, as sementes apresentaram valores baixos até 9 meses de armazenamento, no entanto, após 12 meses, as sementes secas a 45 °C voltaram a apresentar melhores porcentagens de germinação. Ademais, o autor constatou que o período de armazenamento das sementes não influenciou na germinação das sementes.

Já Lopes e Souza (2008) realizaram a secagem pelo método de estufa a 105 ± 3 °C por 24 h, atingindo um teor de água de 11,5% (b.u.). Os autores constataram que a secagem das sementes após o condicionamento osmótico (água destilada e soluções de polietileno glicol) ocasionou redução na qualidade fisiológica das sementes de mamão. Tome e Augustinha (2018) secaram as sementes em estufa com circulação de ar em três diferentes temperaturas: 40, 50 e 60 °C. O tempo de secagem foi determinado avaliando a umidade das amostras, entre 10 e 15%. Esses autores observaram que a temperatura da secagem influenciou na degradação da vitamina C, em que para a secagem a 60 °C houve degradação muito maior da vitamina C em relação a secagem a temperatura de 40 °C.

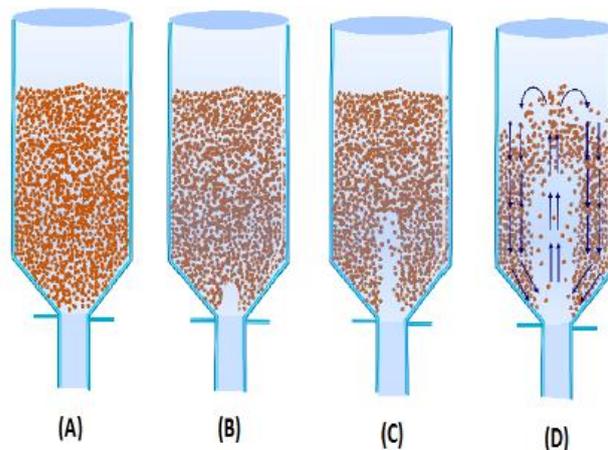
Além dos secadores citados acima, tem-se também o leito de jorro, que será abordado adiante, trata-se de um secador convectivo amplamente utilizado devido ao seu alto grau de mistura e às altas taxas de circulação e de transferência de massa e calor (DE BRITO et al., 2017). Na operação destes equipamentos, utiliza-se normalmente temperatura do ar em torno

de 40 a 80 °C, velocidade do ar de 0,5 a 5 m/s e o tempo de secagem depende destes e de outros parâmetros, conforme as características do material, podendo chegar a até 20 h em alguns casos (AVERSA et al., 2007).

3.3 Leito de jorro

O sistema de leito de jorro foi desenvolvido em 1955 por Mathur e Gishler (1955) no Canadá quando os pesquisadores estudavam a secagem de grãos de trigo. Após o rompimento acidental da placa de distribuição de ar do leito fluidizado, eles notaram que as partículas submetidas a maiores vazões de ar apresentavam um movimento cíclico sendo possível executar certas operações que não eram realizadas em leito fluidizado devido ao movimento das partículas neste tipo de equipamento ser aleatório. Surgiu assim, o leito de jorro, representado na Figura 3.6, considerado uma versão modificada do leito fluidizado devido a sua circulação característica, menor queda de pressão e melhor contato entre as fases (TELLABIDE et al., 2020).

Figura 3.6 – Representação do leito de jorro.



Legenda: (A) Leito Fixo (B) Formação de uma pequena cavidade (C) desenvolvimento do jorro interno (D) jorro externo.

Fonte: Adaptado de Do Nascimento (2014).

O equipamento denominado leito de jorro é constituído por uma base cônica, por onde o fluido é injetado, e uma parte cilíndrica, um vaso no qual são colocadas as partículas sólidas. Com a injeção do fluido ocorre a formação de caminhos preferenciais da passagem de ar na região central do leito e as partículas são suspensas até que se forma o jorro, uma cavidade no centro do leito de sólidos. Essa região possui baixa concentração de sólidos que são arrastados pelo fluido até atingirem o topo do leito, onde atingem velocidade igual a zero, caem e retornam para a parte inferior do leito, originando-se um movimento cíclico, como

demonstrado na Figura 3.6.

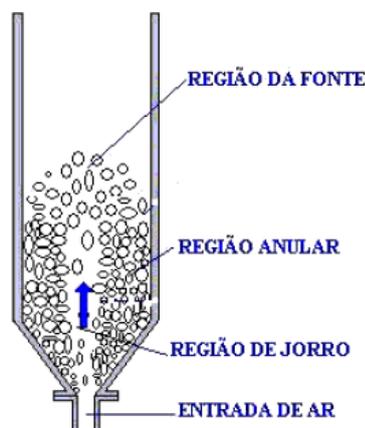
Em estudos da literatura com secagem de grãos em leito de jorro, o equipamento apresentou a vantagem de manter as propriedades do material mesmo utilizando temperaturas acima das convencionais. Além disso, o equipamento também mostrou-se eficaz na secagem de grãos operando com baixas temperaturas de ar, característica que torna a técnica promissora para o aquecimento e tratamento de produtos alimentares termosensíveis, como por exemplo, as sementes (DE BRITO et al., 2017; SAHIN; SUMNU; TUNABOYU, 2013).

Ademais, a operação de secagem no leito de jorro pode ser otimizada através de estudos de condições operacionais que aumentem o contato entre as fases no sistema. O conhecimento da dinâmica dos fluidos no interior do leito é indispensável para auxiliar na compreensão da eficiência do processo de secagem (SOUZA; FREIRE; BÉTTEGA, 2018). A obtenção de parâmetros operacionais do equipamento é importante para determinação da vazão de fluido mínima necessária para que ocorra o escoamento no leito, a potência máxima a ser utilizada pelo soprador durante a operação e a potência consumida durante o processo (DO NASCIMENTO et al., 2015).

3.3.1 Regiões características do leito de jorro

A depender da vazão de injeção de fluido na parte inferior do leito de jorro, tem-se a formação de diferentes regiões de contato fluido/partícula, cada uma com padrões característicos, sendo as regiões principais denominadas jorro, anular e fonte, conforme apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Regiões características do leito de jorro.



Fonte: Santos et al. (2009).

Na região de jorro, também denominada região central ou canal preferencial, ocorre o

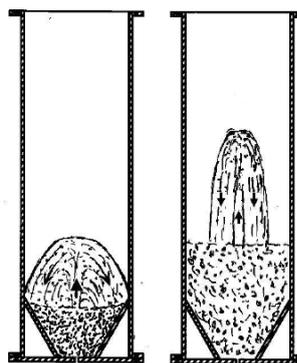
movimento ascendente das partículas devido ao arraste causado pelo fluido. Esta região é caracterizada por apresentar uma elevada porosidade e nela, o fluido e as partículas sofrem movimento a alta velocidade, tornando baixa a concentração de partículas (VIEIRA NETO et al., 2008).

A região anular, também denominada região deslizante é caracterizada por apresentar baixa porosidade. É a região na qual as partículas escoam de forma contracorrente ao fluxo de ar, isto é, formando um leito deslizante que se move para baixo enquanto são percoladas pelo fluxo de ar ascendente. Essa configuração garante o contato partícula-fluido, promovendo altos coeficientes de troca de calor e massa, e, conseqüentemente, uma secagem eficiente (VIEIRA NETO et al., 2008).

Já a região de fonte é a região acima do leito na qual as partículas desaceleram e após atingirem uma determinada altura, se espalham radialmente para a região anular, localizada entre o jorro e a parede do equipamento (VIEIRA NETO et al., 2008). A região da fonte pode apresentar bico diluído ou concentrado de acordo com a altura do leito estático (CHEN, 2008).

Segundo Chen (2008), Júnior, Duarte e Santos (2015), conforme aumenta-se a altura do leito estático, ocorre a passagem de bico diluído para concentrado, com o aumento de partículas na região. A Figura 3.8 ilustra a diferença entre os dois tipos de bico na região da fonte.

Figura 3.8 – Diferentes formas de bico da região da fonte.



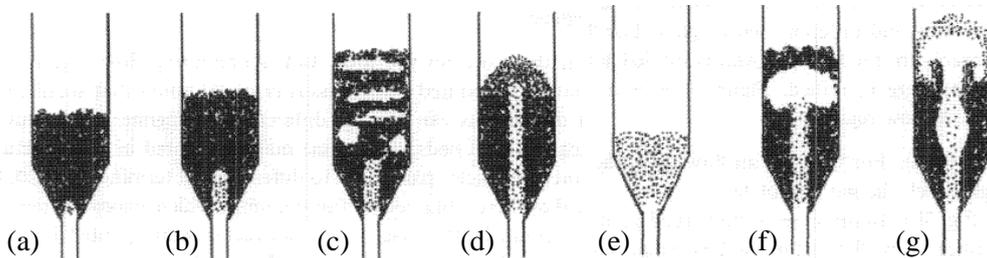
Legenda: (a) Bico diluído; (b) Bico concentrado.
Fonte: Adaptado de Chen (2008).

3.3.2 Regimes de escoamento

De acordo com a velocidade de entrada de ar na base do equipamento, tem-se a formação de diferentes regimes de escoamento no leito, conforme apresentado pela Figura

3.9.

Figura 3.9 – Transição dos regimes devido ao aumento do fluxo de gás.



Legenda: (a) Leito fixo; (b) Jato Interno; (c) Leito fluidizado; (d) Jorro; (e) Jorro em fase diluída; (f) Regime borbulhante; (g) Jorro inconsistente.

Fonte: Adaptado de Dogan et al. (2000).

Dogan et al. (2000) em seu trabalho, identificaram os seguintes regimes:

- Leito Fixo: observado em vazões de ar baixas em que o fluido percola apenas por entre as partículas;
- Jato Interno: nesse regime, forma-se uma cavidade acima da abertura de entrada, enquanto o restante do leito permanece como um leito fixo;
- Leito Fluidizado: após a formação do jato interno, um aumento na vazão de fluido leva a fluidização na parte superior do leito;
- Jorro: nesse regime de escoamento, partículas são transportadas pneumáticamente para cima, em movimento concorrente, através do centro do leito, conhecido como jorro central, onde após atingirem um ápice, descem em contracorrente ao fluxo de fluido até atingir a base do leito, para posteriormente, retornarem ao jorro central, gerando um movimento cíclico;
- Jorro em Fase diluída: esse regime é reconhecido visualmente quando a região anular tem a mesma concentração de partícula que o jorro central;
- Regime borbulhante (*slugging*): esse regime, surge no leito de jorro para situações em que a altura estática do material no leito encontra-se acima da altura máxima de jorro estável. Quando isso ocorre, há formação de bolhas de ar no leito, e estas aumentam de tamanho conforme vão ascendendo através do leito. As partículas localizadas acima das bolhas são empurradas para cima, como um pistão. Outras partículas caem e escoam ao redor das bolhas, formando assim um movimento oscilatório instável e repetido. Segundo Tellabide et al. (2020), esse fenômeno é considerado como o principal causador de instabilidade do leito de jorro, pois altera o movimento uniforme e cíclico das partículas, característico do leito de jorro, resultando em um regime altamente instável e irregular.

- **Jorro Inconsistente:** esse regime é observado quando se utilizam grande vazões de fluido e alturas intermediárias de leito. Segundo Lourenço (2006), esse regime é caracterizado por uma grande pulsação de partículas na altura da região da fonte.

O regime de escoamento é considerado estável quando a razão entre o diâmetro de entrada do fluido e o diâmetro das partículas é menor que 20-30 vezes o diâmetro das partículas. Valores de razão acima dessa faixa geram regimes altamente instáveis, tanto para partículas grossas quanto finas (TELLABIDE et al., 2020).

3.3.3 Tipos de leito de jorro

O leito de jorro pode ser de diferentes tipos, de acordo com sua geometria e característica, como descrito a seguir:

- **Leito de jorro cônico:** sua principal característica é a ausência da região cilíndrica. Esse tipo de leito permite maior capacidade de carga na alimentação se comparado ao leito de jorro convencional, ou seja, para uma mesma altura do leito é possível alimentar uma carga inicial maior do que aquela comparada com um leito convencional (LOURENÇO, 2006).

- **Leito de jorro com tubo interno (tubo *draft*):** há a inserção de um tubo na parte cilíndrica do leito. O tubo direciona o ar na região de jorro central do leito, possibilitando uma redução na queda de pressão máxima, além do aumento do tempo de residência das partículas e homogeneização da circulação. Porém, possui como desvantagem a diminuição das taxas de transferência de calor e massa nessa região, podendo prejudicar a eficiência da secagem (LOURENÇO, 2006).

- **Leito de jorro aerado:** há na parte cônica do leito uma vazão auxiliar de ar que causa aumento da porosidade nessa região, e conseqüentemente, um aumento das taxas de transferência de calor e massa (SANTANA, 2011).

- **Leito de seção retangular:** equipamento muito utilizado para o estudo da influência do ângulo da base, por exemplo, no processo de recobrimento. O leito é composto por uma seção retangular com base de tronco de pirâmide (SANTANA, 2011).

- **Leito vibro-jorado:** um sistema mecânico de vibração na base do leito aumenta a agitação das partículas (SANTANA, 2011).

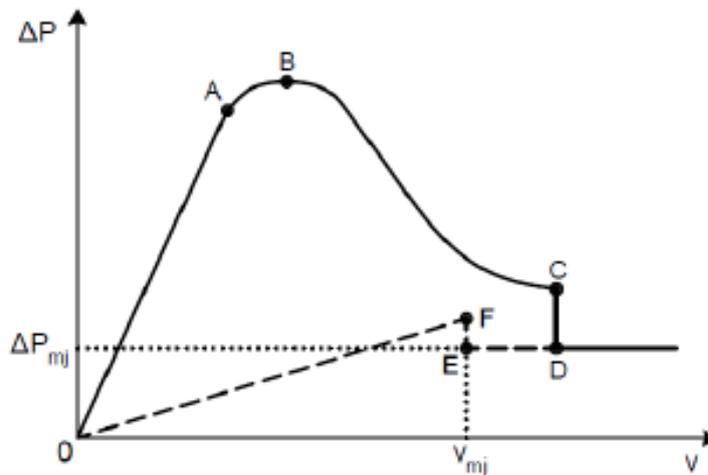
3.3.4 Fluidodinâmica do Leito de jorro

O conhecimento da dinâmica das fases no interior do leito de jorro é indispensável para auxiliar na compreensão da eficiência do processo de secagem (SOUZA; FREIRE; BÉTTEGA, 2018). Do ponto de vista da fluidodinâmica, têm-se como principais parâmetros relacionados ao projeto de leito de jorro: velocidade de jorro mínimo, queda de pressão máxima, queda de pressão mínima e altura máxima de jorro estável. Para uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na operação, é viável conhecer as distribuições de velocidade do fluido, porosidade do leito e dimensões das regiões do leito de jorro.

3.3.4.1 Curva característica

A curva característica do leito de jorro (Figura 3.10) trata-se de um gráfico de queda de pressão em função da velocidade do fluido que representa o comportamento fluidodinâmico do leito. Fisicamente, ela representa a transição entre um leito estático e um leito de jorro estabelecido. Essa curva é essencial para determinação de parâmetros fluidodinâmicos importantes como a velocidade de jorro mínimo, a queda de pressão de jorro mínimo e a queda de pressão máxima (BARCELOS, 2016).

Figura 3.10 – Curva característica do leito de jorro.



Fonte: Barcelos (2016).

De acordo com Mathur e Epstein (1974):

- O segmento O-A representa o aumento linear da queda de pressão com o aumento da velocidade de fluido, representando um leito estático ou fixo. Nesse segmento, o ar passa pelo leito apenas percolando os espaços vazios em seu interior, sem perturbar o arranjo de partículas;
- O segmento A-B representa o crescimento da queda de pressão com o aumento

da velocidade do ar com um comportamento não linear. Nesse segmento, a velocidade do ar já é alta o suficiente para empurrar as partículas que se encontram próximas ao bocal de injeção e formar assim, uma cavidade no leito acima da entrada de ar (CUNHA, 2008). As partículas que rodeiam essa cavidade ficam comprimidas, formam um arco compactado, que provoca a diminuição da porosidade e oferece uma grande resistência ao escoamento do fluido, por isso a pressão total através do leito continua a aumentar (DUARTE, 2006). O aumento da velocidade do ar faz com que a cavidade se alongue para um jorro interno, de forma que a queda de pressão no leito aumenta até o seu valor máximo representado pelo ponto B.

- O segmento B-C representa a diminuição da pressão à medida que a velocidade aumenta, isso é devido a uma menor resistência que o leito oferece ao escoamento do fluido no interior da coluna, uma vez que a altura da cavidade interna se torna grande em comparação ao leito empacotado acima dela;

- O ponto C, denominado de jorro incipiente, é o ponto onde ocorre uma expansão do leito, as partículas são deslocadas do núcleo central e o jorro interno rompe a superfície do leito. Nesse momento, a concentração de sólidos na região acima do jorro interno diminui abruptamente causando uma diminuição drástica da queda de pressão até o ponto D;

- O ponto D representa o momento em que o leito todo se torna móvel e o jorro contínuo é estabelecido. A partir do ponto D, o aumento da velocidade de fluido não causa mudanças na queda de pressão, pois, o ar injetado passa pela coluna por caminhos na região do jorro que oferecem uma menor resistência ao escoamento, tornando a fonte mais alta sem qualquer efeito significativo na queda de pressão total. Logo a queda de pressão além do ponto D se mantém constante. Segundo Cunha (2008), a partir desse ponto, o regime de jorro é estável, caracterizado pelo desenvolvimento da fonte e pela circulação de partículas de maneira uniforme.

- O ponto E representa a queda de pressão de jorro mínimo e a velocidade mínima de jorro. Após isso, com uma redução da velocidade do fluido, para um valor menor em relação ao ponto E, tem-se um colapso do jorro e um aumento repentino da queda de pressão para o ponto F. Se a velocidade continuar sendo diminuída, a pressão decresce continuamente, representando o segmento F-O. Cunha (2008) afirma que neste segmento, a energia solicitada pelo fluido para penetrar nos sólidos não é mais despendida durante o colapso do jorro.

De acordo com Mathur e Epstein (1974), a velocidade de jorro incipiente e o início do

gorro dependem da compactação inicial das partículas no leito, uma vez que a porosidade *bulk* influencia diretamente na passagem de ar. Portanto, não se consegue reproduzir as condições iniciais do leito durante o processo crescente de velocidade. Segundo Barcelos (2016), a linha sólida da Figura 3.10 é chamada de curva de ida e é obtida pelo aumento gradativo da velocidade do fluido, enquanto a linha pontilhada é chamada de curva de volta, devido ao fato de ser obtida por um processo inverso ao anterior. A histerese ocorre, pois, no processo de redução da velocidade do ar não é necessária uma energia mecânica alta para romper o gorro, como ocorre na operação inversa.

3.3.4.2 Queda de pressão máxima e queda de pressão de gorro estável

Existem dois pontos importantes na curva característica do leito de gorro (Figura 3.10) que são, a queda de pressão máxima, representada pelo ponto B, alcançada ao começar a formação do gorro, e a queda de pressão no gorro estabelecido, ou seja, a queda de pressão de gorro mínima, representada pelo ponto D, valor este que determina a exigência das condições de operação e representa um valor constante. O valor da queda de pressão máxima representa a energia necessária para o fluido romper a estrutura do leito compacto, e formar assim, o gorro interno (CUNHA, 2008).

Segundo Dogan et al. (2000), a queda de pressão máxima aumenta com a altura do leito e quase não se percebe a influência da abertura de entrada de fluido na base sobre esta. Além disso, a queda de pressão máxima varia com o diâmetro e a densidade das partículas. Esses pesquisadores correlacionaram a queda de pressão de gorro estável com a abertura de entrada do fluido para quatro alturas de leito diferentes e dois tipos de partículas com diferentes diâmetros. Para as partículas de diâmetro menor foi observado um aumento no valor da queda de pressão com o aumento da abertura de entrada de fluido. Além disso, com o aumento da altura do leito, a queda de pressão aumentou, independentemente do tamanho das partículas.

3.3.4.3 Velocidade mínima de gorro

A manutenção do gorro, principal condição operacional no projeto de um leito de gorro, depende principalmente da velocidade do fluido. A velocidade de leito de gorro mínima representa a menor velocidade na qual o gorro ainda existe a uma pressão constante, e é obtida pelo decréscimo de velocidade do fluido até o ponto de colapso do gorro. A velocidade do fluido é responsável pela troca térmica durante a secagem e seu valor ideal é aquele próximo à velocidade de gorro mínimo (CUNHA, 2008)

O conhecimento da velocidade mínima de jorro é importante para a determinação de outros parâmetros como tempo de residência e movimento de sólidos no interior do leito (TELLABIDE et al., 2020). A velocidade mínima de jorro depende das propriedades do sólido e do fluido, além da geometria do leito. Ademais, a queda de pressão do jorro mínimo e a velocidade mínima de jorro são parâmetros importantes para se determinar a potência de operação do leito de jorro, representando os valores necessários para que o jorro contínuo seja estabelecido (CUNHA, 2008).

Segundo Cunha (2008), a velocidade mínima de jorro aumenta com o aumento da altura do leito de sólidos e com a diminuição do diâmetro da coluna. Os resultados do trabalho de Dogan et al. (2000) indicam que a velocidade mínima de jorro é proporcional a raiz quadrada da altura do leito para leitos fundos e aproximadamente proporcional à altura do leito para leitos rasos.

3.3.4.4 Altura máxima do leito

A condição de jorro ocorre em uma faixa definida de velocidade e existe uma altura máxima do leito, acima da qual o jorro não ocorre, sendo substituída por uma fluidização de baixa qualidade. Para a obtenção de um leito de jorro estável é importante a determinação da altura máxima do leito, que está relacionada à parâmetros como a geometria do vaso, parâmetros do fluido e do sólido, como densidade, pressão, temperatura, entre outros e representa a quantidade de material particulado que pode ser processada no leito de jorro (LOURENÇO, 2006; NIKSIAR; SOHRABI; RAHIMI, 2013).

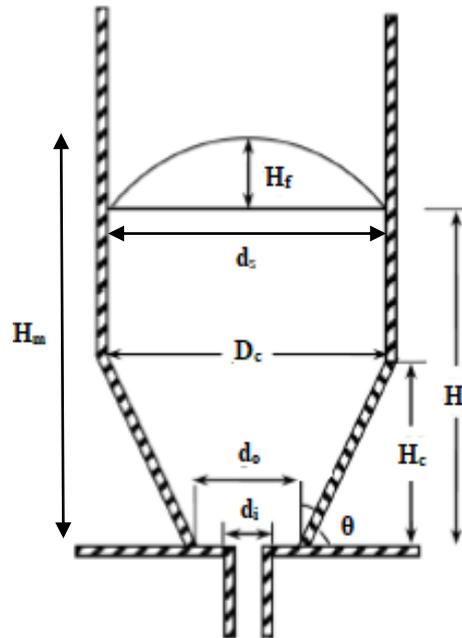
3.3.4.5 Previsão de parâmetros fluidodinâmicos

Uma etapa muito importante no estudo do leito de jorro é a estimativa precisa dos parâmetros fluidodinâmicos. Devido à dificuldade de realizar medidas experimentais para obtenção desses parâmetros sem perturbar o sistema, têm-se utilizado correlações empíricas, encontradas na literatura, que fornecem estimativas satisfatórias. Alguns trabalhos demonstram que essa abordagem tem-se mostrado útil para predição de parâmetros fluidodinâmicos com baixa diferença percentual quando comparado às medidas experimentais (DO NASCIMENTO, 2014; NIKSIAR; SOHRABI; RAHIMI, 2013; SANTANA et al., 2017).

Niksiar, Sohrabi e Rahimi (2013) realizaram um estudo da confiabilidade de correlações empíricas para determinação de parâmetros fluidodinâmicos em leito de jorro tais

como: diâmetro de bico (d_s), altura máxima de jorro ($H_m(H+H_f)$) e velocidade mínima de jorro (U_{ms}). Para isso, os autores consideraram os fatores geométricos do leito de jorro ilustrados na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Representação dos fatores geométricos em um leito de jorro.



Legenda: H_f é a altura da fonte (m), H_m é a altura máxima de jorro (m), D_c é o diâmetro da parte cilíndrica (m), d_o é o diâmetro da base menor da seção tronco de cone (m), d_i é o diâmetro do orifício de entrada (m), d_s é o diâmetro de bico (m), H_c é a altura da parte cônica (m), H é a altura de leito estático(m) e θ é a angulação do cone ($^\circ$ ou rad).

Fonte: Adaptado de Niksiar, Sohrabi e Rahimi (2013).

Em seu estudo, Niksiar, Sohrabi e Rahimi (2013), fizeram o levantamento abrangente de correlações existentes na literatura e concluíram que algumas dessas correlações apresentam desvios baixos e aceitáveis. Em relação ao diâmetro de bico, a Tabela 3.3 ilustra duas correlações, que apresentam erros médios de 0,78 e 0,26%, respectivamente.

Tabela 3.3 – Correlações para obtenção do diâmetro de bico.

Trabalho	Correlação
Malek, Madonna e Lu (1963)	$d_s = (0,0793 \log D_c + 0,105) G^{0,5}$
McNab (1972) apud Niksiar, Sohrabi e Rahimi (2013)	$d_s = 2,0 G^{0,49} D_c^{0,68} / \rho_b^{0,41}$

Legenda: G é o fluxo de massa de jato de ar por unidade de área transversal da coluna vazia ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$), ρ_b é a densidade aparente de sólidos em condição de empacotamento.

Fonte: Adaptado de Niksiar, Sohrabi e Rahimi (2013).

Em relação à predição da altura máxima de jorro, Niksiar, Sohrabi e Rahimi (2013) concluíram que as correlações, apresentadas na Tabela 3.4, são as mais apropriadas, sendo a equação dada por Çeçen (1994) a que apresentou o menor erro para colunas com diâmetro de 80 a 152,4 mm e partículas com diâmetro entre 0,3 e 1,3 mm.

Tabela 3.4 – Correlações para obtenção da altura máxima de jorro.

Trabalho	Correlação	Recomendação
Malek e Lu (1965)	$H_m / D_c = 418(D_c / d_p)^{0,75} (D_c / d_i)^{0,4} (\rho_p)^{-1,2} \Phi^{-2}$	$0,01 < d_p / D_c < 0,02$
Littman et al. (1977)	$H_m d_s / (D_c^2 - d_s^2) = 0,345(d_s / D_c)^{-0,384}$	$d_p / D_c > 0,025$ $d_i / D_c \approx 0,254$ ou $d_p / D_c < 0,025$ $d_i / D_c < 0,125$
Morgan e Littman (1982)	$H_m d_i / D_c^2 = 0,218 + 5,13 \frac{10^{-3}}{A} + 2,54 \frac{10^{-5}}{A^2}$	$A > 0,014$ $d_p / D_c > 0,025$ $d_p > 1,5mm$
Morgan e Littman (1982)	$H_m d_i / D_c^2 = 175(A - 0,01)$	$0,10 < A < 0,014$ $d_p / D_c > 0,025$ $d_p > 1,5mm$
McNab e Bridgwater (1977) apud Niksiar, Sohrabi e Rahimi (2013)	$H_m / D_c = (D_c / d_p)(D_c d_i)^{2/3} (700 / Ar) \times \left[\sqrt{1 + 35,9 \times 10^{-6} Ar} - 1 \right]^2$	$d_p / D_c > 0,04$ $d_i / D_c > 0,127$
Çeçen (1994)	$H_m / D_c = 0,99(Ad_i / D_c)^{-0,144}$	$0,5 \leq d_p < 1,5mm$
Çeçen (1994)	$H_m / D_c = 24,60(Ad_i / D_c)^{0,259}$	$d_p \leq 0,5mm$

Legenda: d_p é o diâmetro da partícula (m), ρ_p é a densidade da partícula (kg/m³), g é a aceleração da gravidade (m/s²), Φ é a esfericidade da partícula, A é a área e Ar é o número de Arquimedes

sendo ambos dados pelas relações $A = \frac{U_{mf} U_T \rho_g}{(\rho_p - \rho_g) \rho_g g d_i}$ e $Ar = \frac{d_p^3 (\rho_p - \rho_g) \rho_g g}{\mu^2}$ em que U_T é a velocidade terminal da partícula e μ é a viscosidade do fluido (kg/m s).

Fonte: Adaptado de Niksiar, Sohrabi e Rahimi (2013).

Já em relação a velocidade mínima de jorro, de acordo com o que foi verificado na literatura, são apresentadas na Tabela 3.5 as duas correlações que apresentaram um erro menor, de respectivamente, 2,8 e 3,2%:

Tabela 3.5 – Correlações para obtenção da velocidade mínima de jorro.

Trabalho	Correlação
Grbavcic et al. (1976)	$U_{ms} / U_{mf} - (d_i / D_c)^2 = [1 - (d_i / D_c)^2] \times [1 - (1 - H / H_m)^3]$
Mathur e Gishler (1955)	$U_{ms} = (d_p / D_c)(d_i / D_c)^{1/3} \sqrt{2gH(\rho_p - \rho_g) / \rho_g}$

Legenda: U_{mf} é a velocidade mínima de fluidização superficial (m/s) e ρ_g é a densidade do fluido (kg/m^3).

Fonte: Adaptado de Niksiar, Sohrabi e Rahimi (2013).

Existem na literatura estudos que foram realizados com o intuito de modificar as equações anteriores, e assim, melhorar a previsão dos parâmetros, principalmente a equação proposta por Mathur e Gishler (1955) para predição da velocidade mínima de jorro. No entanto, segundo Niksiar, Sohrabi e Rahimi (2013), a equação de Mathur e Gishler (1955) (Tabela 3.4) apresenta melhores resultados quando comparada com resultados obtidos a partir de outras equações propostas até então.

3.3.5 Aplicações do leito de jorro

O leito de jorro é considerado um excelente sistema de contato fluido-sólido, e desde seu desenvolvimento, em 1955, vêm ganhando várias aplicações. Desde então, são encontrados na literatura vários trabalhos que abordam as aplicações do leito de jorro no que se refere à secagem de partículas de grande interesse para indústrias farmacêuticas, alimentícias e agrícolas. Existem estudos sobre aplicação do leito de jorro na secagem de sementes (CHIELLE et al., 2016; SANTOS et al., 2018), alimentos em geral (ARROTÉIA et al., 2017) e polpas (SOARES; PEREIRA, 2020; SOUSA et al., 2019). Entre outras aplicações do leito de jorro está o recobrimento de partículas (OLIVEIRA et al., 2019; PESHEV et al., 2020; ROCHA et al., 2018), operações como a extração de corante (BARROZO; SANTOS; CUNHA, 2013) e processos de pirólise (FERNANDEZ-AKARREGI et al., 2013; LOPEZ et al., 2019).

Jayatunga e Amarasinghe (2019) estudaram a cinética de secagem da pimenta preta em leito de jorro, além de realizarem a extração e a análise do óleo da pimenta preta seca. Os autores encontraram que a velocidade mínima de jorro das partículas de pimenta preta aumentou com o aumento da altura estática do leito. Além disso, a operação do leito jorrado na velocidade do ar, logo acima da velocidade mínima de jorro, foi considerada a operação com maior economia de energia se comparada às demais velocidades estudadas. Uma vez que o consumo de energia aumenta com o aumento da velocidade do ar devido ao aumento da

energia necessária para aquecer o ar ambiente até a temperatura de secagem e a perda de energia com o ar de exaustão saindo do secador. Os maiores valores de taxa de secagem foram encontrados trabalhando com temperaturas altas, altas taxas de fluxo de ar e leito de partículas rasos, uma vez que se tem difusividade de umidade efetiva com o aumento da temperatura de secagem. Ademais, o rendimento de óleo mostrou uma variação expressiva com a temperatura de secagem para temperaturas de 45 a 75 °C, sendo 65 °C considerada como a melhor temperatura de secagem para a pimenta preta no leito de jorro.

Almeida et al. (2020) realizaram, em leito de jorro, a secagem de batata doce, matéria-prima para obtenção de álcool, amido, pães, doces, farinhas, entre outros. O objetivo do trabalho foi obter farinha da batata-doce através do processo de secagem por atomização em leito de jorro e avaliar o efeito da temperatura sobre suas propriedades físico-químicas. Variou-se a temperatura em 60, 70 e 80 °C para uma vazão de ar de 3 m³/min e os parâmetros estudados foram: sólidos totais, atividade de água, cinzas por incineração em mufla, teor de proteína total, pH, acidez, sólidos totais, lipídeos e teor de carboidratos. A secagem possibilitou a redução no teor de umidade e atividade de água, garantindo uma maior vida de prateleira do produto e para a temperatura de 80 °C foi obtido o maior valor de sólidos totais e carboidratos, evidenciando o potencial do produto em pó.

Bortolotti et al. (2013) realizaram um estudo fluidodinâmico da secagem de resíduos de acerola e realizaram a caracterização do material através da obtenção do tamanho da partícula, densidade aparente e esfericidade do material. No entanto, devido à baixa fluidez desse resíduo no leito de jorro, fez-se o uso de grãos de soja como um material auxiliar para manter a estabilidade da dinâmica do fluido. Foram realizados testes com uma mistura de resíduos de acerola e grãos de soja em leito de jorro operando com diferentes frações de massa de resíduo e diferentes alturas de leito estático. Os autores constataram que a fração da massa da acerola possui maior influência na queda de pressão do que a altura do leito estático e que a queda de pressão cai diretamente em resposta ao aumento da fração da massa do resíduo de acerola.

Mussi et al. (2015) analisaram o efeito da temperatura (70 – 80 °C) e velocidade do ar (8 - 9 m/s) na cinética de secagem de resíduo de jambolão em leito de jorro e as consequentes alterações na atividade antioxidante, antocianinas (compostos responsáveis pelo pigmento arroxeadado do jambolão) e minerais nos produtos secos. Os autores realizaram caracterização do material por meio da obtenção de umidade, atividade de água, pH, acidez total, sólidos solúveis totais, além da determinação de K, Ca, P, Zn, Mg, Mn, Cu, Fe e atividade antioxidante. Somente a temperatura do ar influenciou significativamente a cinética de

secagem, a velocidade do ar contribui ligeiramente na aceleração da transferência de massa na cinética de secagem. A temperatura apresentou um efeito negativo na degradação das antocianinas. Esse resultado mostrou a necessidade de realizar novos estudos para a utilização do resíduo de jambolão como corante na indústria alimentícia. Além disso, os autores concluíram que apesar da redução do teor de antocianinas, as amostras secas mantiveram a capacidade antioxidante independente dos valores das variáveis do processo.

Arrotéia et al. (2017) estudaram a cinética de secagem de linhaça tanto em leito fluidizado quanto em leito de jorro, para temperaturas de operação de 30, 40, 50 e 60 °C. E realizaram a caracterização do material por meio da determinação da área superficial, volume, esfericidade, porosidade e umidade. Além disso, determinaram os parâmetros fluidodinâmicos como velocidade mínima de fluidização de 1,475 m/s e velocidade mínima de jorro de 3,318 m/s, entre outros. Em um mesmo tempo de operação de secagem realizado em ambos os leitos, o leito de jorro apresentou melhor eficiência e a secagem realizada na temperatura de 60 °C apresentou um menor gasto de energia e tempo. A taxa de secagem também apresentou resultados satisfatórios, sendo maior em temperaturas mais altas, uma vez que maiores temperaturas fornecem mais calor para o processo.

Santana (2011) realizou a secagem de linhaça em leito de jorro, em que esse material foi caracterizado como pertencentes ao grupo D, segundo Geldart. A cinética de secagem dessas sementes foi obtida variando a temperatura em 45, 55 e 65 °C. O autor observou que a carga de sementes e a temperatura exerceram influência de maneira significativa nos parâmetros fluidodinâmicos em leito de jorro. Observou-se que a porosidade e expansão do leito de sementes se reduzem com o aumento da carga de sementes. E a carga de sementes exerceu influência sobre a queda de pressão e sobre a velocidade de mínimo jorro. O autor ainda notou que a temperatura se mostrou influente na queda de pressão de jorro mínimo. Além disso, notou-se que a temperatura do fluido e o tempo de operação exerceram influência significativa na umidade, germinação e índice de germinação.

Santana et al. (2017) também compararam o comportamento fluidodinâmico de sementes de linhaça em leito fluidizado e em leito de jorro. Para o leito de jorro foram estimados a velocidade de jorro mínimo, queda de pressão máxima e queda de pressão no mínimo jorro. Estes parâmetros foram obtidos experimentalmente e comparados com valores obtidos a partir de correlações da literatura, sendo observados baixos desvios percentuais entre os valores. Além disso, notou-se uma influência da fluidodinâmica sobre a qualidade fisiológica das sementes através dos testes de germinação e do índice de velocidade de germinação.

Do Nascimento et al. (2015) avaliaram o comportamento fluidodinâmico de sementes de milho em leito de jorro cônico. Foram descritos aspectos físico-químicos e de qualidade das sementes e foram determinados parâmetros fluidodinâmicos de jorro (velocidade mínima de jorro, estabilidade e queda de pressão). Os parâmetros fluidodinâmicos de jorro foram comparados com valores obtidos por correlações empíricas disponíveis na literatura apresentando diferenças percentuais aceitáveis. Além disso, os autores classificaram as sementes como pertencentes ao grupo particulado D e verificaram que as sementes apresentaram boa dinâmica em leito de jorro, mostrando que são adequadas para o processamento nesse equipamento.

Chielle et al. (2016) realizaram a secagem de sementes de mamão em leito de jorro e, posteriormente, a extração do óleo das sementes. Os autores realizaram caracterização das sementes de mamão por meio da obtenção do diâmetro médio de Sauter, esfericidade, densidade aparente e umidade. Foi estudado o efeito da variação de parâmetros (tempo de operação, velocidade e temperatura do fluido) no processo de secagem. Os autores realizaram os experimentos variando a temperatura do ar de secagem em 40; 52,1; 70; 87,9 e 100 °C, as vazões de ar em 9,24; 9,75; 10,5; 11,25 e 11,75 m/s e tempo de operação de 0,5; 1,21; 2,25; 3,29 e 4 h. A temperatura proporcionou maior aumento do potencial do ar de secagem de absorver umidade, de maneira que permitisse que o ar armazenasse maior quantidade de vapor. Já para a velocidade, quanto maior a velocidade do ar, melhor o contato entre as sementes e o fluido, de forma a favorecer o fenômeno de transferência de massa e calor. Para 500 g de semente, a maior redução da umidade e conseqüentemente, o maior rendimento do óleo de mamão, foi obtida para a temperatura de 70°C, velocidade do ar de 10,5 m/s e tempo de secagem de 4 h.

De Brito et al. (2017), propuseram uma metodologia para avaliar o desempenho energético da secagem de sementes de sorgo no leito de jorro. O desempenho foi medido com base na eficiência de secagem, eficiência energética e consumo específico de energia. A metodologia utilizada se mostrou eficiente para a medição do desempenho energético, cujo aumento percentual do consumo específico de energia foi maior em cargas maiores e em temperaturas mais baixas.

Os trabalhos anteriores demonstram a gama de estudos que a operação de secagem em leito de jorro proporciona, além de abordar a diversidade de aplicações do equipamento.

3.3.6 Limitações do leito de jorro

O leito de jorro apesar de toda sua eficiência ainda apresenta algumas limitações,

como é citado por Dutra (1984 apud LOURENÇO, 2006), tais como: grande perda de carga até atingir o jorro estável; dificuldade na ampliação de escala (*scale-up*), uma vez que independente das condições geométricas e operacionais, o leito pode apresentar instabilidades caracterizadas pela presença de bolhas, que acarretam o aparecimento de pulsões da fonte, diminuindo a sua eficiência de operação; capacidade devido à altura máxima de jorro estável, que depende da geometria do jorro e das propriedades das partículas. E ainda, o fluxo de ar controlado está relacionado mais às necessidades para formação do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa.

Júnior, Duarte e Santos (2015) citaram que a depender da quantidade de material no interior do equipamento, pode-se conduzir a um bloqueio do leito. Além disso, uma baixa taxa de circulação das partículas e um longo tempo de residência podem reduzir a taxa de secagem e ter efeitos adversos sobre as propriedades dos materiais.

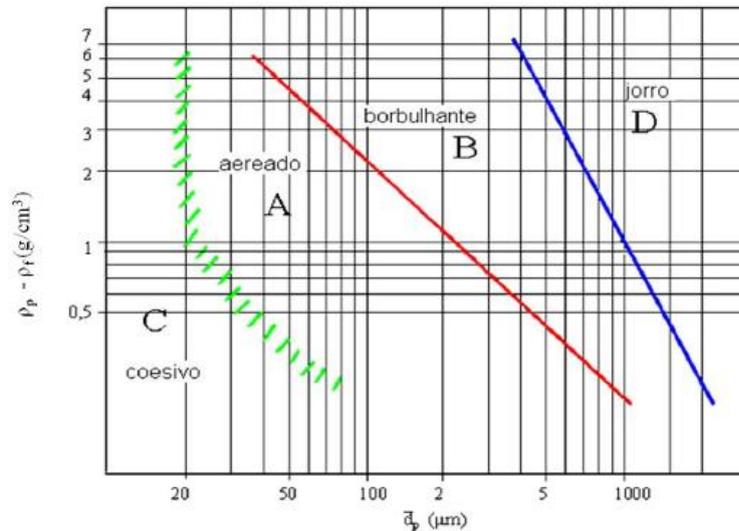
Outra limitação está no uso de leitos com partículas muito finas. Para a solução deste problema, o usual é a utilização de tubos de aspiração que podem ter diferentes configurações como: tubos de aspiração convencionais não porosos, tubos abertos e porosos, e tubos de tiragem laterais. No entanto, esses tubos alteram as características do leito como velocidade mínima de jorro, queda de pressão operacional, circulação das partículas e o tempo para as partículas cruzarem as regiões do leito de jorro. Devido a isso, a utilização de um confinador de fonte é a melhor solução para operar leitos com partículas finas. Trata-se de um tubo cilíndrico colocado acima do leito de jorro, onde é feita a coleta das partículas, evitando seu arrasto (TELLABIDE et al., 2020).

3.3.7 Classificação de partículas

Uma classificação de leito de partículas é definida de acordo com a natureza das partículas que o constituem. Geldart (1973) sugeriu uma classificação de partículas em quatro categorias (A, B, C e D), como apresentado na Figura 3.12. O grupo ao qual pertencem as partículas é função do seu tamanho (d_p) e da diferença de densidade entre o sólido e o gás fluidizante ($\rho_p - \rho_g$).

O grupo A é formado por partículas de diâmetro médio, $20 \mu\text{m} < d_p < 100 \mu\text{m}$, e densidades baixas, $\rho_p < 1,4 \text{ g/cm}^3$. Trata-se de partículas cuja velocidade mínima de fluidização e velocidade de aparição de bolhas são diferentes. De acordo com Dias (2015, p. 45), “estas partículas fluidizam facilmente e também formam leitos expandidos, onde o leito aumenta consideravelmente seu volume antes de atingir o estado fluidizado”.

Figura 3.12 – Diagrama de Geldart.



Fonte: Cortez (2002 apud DO NASCIMENTO, 2014).

O grupo B possui partículas de tamanho grande com diâmetro $40 \mu\text{m} < d_p < 500 \mu\text{m}$ e densidade $1,4 \text{ g/cm}^3 < \rho_p < 4,0 \text{ g/cm}^3$. A fluidização borbulhante é observada neste grupo, sendo o tamanho das bolhas aumentado com a altura do leito e com a velocidade do gás (DIAS, 2015).

O grupo C é formado por partículas muito finas e que possuem tendência a aglomeração, o que dificulta a fluidização devido as forças interpartículas serem maiores que as forças resultantes da ação do gás. Esse grupo constitui partículas com $d_p < 30 \mu\text{m}$ (DIAS, 2015).

O grupo D é composto por partículas jorráveis grandes e/ou muito densas. As partículas possuem $d_p > 600 \mu\text{m}$, geralmente são compridas, como grãos e outros. A formação de canais preferenciais é característica para estes sólidos e a fluidização é instável e dificultada por causa da forma irregular e pelo tamanho das partículas (DIAS, 2015).

3.4 Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD)

Devido a presença de grande quantidade de partículas em movimento no interior do leito de jorro, é difícil realizar medidas experimentais para obter informações detalhadas sobre a dinâmica entre as fases sólida e fluida no interior do equipamento sem perturbar o sistema. Portanto, a modelagem e simulação computacional do processo surge como alternativa para prever o comportamento dinâmico no interior do leito (BÉTTEGA; CORRÊA; FREIRE, 2009; VIEIRA NETO et al., 2008).

A simulação computacional é uma técnica na qual se reproduz fenômenos reais e a partir dela é possível avaliar o efeito de diversas variáveis sobre o processo, além de superar as limitações experimentais impostas. Para analisar o comportamento fluidodinâmico de um leito de jorro pode-se utilizar a ferramenta numérica conhecida por CFD (*Computational Fluid Dynamics*), que auxilia no entendimento e análise do comportamento de escoamentos multifásicos. A técnica possibilita a obtenção de informações relevantes para o entendimento do processo de secagem em leito de jorro, tais como de porosidade, velocidade das partículas e do fluido, taxa de recirculação, flutuações de pressão e altura da fonte.

Essa ferramenta mostra-se eficiente para estudar o comportamento da operação dos equipamentos, a custos mais baixos (ARTUR et al., 2018). Consiste na resolução simultânea de equações que governam o escoamento de fluido e a transferência de calor e massa. Ademais, pode ser considerada uma ferramenta útil por facilitar o entendimento e a interpretação de fenômenos físicos que ocorrem devido a forma em que os resultados são visualizados, por meio de figuras e animações coloridas (MALEKJANI; JAFARI, 2018).

Estudos através de CFD se iniciaram por volta de 1960 pela indústria aeronáutica que desejava simular o deslocamento do ar ao redor de aviões para promover o desenvolvimento de suas aeronaves. Anos depois, a ferramenta foi utilizada para máquinas térmicas e turbinas a gás, e, posteriormente, utilizada pela indústria automobilística para analisar a aerodinâmica de carros. A partir disso, notou-se que técnicas de CFD poderiam ser utilizadas para os mais diversos escoamentos e diversos campos da engenharia.

As técnicas de CFD na indústria de alimentos e bebidas são usadas para melhorar a segurança, vida útil e qualidade dos alimentos e estão relacionadas a estudos de mistura, secagem, cozimento, esterilização, resfriamento e armazenamento. Além disso, com a utilização dessa ferramenta, produtos podem ser processados e armazenados em sistemas mais eficientes, de modo que as empresas de alimentos podem aprimorar estratégias de processamento com altos níveis de qualidade do produto (NORTON; SUN, 2006).

Segundo Béttega, Corrêa e Freire (2009), a utilização de técnicas de CFD é crucial para análise e estudo dos regimes de escoamento fluido-sólido presentes no interior do leito de jorro, uma vez que é possível investigar uma ampla variedade de condições operacionais, parâmetros geométricos e materiais com diferentes propriedades. No trabalho de Júnior, Duarte e Santos (2015), as técnicas de CFD foram utilizadas para criar modelos híbridos de coeficientes de arraste para o regime de leito de jorro diluído, pois os modelos convencionais não tratam esse tipo de leito de jorro com grande precisão. Os autores verificaram que a ferramenta CFD permite melhor entendimento e caracterização dos regimes de escoamentos

no leito.

Artur et al. (2020) simularam e verificaram parâmetros característicos de projeto e operação do leito de jorro usando como material particulado o café. Através de uma simulação 3D foi possível verificar o desenvolvimento do fluxo no interior do leito e a velocidade de mínima fluidização. Além disso, foi possível obter, de forma visual, o padrão de dispersão das partículas no interior do sistema, permitindo a análise energética de entrada. Segundo os autores, a simulação em CFD permite que um projeto seja elaborado e testado antes mesmo de ser efetivado, gerando uma economia e permitindo que os ajustes necessários sejam realizados antes da implementação final da planta física.

Trabalhos como de Duarte, Murata e Barrozo (2005), Béttega, Corrêa e Freire (2009), Vieira Neto et al. (2008), Cunha et al. (2009), Júnior, Duarte e Santos (2015) mostram que essa ferramenta prevê os fenômenos reais que ocorrem em leito de jorro com boa aproximação e podem complementar os estudos realizados experimentalmente.

Para a realização da análise do comportamento fluidodinâmico do leito de jorro utilizam-se pacotes abertos e comerciais de *softwares* que simulam os mais diversos tipos de escoamento e se diferenciam na construção da geometria, geração da malha, modelos de turbulência, modelos de transferência interfacial e método de resolução de equações. Exemplos desses *softwares* são FlexPDE, CFX, FLUENT, POLIFLOW, OpenFOAM, Saturne, Salome e outros.

3.4.1 Princípios de CFD

De acordo com Malekjani e Jafari (2018), a Equação 3.1 implica que há um equilíbrio entre o fluxo de massa que entra em um elemento fluido com a massa que sai desse elemento e, portanto, é chamada de equação da continuidade ou lei de conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

Em que: ρ é a densidade (kg/m^3), t é o tempo (s), x são as coordenadas cartesianas (m), u é a componente da velocidade (m/s) e i é o índice das coordenadas cartesianas.

Além disso, os autores afirmam que há um equilíbrio entre a taxa de variação de momento linear e a soma das forças externas agindo sobre o elemento de fluido, dado pela conservação do momento ou segunda lei de Newton, expressa pela Equação 3.2:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\rho \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (3.2)$$

Em que: j é o índice das coordenadas cartesianas, δ é delta de Kronecker, μ é a viscosidade dinâmica (kg/m s) e g é a aceleração da gravidade (m/s²).

Ademais, segundo Malekjani e Jafari (2018), há uma igualdade entre a taxa de mudança de energia de um elemento de fluido e calor adicionado ou trabalho realizado nele, dado pela conservação de energia ou primeira lei da termodinâmica, expressa pela Equação 3.3:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_a T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j C_a T) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial}{\partial x_j} \right) = s_T \quad (3.3)$$

Em que: C_a é a capacidade de calor específica (W/kg K), T é a temperatura (K), λ é a condutividade térmica (W/mK) e s_T é dissipador ou fonte térmica (W/m³).

A resolução direta das equações de Navier-Stokes é possível para fluxo laminar, no entanto, para fluxo turbulento, ainda não é possível a resolução computacionalmente. Devido a isso, além das equações de Navier-Stokes, para regimes de fluxo turbulento, os modelos de turbulência devem ser resolvidos. Os modelos de turbulência dividem-se em dois grupos: Reynolds calculado na média dos modelos Navier-Stokes e os modelos de flutuações como simulações de grande turbilhão (MALEKJANI; JAFARI, 2018).

Para o modelo com Reynolds calculado na média dos modelos Navier-Stokes, utilizam-se as equações de movimento de Navier-Stokes de tempo médio para escoamento de fluido. Este método produz resultados satisfatórios com menor custo em relação a outros. O método também elimina as propriedades aleatórias do fluxo turbulento e gera seis tensões adicionais chamadas tensões de Reynolds que podem ser modeladas por diferentes sistemas de equações incluídos nos modelos de turbulência. Alguns exemplos de modelos são: k-epsilon padrão, k-epsilon renormalização e k-epsilon realizável. O modelo k-epsilon é o mais utilizado devido a melhor conversão, ele considera equações de transporte que representam a energia cinética e a taxa de dissipação de turbulência (MALEKJANI; JAFARI, 2018; NORTON; SUN, 2006).

Já o modelo de simulação de grande turbilhão, é baseado no fato de que grandes redemoinhos turbulentos altamente anisotrópicos são dependentes da geometria do domínio do fluxo dos gradientes médios de velocidade. Esse modelo é considerado preciso, no entanto,

é caro, demorado e requer computadores poderosos (MALEKJANI; JAFARI, 2018; NORTON; SUN, 2006).

3.4.2 Revisão dos modelos matemáticos utilizados nas simulações CFD

O leito de jorro envolve um escoamento multifásico por conter fase fluida (ar), também denominada de fase primária, e fase sólida (partículas), também denominada de fase secundária. Devido a isso, a representação matemática da distribuição do material ao longo do leito de jorro pode ser feita por duas abordagens:

a) Euler-Lagrange: Esse tipo de abordagem é utilizado quando a fase discreta, ou seja, a fase secundária, ocupa uma pequena fração de volume do sistema de forma que sua fração de volume seja insignificante. A fase contínua é modelada pela resolução das equações de Navier-Stokes, completamente ausente da fase discreta. Posteriormente, utiliza-se informações fluidodinâmicas previamente levantadas para descrever o comportamento da fase discreta (DUARTE, 2006). Essa abordagem é indicada para representar ciclones, elutriadores, hidrociclones, entre outros (SANTOS, 2008). Sua aplicação é limitada a sistemas em que a fase dispersa ocupa baixa fração do volume, devido ao grande esforço computacional necessário na solução de seu equacionamento.

b) Euler-Euler: Considera matematicamente que as fases do sistema são contínuas e se interpenetram. Surge aqui o conceito de fração volumétrica de fase, já que o volume de uma fase não pode ser ocupado pelo da outra fase. Essas frações são consideradas como funções contínuas no tempo e no espaço, cuja soma equivale à unidade (DUARTE, 2006). Tem-se então um conjunto de equações abrangendo as equações de massa, momento e energia para cada fase (SANTOS, 2008). Segundo Sobieski (2008), através da pressão e dos coeficientes de troca de energia, momento e massa da interface, tem-se a interação entre as fases. As simulações eulerianas baseiam-se nas equações de Navier-Stokes e os coeficientes de transporte das fases sólidas levam em consideração as interações fluido-partícula e as colisões partícula-partícula. Essa abordagem possui como vantagem o conhecimento exato de cada trajetória das partículas e seus devidos parâmetros do sistema (VIEIRA NETO et al., 2008). Nessa abordagem, utiliza-se a mesma discretização e técnicas numéricas semelhantes às usadas tanto na fase contínua como na fase dispersa, o que beneficia sua aplicação e diminui o custo computacional (LI; CHE; LIU, 2012). Segundo Li, Che, Liu (2012), ambas as abordagens (Euler-Lagrange e Euler-Euler) consideram a fase fluida como contínua, a principal diferença entre elas é a maneira de tratar a fase dispersa.

O leito de jorro opera com grande quantidade de material particulado, o que torna a

abordagem Euler-Lagrange inviável de ser utilizada. Muitos estudos mostraram que a utilização da abordagem Euler-Euler em leito de jorro prediz, adequadamente, o comportamento fluidodinâmico no interior desse equipamento (BÉTTEGA; CORRÊA; FREIRE, 2009; DUARTE; MURATA; BARROZO, 2005).

No *software* ANSYS Fluent tem-se disponibilizado três diferentes modelos para resolução das equações aplicáveis a escoamentos multifásicos sob a abordagem Euler-Euler. Em seu trabalho, Duarte (2006) descreve esses três modelos:

- Modelo de Volume de Fluidos (VOF): este é usado quando a situação envolve dois ou mais fluidos imiscíveis e que a interface entre os fluidos seja de interesse. Esse tipo de modelo possui aplicação em problemas estacionários ou transientes com interface líquido-gás, movimento de bolhas, fluxos em superfícies livres e predição de dispersão de um jato.
- Modelo de Mistura: utilizado para problemas com duas ou mais fases que são consideradas como interpenetrantes e contínuas. Suas aplicações incluem fluxo de bolhas, sedimentação de ciclones e arraste de partículas com baixo carregamento.
- Modelo Euleriano: é considerado o mais complexo entre os demais modelos. Este resolve um conjunto de várias equações de momento e continuidade para cada fase. As propriedades para esse modelo são obtidas a partir da teoria cinética granular e a troca de momento depende do tipo de mistura utilizada. Sua aplicação está relacionada a colunas de bolhas, suspensão de partículas, leito fluidizados e de jorro, dentre outros.

3.4.2.1 O modelo Euleriano Granular Multifásico aplicado ao leito de jorro

Duarte, Murata e Barrozo (2005), Sobieski (2008), Duarte (2006) e Barcelos (2016) propuseram em seus trabalhos a utilização de um Modelo Multifásico Euleriano, que considera as fases sólido-gás como contínuas e que interagem entre si. Esse modelo minimiza o custo computacional e considera os efeitos de interação entre as duas fases.

Barcelos (2016) propôs algumas hipóteses simplificadoras para a análise do modelo Euleriano: regime transiente, partículas esféricas, escoamento multifásico (fluido-sólido) com fases contínuas, escoamento fluido-sólido bidimensional, transferência de massa entre as fases primárias e secundária nula, sem reação química e forças externas, de ascensão e de massa virtual desprezadas.

Cunha et al. (2009) também propuseram a utilização desse modelo em seu estudo e descreveram o desenvolvimento das equações de conservação para cada fase. A equação de continuidade para as fases gás (g) e sólido (s) é dada pela Equação 3.4, sendo o subscrito q representante da fase sólida e fluida.

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (3.4)$$

Em que: α_q é a fração volumétrica (q = g, s), ρ_q é a densidade.

As equações a seguir definem o balanço de momento para as fases fluida (Equação 3.5) e granular (Equação 3.6) segundo Cunha et al. (2009):

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g)}{\partial t} + \nabla(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \overline{\overline{\tau}}_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} + \overline{\overline{R}}_{gs} + (\overline{\overline{F}}_g + \overline{\overline{F}}_{lift,g} + \overline{\overline{F}}_{vm,g}) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s)}{\partial t} + \nabla(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p + \nabla \overline{\overline{\tau}}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \overline{\overline{R}}_{sg} + (\overline{\overline{F}}_s + \overline{\overline{F}}_{lift,s} + \overline{\overline{F}}_{vm,s}) \quad (3.6)$$

No qual o termo de interação entre as fases é dado pela Equação 3.7:

$$\overline{\overline{R}}_{sg} = \overline{\overline{R}}_{gs} = \sum_{p=1}^n \left[K_{sg} (\vec{v}_s - \vec{v}_g) + \dot{m}_{sg} \vec{v}_{sg} - \dot{m}_{gs} \vec{v}_{gs} \right] \quad (3.7)$$

Em que $K_{sg} = K_{gs}$ é o coeficiente de troca de momento na interface.

O termo $\overline{\overline{\tau}}_g$, da Equação 3.8, representa o tensor de deformação da fase fluida:

$$\overline{\overline{\tau}}_g = \alpha_g \mu_g \left(\overline{\nabla} \vec{v}_g + \overline{\nabla} \vec{v}_g^T \right) + \alpha_g \left(\lambda_g - \frac{2}{3} \mu_g \right) \nabla \vec{v}_g \overline{\overline{I}} \quad (3.8)$$

O termo $\overline{\overline{\tau}}_s$, da Equação 3.9, representa o tensor de deformação da fase sólida:

$$\overline{\overline{\tau}}_s = \alpha_s \mu_s \left(\overline{\nabla} \vec{v}_s + \overline{\nabla} \vec{v}_s^T \right) + \alpha_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \vec{v}_s \overline{\overline{I}} \quad (3.9)$$

Em que: $\overline{\overline{F}}$ é a força externa do corpo para as fases; $\overline{\overline{F}}_{lift}$ é a força de ascensão; $\overline{\overline{F}}_{vm}$ é a força de massa virtual; $\overline{\overline{R}}$ é a força de interação entre as fases; p é a pressão distribuída em todas as fases; μ_q é a viscosidade de cisalhamento da fase fluida; λ_q é a viscosidade *bulk* da fase fluida; \vec{g} é aceleração da gravidade; ρ_s é a densidade do sólido; $\overline{\overline{R}}$ é a força de interface entre as fases.

Forças de ascensão

A força de ascensão atua sobre as partículas devido aos gradientes de velocidade na

fase primária e, é dada pela Equação 3.10 (DUARTE; MURATA; BARROZO, 2005):

$$\overrightarrow{F_{lift}} = -0,5\rho_g\alpha_s(\overrightarrow{v_g} - \overrightarrow{v_s}) \times (\nabla\overrightarrow{v_g}) \quad (3.10)$$

Sendo $\overrightarrow{F_{lift,g}} = \overrightarrow{F_{lift,s}}$.

De acordo com Duarte (2006), na maioria dos casos a força de ascensão é insignificante comparada à força de arraste.

Força mássica virtual

A força mássica virtual ocorre quando a fase sólida acelera em relação a fase fluida e a inércia devido a massa da fase fluida gera o termo chamado força mássica virtual (DUARTE, 2006), que é definida pela Equação 3.11:

$$\overrightarrow{F_{vm,g}} = 0,5\alpha_g\rho_g\left(\frac{d_g\overrightarrow{v_g}}{dt} - \frac{d_s\overrightarrow{v_s}}{dt}\right) \quad (3.11)$$

Sendo $\overrightarrow{F_{vm,g}} = \overrightarrow{F_{vm,s}}$.

De acordo com Duarte (2006), como em um leito de jorro a densidade da fase secundária (partícula) é muito maior que a densidade da fase primária (ar), o efeito da força virtual não é significativa. Se comparado à força de arraste, a força de ascensão é, também insignificante. Logo, pode-se desprezar essas forças, de forma a obter a Equação 3.12:

$$\overrightarrow{F_{lift,g}} + \overrightarrow{F_{vm,g}} \cong 0 \quad (3.12)$$

Modelos de arraste

A troca de momento entre as fases é baseada no coeficiente de troca sólido-fluido (K_{sg}) (DUARTE; MURATA; BARROZO, 2005), que pode ser escrito na forma geral como representado pela Equação 3.13:

$$K_{sg} = \frac{\alpha_s\rho_s f}{\tau_s} \quad (3.13)$$

Sendo: f é a força de arraste e τ_s é o tempo de relaxação da partícula, definido como representado pela Equação 3.14:

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_g} \quad (3.14)$$

Em que: d_s é o diâmetro das partículas e μ_g é a viscosidade da fase fluida.

Conhecer o modelo de arraste é um fator muito importante na simulação da fluidodinâmica em sistemas multifásicos. Os modelos de arraste descrevem a transferência de quantidade de movimento entre as fases (DA ROSA, 2010).

A definição de força de arraste inclui o coeficiente de arraste (C_D) que é função do número de Reynolds relativo (Re_s). O modelo de arraste mais utilizado na literatura para leito de jorro é o de Gidaspow et al. (1992 apud ARTUR ET AL., 2018; BÉTTEGA; CORRÊA; FREIRE, 2009; CUNHA ET AL., 2009; DUARTE; MURATA; BARROZO, 2005; SOUZA; FREIRE; BÉTTEGA, 2018; ZHONGHUA; MUJUMDAR, 2007):

Para $\alpha_g > 0,8$ tem-se a Equação 3.15:

$$K_{sg} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g (\vec{v}_s - \vec{v}_g)}{d_s} \alpha_g^{-2,65} \quad (3.15)$$

Na qual C_D é representado pela Equação 3.16:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g Re_s} \left[1 + 0,15 (\alpha_g Re_s)^{0,687} \right] \quad (3.16)$$

Para $\alpha_g \leq 0,8$ tem-se a Equação 3.17:

$$K_{sg} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_g) \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1,75 \frac{\rho_g \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \quad (3.17)$$

De acordo com Duarte (2006, p.50), “para o leito de jorro este modelo mostrou ser o mais apropriado, devido à diferença de concentração de partículas existentes nas regiões características do leito de jorro”.

Pressão de sólidos

Para fluxos granulares em regime compressível, a pressão do sólido é obtida a partir da Equação 3.18, composta por um termo cinético e outro para as colisões entre as partículas. Devido a distribuição de velocidade para as partículas, na Equação 3.18, introduz-se o termo temperatura granular, que representa uma medida da variação de energia cinética das

partículas devido aos choques entre elas (DUARTE, 2006).

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (3.18)$$

Na qual: $g_{0,ss}$ é a função distribuição radial; θ_s é a temperatura granular, que é proporcional à energia cinética das partículas e e_{ss} é o coeficiente de restituição para colisões entre partículas. No trabalho de Duarte, Murata e Barrozo (2005) e também no trabalho de Sobieski (2008), o valor adotado do coeficiente de restituição foi equivalente a 0,9; p_s é a pressão de sólidos (Pa).

Função distribuição radial

A função de distribuição radial, representada pela Equação 3.19, é um fator de correção que modifica a probabilidade de colisões entre partículas quando a fase granular ficar densa. Esta função também pode ser interpretada como a distância adimensional entre as superfícies das partículas (DUARTE; MURATA; BARROZO, 2005):

$$g_{0,ss} = \frac{D_s + d_s}{D_s} \quad (3.19)$$

Em que: D_s é a distância entre as partículas.

Tensão de sólidos

Segundo Duarte (2006), a equação de momento da fase sólida requer a descrição da tensão da fase sólida. O tensor de sólidos surge devido à troca de momento por translação e colisão das partículas e engloba a viscosidade de cisalhamento e *bulk* explicadas posteriormente. Ademais, tem-se um componente de atrito da viscosidade que considera a transição visco-plástica que ocorre quando as partículas sólidas alcançam a fração volumétrica máxima.

A viscosidade de cisalhamento é obtida pela soma das componentes colisional, cinética e friccional (DUARTE, 2006) dada pela Equação 3.20.

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (3.20)$$

A parte da viscosidade de cisalhamento devido às colisões entre as partículas é dada pela Equação 3.21 (DUARTE, 2006):

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.21)$$

A viscosidade cinética é dada pelo modelo de Syamlal et al. (1989 apud DUARTE, 2006) representado pela Equação 3.22:

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \right] \alpha_s g_{0,ss} \quad (3.22)$$

Já a viscosidade devida ao atrito ou fricção entre as partículas, incluída no cálculo quando a fase sólida se aproxima do limite de empacotamento (DUARTE, 2006), é obtida pela Equação 3.23:

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \text{sen} \beta^\circ}{2\sqrt{\overline{I_{2D}}}} \quad (3.23)$$

Em que: p_s é a pressão de sólidos, β° é o ângulo interno de atrito e $\overline{I_{2D}}$ é o segundo invariante do tensor taxa de deformação.

A viscosidade *bulk* de sólidos, responsável pela resistência à compressão e expansão das partículas é dada pela Equação 3.24 de Lun et al. (1984 apud CUNHA et al., 2009):

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.24)$$

Como temperatura termodinâmica para os gases, tem-se a temperatura granular (θ_s) para sistemas particulados que representa uma medida da flutuação da velocidade das partículas (DUARTE, 2006) e é dada pela Equação 3.25:

$$\theta_s = \frac{1}{3} \left(v_s^2 \right) \quad (3.25)$$

De acordo com Duarte (2006, p. 53), “a temperatura granular para a fase sólida é proporcional à energia cinética do movimento aleatório das partículas. A equação do transporte obtida da teoria cinética tem a forma” representada pela Equação 3.26:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \theta_s) + \nabla (\alpha_s \rho_s \overline{v_s} \theta_s) \right] = \left(-p_s \overline{I} + \overline{\tau} \right) : \nabla \overline{v_p} + \nabla (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{gs} \quad (3.26)$$

Na qual: $(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}) : \nabla \bar{v}_p$ é a geração de energia pelo tensor de tensão de sólido; $k_{\theta_s} \nabla \theta_s$ é a energia de difusão (k_{θ_s} é o coeficiente de difusão); γ_{θ_s} é a energia de dissipação devido à colisão; φ_{gs} é a troca de energia entre a fase fluida e a fase sólida.

O modelo de Gidaspow et al. (1992 apud BÉTTEGA; CORRÊA; FREIRE, 2009; DUARTE, 2006) é utilizado para o cálculo do coeficiente de difusão da temperatura granular representado pela Equação 3.27:

$$k_{\theta_s} = \frac{150 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{384 (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{6}{5} \alpha_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2 \alpha_s^2 \rho_s d_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss} \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.27)$$

A dissipação de energia, que representa a energia dissipada por colisões entre partículas da fase sólida (DUARTE, 2006), é representada pela Equação 3.28:

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12 (1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \alpha_s^2 \rho_s \theta_s^{3/2} \quad (3.28)$$

A transferência de energia cinética da partícula da fase sólida para a fase fluida é representada pela Equação 3.29, de acordo com Duarte (2006).

$$\varphi_{gs} = -3K_{gs} \theta_s \quad (3.29)$$

3.4.3 Análise Numérica

Para a resolução do código de CFD é necessária a utilização de uma técnica adequada para discretizar o domínio, ou seja, discretizar a região de aplicação e validade das equações. Dentre as técnicas existentes, destacam-se: diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos. Embora eles apresentem resultados razoáveis, a depender da aplicação do código no problema, uma pode ser considerada mais adequada em detrimento das outras (NORTON; SUN, 2006).

As técnicas de diferenças finitas possuem uso limitado, pois apresentam grande dificuldade de emprego em geometrias complexas, ao contrário de volume finitos e elementos finitos, que possuem propriedades adequadas para trabalhar com geometrias arbitrárias (NORTON; SUN, 2006).

No entanto, a utilização dos elementos finitos encontra certa dificuldade devido a limitação de pacotes comerciais. Graças a isso, a maioria dos trabalhos empregam a técnica de volumes finitos (ARTUR et al., 2020; BÉTTEGA; CORRÊA; FREIRE, 2009; CUNHA et al.,

2009; DUARTE; MURATA; BARROZO, 2005; SOUZA; FREIRE; BÉTTEGA, 2018).

O método de volumes finitos é um método matemático que baseia-se em dividir um volume de controle em vários volumes de controle menores que mantêm suas propriedades, ou seja, discretiza um meio contínuo, até quase atingir uma dimensão que torne as equações a serem resolvidas dentro deste volume como uma função de ponto, sendo resolvida de forma iterativa ou simultaneamente todo o conjunto de equações algébricas obtidas (ARTUR et al., 2020).

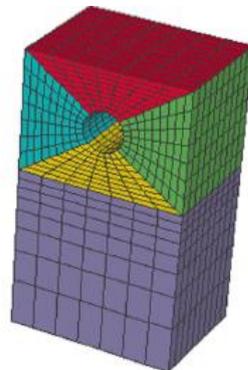
De acordo com Norton e Sun (2006), quando se expressa as equações por meio da técnica de volumes finitos, tem-se um método intuitivo para alcançar explicações adequadas sobre a mudança na massa, energia e momento do fluido no domínio computacional. Ainda segundo os autores, graças a facilidade de compreensão e versatilidade dessa técnica, essa se tornou mais comumente utilizada em simulação computacional utilizando CFD.

3.4.3.1 Tipos de malhas

As malhas computacionais dependem da forma geométrica dos volumes e dos padrões de distribuição deste volume ao longo da geometria. Elas podem ser classificadas, de acordo com Duarte (2006), em:

- Malhas estruturadas: Esse tipo de malha é disposto em um padrão regular repetido, denominado bloco, e utiliza elementos quadriláteros em 2D e hexaédricos em 3D. Ela apresenta vantagem em relação aos demais tipos por permitir alto grau de controle. Uma malha estruturada permite um esquema de geração de grade, onde pode-se conectar vários blocos, construindo um domínio inteiro, como apresentado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Malha multibloco estruturada usando conexão ponto a ponto.

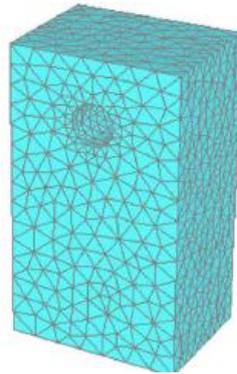


Fonte: Duarte (2006).

- Malhas não-estruturadas: não utilizam um padrão no arranjo dos elementos, e, por

isso, são denominadas não-estruturadas (Figura 3.14). Esse tipo de malha faz uso de grades que utilizam triângulos em 2D e tetraedros em 3D. As vantagens de utilização dessa malha são o menor esforço do usuário, menor tempo para construção das malhas e o fato delas serem automatizadas, não havendo necessidade de se preocupar com a dispersão dos blocos, estrutura ou conexões. Porém, têm como principal desvantagem a falta de controle do usuário sobre a malha, o usuário define apenas os limites e tamanho das células da malha.

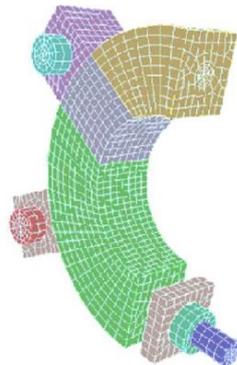
Figura 3.14 – Malha não-estruturada composta de elementos triangulares e tetraédricos.



Fonte: Duarte (2006).

- Malhas híbridas: tem-se a junção de malhas estruturadas e não-estruturadas, como demonstrado na Figura 3.15, tendo como vantagem a utilização das propriedades positivas de elementos de grade uniforme nas regiões de maior detalhamento e de malhas não-estruturadas onde o perfil a ser analisado for de menor interesse. A possibilidade de controlar a forma e distribuição da malha localmente garante malhas excelentes em termos dos parâmetros de qualidade e um resultado satisfatório. A desvantagem desse tipo de malha é que elas exigem muita prática e experiência em sua geração em volumes com geometrias complexas.

Figura 3.15 – Malha híbrida.



Fonte: Duarte (2006).

As malhas são constituídas por células e de acordo com Boyce et al. (2015, p. 10684), “a resolução das equações utilizando o modelo CFD requer que as células cubram regiões que não mudariam nas propriedades físicas macroscópicas se as células fossem ligeiramente alteradas em tamanho”. Dessa forma, segundo os autores, as células devem possuir tamanhos que sejam suficientemente pequenos para capturar as características de fluxo mesoscópico, mas suficientemente grande para abrigar uma quantidade grande de partículas.

Em seus estudos, especificamente para regimes de fluidização de borbulhamento e *slugging*, utilizando partículas esféricas com densidade de 900 e 960 kg/m³ e escoamento multifásico, Boyce et al. (2015) constataram que o tamanho da célula na direção vertical correspondente de 3 a 4 diâmetros da partícula e tamanho da célula na direção radial de aproximadamente 2 a 5 diâmetros da partícula forneciam melhores previsões de simulações, de forma que estas se aproximaram dos resultados experimentais. Assim, para essas dimensões, as simulações apresentaram com mais precisão as características de fluxo. Para tamanhos da célula na direção vertical menores que a faixa proposta, as simulações apresentaram resultados fisicamente irrealistas. Para a mesma faixa indicada na direção vertical, a direção radial não apresentou variação significativa nos resultados.

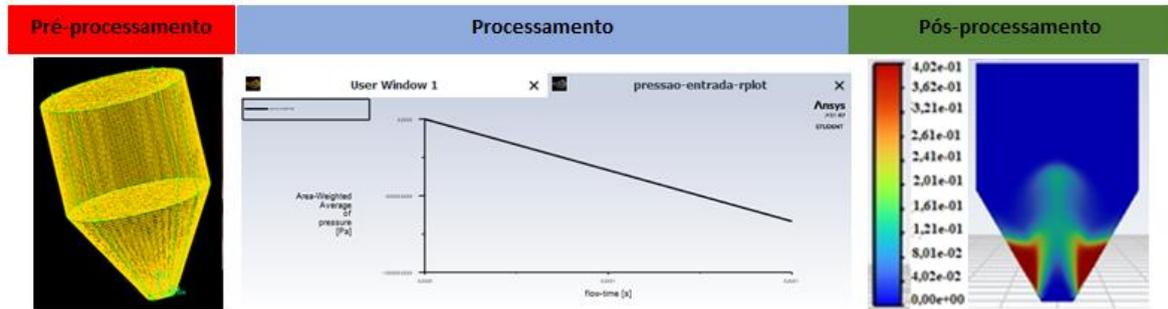
Dessa maneira, Boyce et al. (2015) destacaram a importância de avaliar o tamanho das células e como estas afetam diretamente na qualidade dos resultados das simulações multifásicas. O tamanho ideal da célula depende do regime que se pretende obter, da velocidade do escoamento e do tamanho da partícula.

Duarte (2006) também mencionou em seu trabalho a importância de garantir que o tamanho da célula não seja inferior ao tamanho do diâmetro da partícula. É relatado que a simulação não irá divergir, no entanto, os resultados obtidos provavelmente não serão coerentes com a realidade. O autor optou por utilizar em seu trabalho um tamanho de célula acima de 5% do diâmetro da partícula.

3.4.3.2 Etapas de processamento

A utilização da técnica de simulação computacional via CFD pode ser dividida em três importantes etapas para a solução de um problema, como representado na Figura 3.16 (MALEKJANI; JAFARI, 2018).

Figura 3.16 – Esquema de análise da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD).



Fonte: Da autora (2022).

1. **Pré-processamento:** Etapa destinada para construção da geometria do equipamento, definição das faces e volumes, determinação dos efeitos de camada limite, aplicação e determinação do tipo de malha adequado, definição das paredes, interiores, entradas e saídas do equipamento e por fim, definição das condições iniciais e condições de contorno, além da definição da solução numérica que será utilizada (MALEKJANI; JAFARI, 2018).

2. **Processamento:** Etapa em que os *softwares* são utilizados para aplicar o método de discretização e resolução de matrizes para resolver a modelagem realizada no pré-processamento. Têm-se vários métodos de discretização, podendo destacar o método dos volumes finitos, utilizado na maioria dos trabalhos (ARTUR et al., 2018, 2020; MALEKJANI; JAFARI, 2018).

3. **Pós-processamento:** Análise numérica dos resultados obtidos do problema em estudo e visualização destes. Para essa etapa pode-se utilizar *softwares* como ParaView e Post-cfx (MALEKJANI; JAFARI, 2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

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

4.1 Matéria-prima

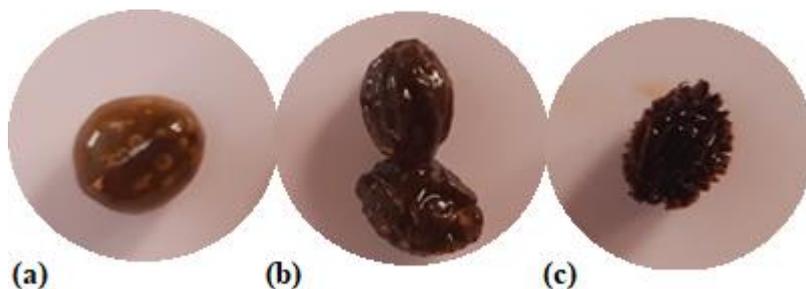
As sementes de mamão utilizadas nesse trabalho advieram de mamões das variedades papaia e formosa que eram adquiridos no comércio local de Lavras/MG através de compras e doações (frutos rejeitados ou estragados).

Assim que o fruto era recebido, as sementes de mamão eram retiradas da cavidade central e lavadas, para remoção da polpa aderida a elas. Após isso, eram colocadas em uma peneira, com tamanho inferior ao tamanho das sementes, e esfregadas sobre esta para remoção da exotesta e, por fim, lavadas novamente e colocadas em recipientes plásticos para congelamento em um freezer até a sua utilização (CHIELLE et al., 2016).

Cabe destacar que cada fruto possui uma quantidade muito limitada de sementes, o que gerou dificuldade para se acumular um volume grande de sementes, necessário para a realização de todas as análises experimentais. Assim, as sementes foram um recurso limitado e sua utilização foi otimizada ao máximo.

Um ponto importante a ser mencionado é que, um tempo após a lavagem das sementes, algumas delas começavam a sofrer um processo de desidratação, no qual a camada mucilaginosa murchava, apesar da presença da exotesta, resultado este que pode ter ocorrido devido a manipulação das sementes no processo de limpeza, o que demonstra, em um primeiro momento, a fragilidade de se trabalhar com as sementes com exotesta. A Figura 4.1 apresenta as sementes em diferentes condições após o processo de limpeza.

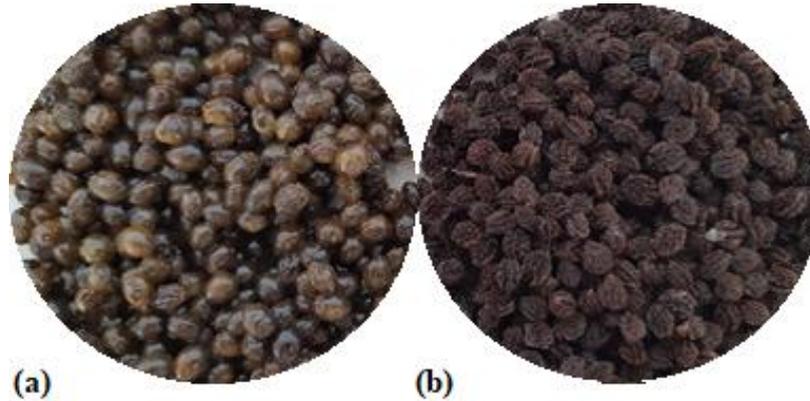
Figura 4.1 – Sementes de mamão (a) com exotesta em perfeito estado; (b) com exotesta aparentemente desidratando; (c) sem exotesta com seus poros a vista.



Fonte: Da autora (2022).

Realizou-se um estudo de caracterização das sementes de mamão *in natura* e secas (após secagem de 24 h na estufa a 105 °C). Nas Figuras 4.2 e 4.3, é possível observar fotografias das sementes com exotesta e sem exotesta, antes e após a secagem, respectivamente. Esta análise foi realizada com a função de definir qual a melhor forma de se trabalhar com o material.

Figura 4.2 – Sementes de mamão *in natura* (a) com exotesta e (b) sem exotesta.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 4.3 – Sementes de mamão após a secagem em estufa (a) com exotesta e (b) sem exotesta.



Fonte: Da autora (2022).

Para a caracterização das sementes e do meio poroso foram determinadas as seguintes propriedades: diâmetro médio das partículas, esfericidade, densidade aparente, densidade *bulk* e densidade *bulk* compactada, porosidade *bulk*, peso de mil sementes, umidade e ângulo de repouso. Os procedimentos experimentais realizados estão descritos a seguir.

4.2 Caracterização das sementes

4.2.1 Diâmetro médio das sementes

Para a determinação do diâmetro médio das partículas, foi utilizado o método de peneiramento para as sementes *in natura* sem exotesta e para as sementes após secas com e sem exotesta. Para isso, empregou-se cerca de 50 g de sementes, peneiras padronizadas da série Tyler 4, 5, 6, 7 e 8 *mesh* e um agitador mecânico da marca Bertel. Após 10 min de vibração, foi determinada a fração de massa retida em cada peneira (x_i) e a média do diâmetro de abertura da menor e da maior peneira do intervalo utilizado (D_i). Assim, foi possível calcular o diâmetro médio de Sauter (d_{ps}) (Equação 4.1) para a amostra analisada. O procedimento foi realizado em triplicata.

$$d_{ps} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{D_i}} \quad (4.1)$$

Através de uma regressão não linear, ajustou-se o modelo de Rosin, Rammler e Bennet (RRB) aos dados experimentais. O modelo é representado pela Equação 4.2, cujo $n > 0$ e $D' = D_{63,2}$, referente ao diâmetro D para $X = 0,632$, sendo X a fração mássica cumulativa.

$$X_i = 1 - \exp \left[- \left(\frac{D_i}{D'} \right)^n \right] \quad (4.2)$$

A partir desses parâmetros, também foi possível obter o diâmetro médio de Sauter por meio da Equação 4.3.

$$d_{ps} = \frac{D'}{\Gamma(1 - (1/n))} \quad (4.3)$$

Cuja função gama é dada pela Equação 4.4.

$$\Gamma(r) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{r-1} dx \quad (4.4)$$

Já para as sementes *in natura* com exotesta não se realizou o peneiramento, uma vez que a película (exotesta) é muito sensível e a vibração do agitador mecânico provocava o seu rompimento, interferindo na caracterização granulométrica por este método. Além disso, observou-se que, ao ocorrer o rompimento, a película se mantinha parcialmente aderida à semente e esse fato poderia interferir na sua passagem de uma peneira para outra. Desse modo, fez-se o uso do *software* ImageJ, programa de processamento de imagens de código

aberto, onde realizou-se medições dos diâmetros de três amostras de sementes contendo 20 sementes cada. Para cada semente realizou-se medições em triplicata e, assim, conseguiu-se obter a granulometria das sementes *in natura* com exotesta.

4.2.2 Esfericidade

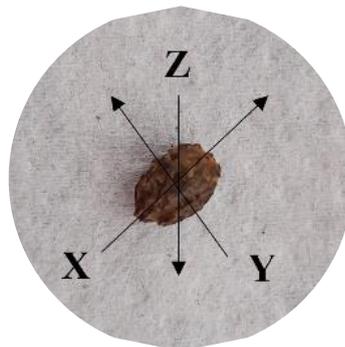
A esfericidade define o quão circular é uma partícula, sendo seu valor equivalente a 1 para um círculo perfeito (POZITANO; ROCHA, 2011). A esfericidade das sementes (Equação 4.5) foi calculada com base nas propriedades isométricas de uma esfera, conforme Mohsenin (1980 apud CHIELLE et al., 2016):

$$\phi = \frac{(x \cdot y \cdot z)^{\frac{1}{3}}}{x} \quad (4.5)$$

Sendo: x , y e z as dimensões geométricas das sementes, correspondentes a comprimento, largura e espessura, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 4.4.

Com auxílio de um paquímetro digital da marca *Stainless Worker*, com medições na faixa de 0 a 150 mm, e erro de 0,01 mm, realizou-se medições de três amostras de sementes contendo 20 sementes cada, em que para cada semente realizou-se medições em triplicata.

Figura 4.4 – As três principais dimensões da semente.



Fonte: Da autora (2022).

4.2.3 Densidade aparente

A densidade aparente das sementes foi determinada por picnometria líquida, utilizando-se picnômetros de 25 mL, água destilada à temperatura de 25 °C (0,9970 g/cm³) e uma balança analítica modelo AD2000 com precisão de 0,001 g. Para isso, foram obtidos os valores da massa do picnômetro, massa do picnômetro + amostra, massa do picnômetro +

amostra + água e massa do picnômetro + água. Após a obtenção desses valores, utilizou-se as Equações 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 (CREMASCO, 2014) para calcular o valor da densidade aparente das sementes de mamão (razão entre a massa das partículas e o seu volume total incluindo os poros). O procedimento foi realizado três vezes, a fim de realizar a conferência dos valores.

$$V_{pic} = \frac{m_{pic+água} - m_{pic}}{\rho_{água}} \quad (4.6)$$

$$V_{água} = \frac{m_{pic+água+amostra} - m_{pic+amostra}}{\rho_{água}} \quad (4.7)$$

$$V_{amostra} = V_{pic} - V_{água} \quad (4.8)$$

$$\rho_{semente} = \frac{m_{pic+amostra} - m_{pic}}{V_{amostra}} \quad (4.9)$$

Em que: V_{pic} é o volume do picnômetro, $V_{água}$ é o volume de água, $V_{amostra}$ é o volume da amostra, $m_{pic+água}$ é a massa do picnômetro com água, m_{pic} é a massa do picnômetro, $m_{pic+água+amostra}$ é a massa do picnômetro com a água e a amostra, $\rho_{água}$ é a densidade da água e $\rho_{semente}$ é a densidade da semente.

O mesmo procedimento foi realizado utilizando álcool isopropílico, com temperatura de 28°C (0,7787 g/cm³) como forma de conferência do valor de densidade aparente encontrado.

Além disso, realizou-se um estudo de determinação da densidade aparente em função da umidade para as sementes que seriam utilizadas nos ensaios de secagem. Para esse teste amostras foram conduzidas à estufa a temperatura de 105 °C, e estabeleceu-se retiradas de amostras a cada 15 min até se completar 135 min de secagem, para determinação da umidade e da densidade aparente. Por fim, as amostras foram retiradas após 24 h de secagem. Com isso, foi possível observar como a densidade aparente varia em função da umidade da semente.

4.2.4 Peso de 1000 sementes

Com base nas regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009), o peso de mil sementes (PMS) foi obtido através da análise de cinco amostras de 100 sementes, com o uso

de balança analítica com precisão de 0,001 g e utilizando a Equação 4.9. De acordo com Brasil (2009, p. 346), “o peso de mil sementes é uma informação que dá ideia do tamanho das sementes”.

$$PMS = \frac{m_{amostra} \times 1000}{n_{sementes}}$$

(4.9)

Onde: $m_{amostra}$ é a massa da amostra de sementes e $n_{sementes}$ é o número total de sementes.

4.2.5 Umidade das sementes

A umidade é definida como a quantidade de água presente no sólido e pode ser expressa em base úmida (b.u.) que representa a relação da massa de água contida no sólido em relação a massa total do sólido (Equação 4.10), ou em base seca (b.s.) que representa a massa de água contida no sólido em relação à massa de matéria seca (Equação 4.11).

$$U_{bu} = \frac{m_A}{m_T} 100 = \frac{m_A}{m_A + m_{SS}} 100$$

(4.10)

$$U_{bs} = \frac{m_A}{m_{SS}}$$

(4.11)

Em que: m_A é a massa de água, m_{SS} é a massa de sólido seco, m_T é a massa total do sistema, U_{bu} é a umidade em base úmida e U_{bs} é a umidade em base seca.

A umidade das sementes foi determinada utilizando-se o ensaio padrão pelo método gravimétrico em estufa a 105 ± 3 °C por 24 h. Para isso, as amostras foram pesadas em placa Petri previamente seca e tarada e anotou-se a massa da amostra antes e após a secagem na estufa. O transporte dessas placas foi feito com papel para não transferir umidade da mão para a placa.

Além disso, determinou-se a umidade das sementes de mamão ao longo do tempo de secagem na estufa a 105 °C por 24 h para a obtenção da cinética de secagem. Para isso anotou-se o peso inicial da amostra úmida, logo após, de tempos em tempos, anotou-se o peso da amostra parcialmente seca. Esse procedimento foi realizado até que o peso da amostra não se alterasse mais com o tempo e o valor final da massa das sementes foi pesado com 24 h. Esse procedimento foi realizado em triplicata para amostras de 10 g cada.

4.3 Caracterização do meio poroso

De acordo com Altino (2019, p. 10), “as propriedades *bulk* representam as características físicas das partículas empacotadas. Tais propriedades influenciam de forma significativa nas características fluidodinâmicas do leito, bem como nos fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na secagem”.

4.3.1 Densidade *bulk* e *bulk* compactada

A densidade *bulk* é dada pela razão entre a massa do material e o volume ocupado por ele. Assim, para esta análise, foi feita a deposição a uma altura fixa, por gravidade de sementes de mamão no interior de uma proveta em pequenas porções, de forma a preencher o volume de 100 mL.

O procedimento utilizado para a determinação da densidade *bulk* compactada foi o seguinte: após a deposição do material dentro de uma proveta de 100 mL, foram realizadas 10 movimentações mecânicas para a sua compactação, utilizando o dispositivo mostrado na Figura 4.5. Essa movimentação ocorreu elevando-se a proveta até a barra horizontal e soltando-a em seguida, provocando assim sua queda até a base da madeira. Ambos os procedimentos para obtenção das densidades foram realizados em triplicata e calculados a partir da Equação 4.12.

$$\rho_{bulk} = \rho_{bc} = \frac{m_{sementes}}{V_{sementes}} \quad (4.12)$$

Em que: $m_{sementes}$ é a massa do material, $V_{sementes}$ é o volume ocupado por ele e ρ_{bc} é a densidade *bulk* compactada.

Figura 4.5 – Aparato experimental para determinação de densidade *bulk* compactada.



Fonte: Da autora (2022).

4.3.2 Porosidade *bulk*

A porosidade do meio poroso se refere aos espaços vazios entre as sementes. Sua determinação foi realizada de duas maneiras:

i. Utilizando o volume calculado a partir das massas:

A porosidade foi obtida a partir do volume dos interstícios e do volume total ocupado pelas partículas, de acordo com a Equação 4.13:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{vazio}}}{V} \quad (4.13)$$

Em que: ε é a porosidade do leito, V_{vazio} é o volume dos interstícios ou espaços vazios e V é o volume total (volume dos interstícios mais o volume das sementes).

Primeiramente pesou-se uma proveta de 100 mL vazia utilizando uma balança analítica. Após isso, a mesma foi preenchida com uma quantidade de água até certa altura, de forma que correspondesse a altura equivalente a 10 mL. Através da diferença dos pesos da proveta contendo água e vazia, determinou-se o peso da água, conseguinte, medindo a temperatura da água utilizando um termômetro e utilizando dados de densidade da água da literatura, determinou-se seu volume.

Após isso, colocou-se na proveta determinada quantidade de sementes de mamão, correspondente a mesma altura de água. O valor da massa de sementes de mamão foi encontrado. Através da densidade aparente determinada anteriormente e da massa das sementes, calculou-se o volume de partículas. O procedimento foi realizado em triplicata.

ii. Utilizando densidade *bulk* compactada e densidade aparente:

A porosidade foi calculada por meio dos valores de densidade *bulk* compactada e densidade aparente (BRAZ; MAIA; FREIRE, 2017), conforme a Equação 4.14.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{bc}}{\rho_{\text{sementes}}} \quad (4.14)$$

Onde: ρ_{bc} é a densidade bulk compactada e ρ_{sementes} é a densidade aparente das sementes.

4.3.3 Ângulo de repouso

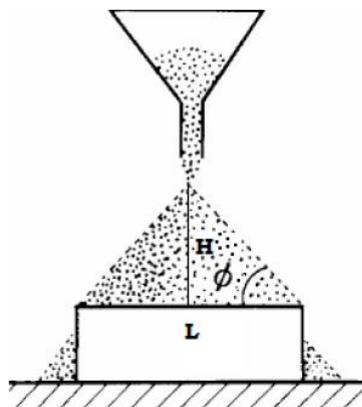
Para auxiliar no entendimento do comportamento fluidodinâmico das partículas

presentes no interior do leito de jorro é importante a determinação do ângulo de repouso, uma vez que esse parâmetro fornece a informação do comportamento de escoabilidade do material no interior do equipamento. Esse ângulo é definido como o ângulo máximo formado pelo material com relação a horizontal e é influenciado pela forma, tamanho, umidade e constituição externa das partículas (BORTOLOTTI et al., 2013).

Além desses parâmetros, de acordo com Al-Hashemi e Al-Amoudi (2018), a densidade, a esfericidade, o número de partículas, a rugosidade da base na qual o material é empilhado e a altura de vazamento também afetam o ângulo de repouso. Ainda, de acordo com os autores, o ângulo de repouso geralmente aumenta com o aumento do teor de umidade e com a diminuição da esfericidade das partículas. Em contraste, o ângulo de repouso diminui ligeiramente com o aumento da quantidade de material utilizado na medição, com o aumento do diâmetro das partículas e com o aumento da densidade.

O ângulo de repouso das sementes de mamão foi determinado por meio da utilização de um funil com orifício de descarga com diâmetro de 2,9 cm e diâmetro superior de 11,6 cm. O funil, utilizado para despejar o material, era mantido a uma distância fixa da superfície lisa, de 27 cm, onde cerca de 100 g do material caía e, em seguida, por meio da obtenção de uma fotografia e a utilização do *software* ImageJ determinou-se o ângulo, conforme apresentado no diagrama esquemático da Figura 4.6 (ESCUDEIRO; FERREIRA, 2014). O experimento foi realizado em triplicata. É válido mencionar que apesar desse método ser muito utilizado para materiais em forma de pó, há trabalhos na literatura que reportam a sua utilização para a medição do ângulo de repouso em material particulado, como sementes (CARPES, 2014; CHEIM et al., 2021; CORREIA et al., 2015; DO NASCIMENTO, 2014; POZITANO; ROCHA, 2011; SANTOS et al., 2018).

Figura 4.6 – Esquema de medição do ângulo de repouso do material.



Legenda: L, H e ϕ são respectivamente o diâmetro, a altura do monte cônico e o ângulo de repouso.

Fonte: Escudeiro e Ferreira (2014).

Segundo o procedimento adotado por Do Nascimento (2014), as sementes foram classificadas de acordo com o grau de escoabilidade recomendado por Jong, Hoffmann e Finkers (1999), conforme representado na Tabela 4.1, em que nota-se comportamento inversamente proporcional do ângulo de repouso em relação ao grau de escoabilidade, ou seja, quanto menor o ângulo de repouso, maior a escoabilidade do material.

Tabela 4.1 – Comportamento de escoabilidade de sólidos em relação ao ângulo de repouso.

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

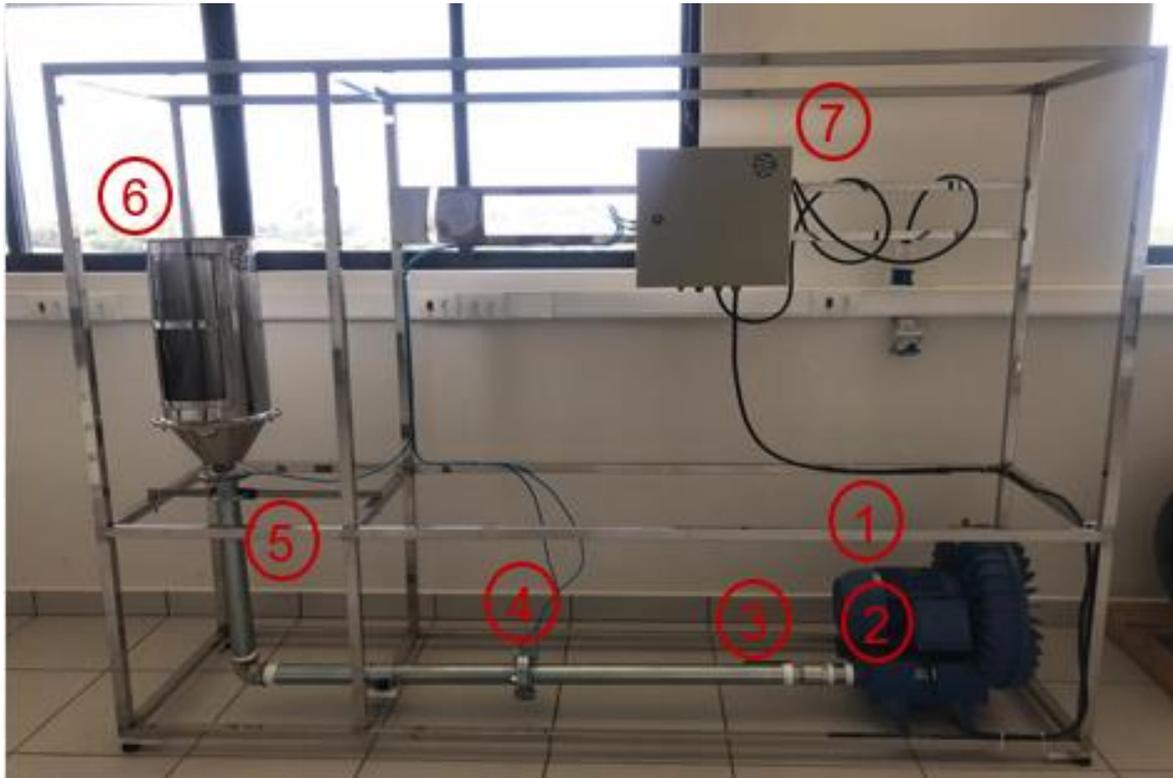
Fonte: Adaptada de Jong, Hoffmann e Finkers (1999).

Além disso, foi possível classificar qualitativamente as sementes de mamão por meio do diagrama de Geldart, a fim de prever seu comportamento fluidodinâmico.

4.4 Unidade experimental

Os experimentos foram realizados em uma unidade de leito de jorro presente no Laboratório de Processos de Separação Mecânica localizado no prédio das Engenharias ABI da Universidade Federal de Lavras, cuja estrutura é apresentada na Figura 4.7. A unidade é composta por uma bancada em aço para suporte do sistema de jorro. O leito de jorro (6) é construído em aço inoxidável e consiste em uma coluna cilíndrica com uma base cônica de 60° e com diâmetro e altura de 0,256 m e 0,508 m, respectivamente, e uma parte com geometria de tronco de cone com diâmetro da base menor e altura, respectivamente, de 0,050 m e 0,176 m. A coluna vem equipada com um visor transparente que permite observar o experimento ao longo do tempo. O ar da secagem é fornecido por um soprador (2) de potência de 7,5 CV e aquecido através de resistências (1). A unidade consta com uma placa de orifício (4) para medição da velocidade do ar de secagem e sensores para aferição da pressão (4 e 5). Além disso, há uma válvula do tipo gaveta (3); inversor de frequência (7) e *software* com interface para aquisição de dados (7). A calibração dos sensores foi realizada conforme apresentado no Apêndice A.

Figura 4.7 – Módulo de secagem de leite de jorro.

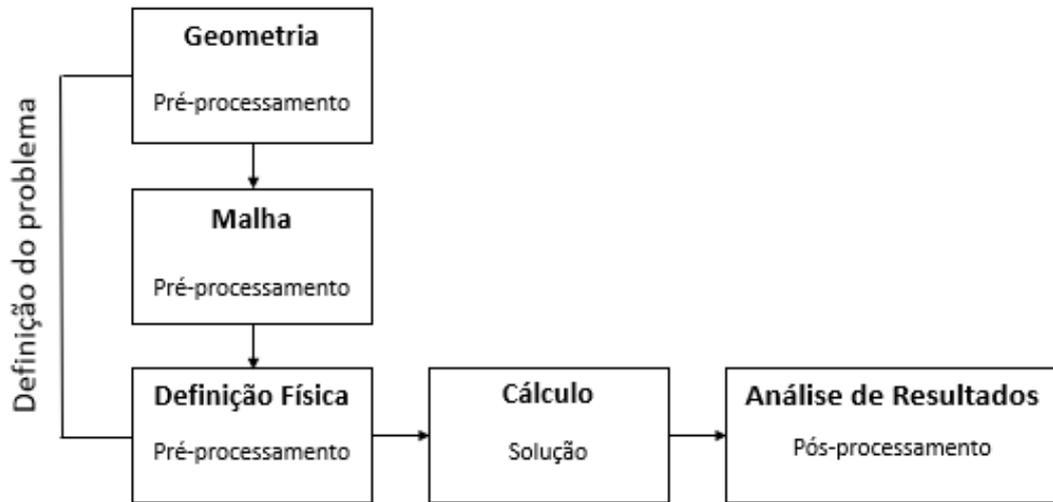


Fonte: Da autora (2022).

4.5 Metodologia numérica

Devido ao fato de se dispor de uma quantidade limitada de sementes de mamão para a realização dos ensaios experimentais e a falta de informações na literatura sobre as condições de escoamento destas sementes em leito de jorro, optou-se por investigar o escoamento de sementes de mamão em leito de jorro, inicialmente, através de simulações numéricas via CFD. Tal estudo auxiliaria no entendimento do comportamento fluidodinâmico das sementes de mamão em leito de jorro e permitiria selecionar de forma mais assertiva as condições para a realização dos ensaios fluidodinâmicos e de secagem. Assim, utilizou-se o *software* ANSYS Fluent[®] 21.0 versão acadêmica para realizar as simulações. As etapas do estudo de simulação são ilustradas na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Etapas do estudo de simulação utilizando a técnica CFD.

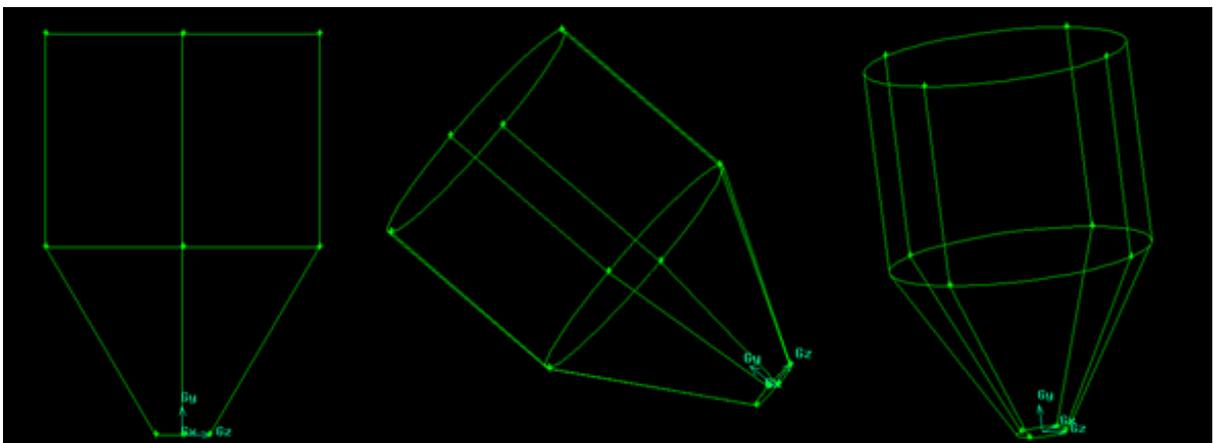


Fonte: Adaptado de Barcelos (2016).

4.5.1 Geometria

A construção da geometria tridimensional do leito de jorro, apresentada na Figura 4.9, foi realizada no *software* GAMBIT versão 2.4.6. A geometria possui duas partes, uma cônica e uma cilíndrica. A parte cônica foi construída com raio de 0,025 m na base e altura de 0,176 m, e a parte cilíndrica com raio de 0,128 m e altura de 0,2 m. Adotou-se uma altura da parte cilíndrica menor que a altura real do leito a fim de diminuir o tempo e custo computacional das simulações.

Figura 4.9 – Geometria do leito de jorro.



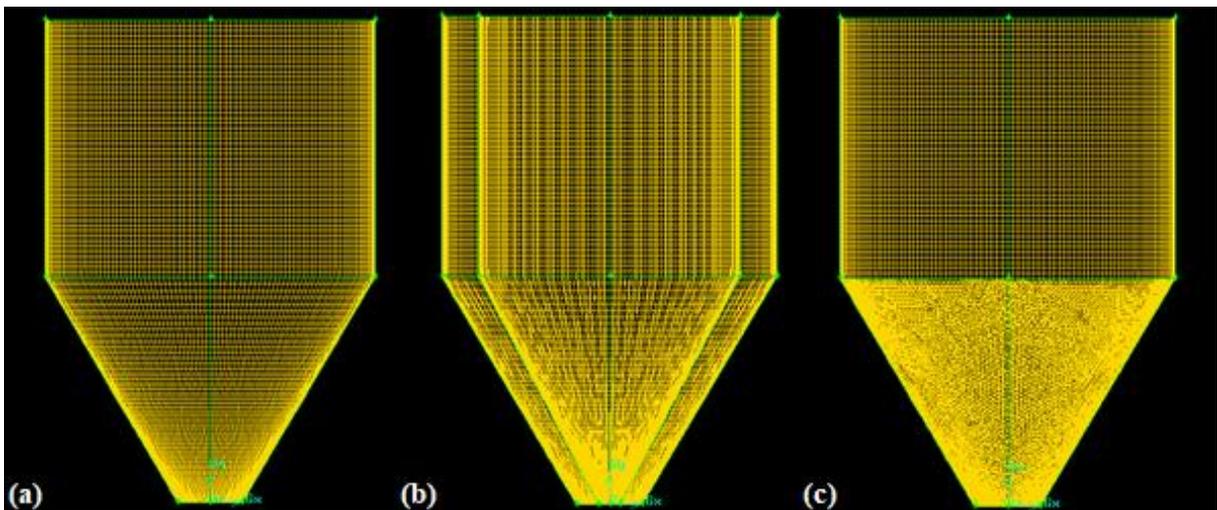
Fonte: Da autora (2022).

4.5.2 Escolha do tipo de malha

Primeiramente, foi feito um estudo para se identificar qual o tipo mais adequado de elementos a serem usados na construção da malha a fim de se garantir melhores parâmetros de qualidade para a mesma. Os parâmetros de qualidade avaliam certas características dos elementos que compõem a malha. Geralmente estão relacionados à disposição, forma e conectividade desses elementos com os seus vizinhos, bem como com a quantidade de elementos e transição entre eles. Estes parâmetros usualmente são chamados de métricas da malha, tendo como destaque a razão de aspecto (*aspect ratio*), assimetria ou distorção (*skewness*) e a ortogonalidade (*orthogonal quality*).

Assim, foi realizada a construção de três malhas diferentes, através do *software* GAMBIT. A primeira malha foi estruturada com elementos hexaédricos em toda sua extensão (Figura 4.10 (a)), a segunda malha também contou com elementos hexaédricos, porém, com um refinamento diferenciado próximo às paredes da geometria (Figura 4.10 (b)) e a terceira malha foi estruturada com elementos tetraédricos na parte cônica e hexaédricos na parte cilíndrica (Figura 4.10 (c)). Para cada configuração de malha citada, os números de células e parâmetros de qualidade foram obtidos por meio do *software* Gambit® e do *software* ANSYS Fluent® R21.0 *Academic*.

Figura 4.10 – Testes de malha (a) malha 1 (b) malha 2 (c) malha 3.



Fonte: Da autora (2022).

O parâmetro de qualidade dado pela razão de aspecto ou *aspect ratio* está relacionado ao grau de alongamento/deformação dos elementos, podendo ser determinado através da razão entre a maior e a menor aresta do elemento. Assim, este parâmetro avalia a proporcionalidade, sendo que o valor 1 representa a melhor proporcionalidade, ou seja, lados

iguais. O desejável é que esta razão seja tão menor quanto for possível e usualmente é recomendado que o valor máximo da razão de aspecto seja inferior a 100.

De acordo com ANSYS Meshing (2010), a assimetria ou *skewness* é uma das principais medidas de qualidade para uma malha e determina o quão perto do ideal, isto é, equilateral ou equiangular, uma face ou uma célula se encontra. O valor 0 indica uma célula equilateral (melhor) e o valor 1 indica uma célula completamente degenerada (pior). Células degeneradas são caracterizadas por nós que são quase coplanares (ou colineares em 2D) e podem facilmente diminuir a precisão e desestabilizar a solução. Portanto, faces e células altamente distorcidos devem ser evitados.

A Tabela 4.2 fornece um guia geral para a relação entre o *skewness* e a qualidade das células. No caso das malhas 3D, a maioria das células deve ser de boa ou excelente qualidade, mas uma pequena porcentagem geralmente estará na faixa razoável e haverá até mesmo algumas células pobres. Geralmente é recomendado que a malha apresente um valor máximo de *skewness* inferior a 0,95 e valor médio significativamente menor.

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 Meshing (2010).

Já o parâmetro ortogonalidade ou *Orthogonal Quality* diz respeito ao alinhamento dos vetores normais às faces do elemento com os vetores dos centroides do elemento e dos seus vizinhos. Quanto mais desalinhados, pior a qualidade (LOURENÇO, 2019). Assim, o conceito de ortogonalidade da malha está associado ao quanto os ângulos entre faces de elementos ou entre arestas de elementos adjacentes estão próximos de um ângulo ideal, sendo os valores ideais de 90° para elementos com faces quadrilaterais e 60° para elementos com faces triangulares (ANSYS MESHING, 2010).

As piores células terão uma qualidade ortogonal mais próxima de 0 e as melhores mais próximas de 1. Na Tabela 4.3 é apresentado o espectro mais baixo permitido para os critérios de qualidade ortogonal, sendo o valor mínimo aceitável de 0,15.

Tabela 4.3 – Espectro de qualidade ortogonal da malha.

Inaceitável	Ruim	Aceitável	Bom	Muito bom	Excelente
0 - 0,001	0,001 - 0,14	0,15 - 0,20	0,20 - 0,69	0,70 - 0,95	0,95 - 1

Fonte: Adaptado de Ozen (2014).

É importante que seja respeitados os limites e seguido o recomendado para cada parâmetro de qualidade, uma vez que se não apresentarem qualidade boa pode-se ter erros inadmissíveis na previsão numérica do escoamento do fluido nas faces, além de se ter dificuldades de convergência e prejudicar a acurácia dos resultados (ANSYS CFX, 2011; ANSYS FLUENT, 2013).

4.5.3 Teste de independência de malha

Uma vez escolhida a configuração de malha a ser aplicada na geometria tridimensional representativa do leito de jorro, procedeu-se um teste de independência de malha. Sabe-se que a quantidade de células em determinada malha pode modificar os resultados numéricos obtidos e influenciar no custo de processamento computacional, inviabilizando o processo. Assim, foram feitos testes para a configuração tridimensional de malha hexaédrica com diferentes números de células (180225, 281216 e 354368).

Para proceder os testes, foram realizadas simulações numéricas utilizando o *software* ANSYS Fluent®, aplicando-se variadas velocidades do ar de entrada (2, 5, 8, 15, 20 e 22 m/s) para um leito preenchido com sementes com altura de 0,08 m da parte cônica. Para cada configuração de malha, e utilizando os resultados de queda de pressão na entrada do leito em função da velocidade do ar setada, foi possível obter a curva característica do leito de jorro. Para cada caso, eram simulados cerca de 5 a 8 s e realizava-se uma média da pressão a partir do instante cujos resultados apresentavam um comportamento estável.

O teste de independência de malha realizado foi feito dessa maneira com o intuito de encontrar o refinamento mínimo necessário para que a malha apresentasse resultados independentes do seu grau de refinamento e assim, utilizar aquela malha que tivesse menor número de células para economizar tempo de simulação, uma vez que o escoamento no interior do leito de jorro é bastante complexo, o que demanda longo tempo de simulação do problema.

4.5.4 Definição física e cálculos

Foram definidas as características físicas do problema tais como paredes, interiores,

entradas e saídas do equipamento e as fases que compõem o seu interior, correspondentes a fluido (ar) e sólido (sementes). Além das características do escoamento, também foram definidas as 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.

Para simular o escoamento multifásico presente no leito de jorro empregou-se o Modelo Euleriano Granular Multifásico, que utiliza a abordagem Euler-Euler, e trata todas as fases como contínuas e interpenetrantes, fazendo-se necessário o uso do conceito de fração de volume para cada uma das fases envolvidas. Conforme descrito por Duarte, Murata e Barrozo (2005), esse modelo é adequado para simulação da fluidodinâmica que envolve uma alta concentração de partículas com frações de volume de sólidos variada ao longo do volume de controle. Além disso, a não elasticidade dos choques entre as partículas, efeitos da variação média da energia cinética devido a troca de momento entre as fases, efeitos como temperatura granular, pressão de sólidos e viscosidades (cinética, colisional e friccional) são considerados pelo modelo.

Ademais, as leis de conservação de massa e momento devem ser satisfeitas para cada fase individualmente. A descrição adequada das forças interfaciais, presentes nas equações de balanço de quantidade de movimento de todas as fases, é de suma importância na precisão das simulações, sendo a força de arraste a principal força que age sobre as partículas. Assim, selecionou-se o Modelo de Gidaspow et al. (1992 apud DUARTE, 2006) para o arraste ar-semente.

Definiu-se como condições de contorno a velocidade do fluido na entrada e a referência de pressão na saída do leito. Para o acoplamento pressão-velocidade utilizou-se o algoritmo *Phase Coupled SIMPLE* e para discretizar a pressão utilizou-se o algoritmo PRESTO. Para o modelo de turbulência selecionou-se o modelo k-epsilon por ser o mais utilizado devido a melhor conversão, ele considera equações de transporte que representam a energia cinética e a taxa de dissipação de turbulência (MALEKJANI; JAFARI, 2018; (NORTON; SUN, 2006).

As condições de contorno adotadas e todos os parâmetros utilizados para o teste de independência de malha e demais simulações realizadas neste trabalho estão expostas na Tabela 4.4. Para todas as simulações foi estabelecida uma distribuição inicial homogênea de partículas no leito de acordo com a altura ou massa definida para o teste simulado e a velocidade do ar de entrada foi definida de acordo com o requerido no planejamento realizado. Além disso, os dados das sementes de mamão obtidos experimentalmente e

utilizados nas simulações foram: diâmetro médio de Sauter, densidade aparente e porosidade.

Tabela 4.4 – Condições de contorno e parâmetros utilizados nas simulações.

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

Fonte: Da autora (2022).

4.5.5 Padrões de escoamento para diferentes alturas de partículas no leito

Testes foram realizados variando-se a velocidade de entrada do ar (10, 15 e 20 m/s) e a altura de sementes presentes na parte cônica do leito de jorro (0,08; 0,10 e 0,12 m) a fim de se identificar as condições em que um jorro estável se estabelecia no leito e se entender melhor os padrões de escoamento gerados. Esses resultados numéricos foram importantes para auxiliar na escolha da altura de sementes no leito de jorro visando obter as condições mais adequadas para os ensaios fluidodinâmicos e de secagem. Para isso, realizou-se um

planejamento fatorial 3^k , considerando-se duas variáveis e totalizando 9 experimentos, conforme mostrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Simulações realizadas para diferentes alturas de partículas no leito.

Experimento	Altura do leito de sementes (m)	Velocidade do ar de entrada (m/s)
1	0,08	10
2	0,08	15
3	0,08	20
4	0,10	10
5	0,10	15
6	0,10	20
7	0,12	10
8	0,12	15
9	0,12	20

Fonte: Da autora (2022).

4.5.6 Infraestrutura computacional

As simulações foram realizadas em um notebook com processador INTEL®Core™i3-7020U CPU 2.3GHz 64GB SSD 240GB e em um computador INTEL®Core i7 8700 3.2GHz 16GB SSD 240GB PRO Certo PC.

4.6 Metodologia experimental

4.6.1 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro

O comportamento fluidodinâmico das sementes no leito de jorro foi caracterizado através do levantamento da curva característica de queda de pressão *versus* velocidade do ar de jorro, e determinação da velocidade de jorro mínimo, queda de pressão de jorro estável e queda de pressão máxima.

Inicialmente, foi adicionado ao leito 557 g de sementes, equivalente à altura de 0,10 m da parte cônica do secador. Em seguida, ar foi injetado pelo orifício de entrada, de forma a obter o menor valor de velocidade possível, medida com o auxílio da placa de orifício, e o valor correspondente da queda de pressão do leito foi determinado com o auxílio do *software* de aquisição de dados. A velocidade do ar na entrada do leito foi gradativamente aumentada até a máxima capacidade do soprador, quando então, se iniciou o procedimento inverso, ou seja, diminuiu-se gradualmente a velocidade do ar e mediu-se a queda de pressão. À medida que o processo foi realizado, mudanças observadas visualmente no comportamento do leito de jorro foram anotadas.

4.6.2 Ensaios de secagem

Foram estudadas as seguintes variáveis operacionais durante o processo de secagem em leito de jorro: velocidade e temperatura do ar na entrada do leito. Assim como para os ensaios fluidodinâmicos, a carga do leito foi fixada em 557 g, correspondente a uma altura de 0,10 m da parte cônica. A partir da observação da curva característica e da estabilidade do escoamento, foram selecionadas as velocidades a serem utilizadas nos ensaios de secagem. Já os valores de temperatura utilizados seguiram as limitações operacionais do equipamento. As condições operacionais de temperatura e velocidade do ar, adotadas durante os ensaios de secagem são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Planejamento dos ensaios de secagem em leito de jorro com variáveis codificadas.

Experimento	Temperatura média do ar de entrada (°C)	Velocidade do ar na entrada do leito (m/s)
1	40 (-1)	24 (-1)
2	40 (-1)	31 (0,167)
3	40 (-1)	36 (1)
4	50 (-0,167)	24 (-1)
5	50 (-0,167)	31 (0,167)
6	50 (-0,167)	36 (1)
7	50 (-0,167)	36 (1)
8	50 (-0,167)	36 (1)
9	64 (+1)	24 (-1)
10	64 (+1)	31 (0,167)
11	64 (+1)	36 (1)

Fonte: Da autora (2022).

Para este planejamento, a adimensionalização (codificação) das variáveis independentes estudadas, segue o formato apresentado nas Equações 4.15 e 4.16 para a temperatura e velocidade do ar, respectivamente.

$$T^* = \frac{T - 52}{12} \quad (4.15)$$

$$V^* = \frac{V - 30}{6} \quad (4.16)$$

Em que: T* e V* são os valores das variáveis codificadas e T e V são os valores das variáveis originais.

O processo de secagem se iniciou com o fornecimento de ar através do soprador para o equipamento vazio; este ar era aquecido por um conjunto de resistências. O aquecimento do ar

ocorria até que a temperatura atingisse o valor desejado. Uma vez atingida a temperatura desejada, o equipamento era desligado e rapidamente alimentado com 557 g de sementes previamente pesadas e com sua umidade inicial determinada. Em seguida, o equipamento era religado e a velocidade do ar de jorro era ajustada para o valor desejado. Feitos todos os ajustes necessários, iniciava-se a contagem do tempo equivalente a 15 min. Após atingir o tempo estipulado, a alimentação de ar era desligada e as partículas removidas do leito, três amostras de sementes eram pesadas e levadas a estufa para secagem a 105 °C por 24 h.

Os dados experimentais obtidos foram analisados por métodos estatísticos para quantificar os efeitos das variáveis independentes. Para a análise de variância da regressão, as variáveis cujos parâmetros relacionados possuíam p-valor superior a 5% foram eliminadas. A significância do modelo foi avaliada utilizando o quadrado do coeficiente de correlação múltipla bem como através de uma análise de resíduos.

Com a eliminação de todos os parâmetros não significativos e suas respectivas variáveis, foi encontrada uma equação preditiva (modelo reduzido) para a taxa de secagem do material. Essa equação possibilitou avaliar os efeitos de cada variável na resposta estudada e determinar a intensidade dessa influência. Além disso, permitiu que, para a faixa de valores estudados, fossem encontradas as condições que favoreçam a obtenção da taxa máxima de remoção de umidade do material.

4.6.3 Determinação da taxa de secagem

A umidade removida por tempo de secagem, ou seja, a taxa de secagem (η) é definida como a razão entre a diferença de umidade inicial e final dos sólidos no processo pelo tempo de secagem, e calculada de acordo a Equação 4.16. A taxa de secagem depende de variáveis de processo como temperatura, velocidade, umidade relativa do ar de secagem e características das sementes.

$$\eta = \frac{U_i - U_f}{t} \quad (4.16)$$

Em que: U_f é a umidade final, U_i é a umidade inicial das sementes de mamão e t é o tempo de secagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão, serão apresentados e discutidos os resultados experimentais e simulados da secagem de sementes de mamão em leito de jorro. Os resultados incluem a caracterização do material, os resultados numéricos contendo a geometria obtida, o teste de independência de malha e a análise do escoamento para diferentes condições no leito de partículas, além dos resultados dos ensaios experimentais contendo a caracterização fluidodinâmica do leito de jorro e os testes de secagem da semente de mamão.

5.1 Caracterização das sementes e do meio poroso

O diâmetro médio de Sauter das sementes *in natura* e após secas com exotesta e sem exotesta é apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Diâmetro médio de Sauter das sementes de mamão.

Sementes	Diâmetro médio <i>in natura</i> (mm)	Diâmetro médio após secas (mm)
Sem exotesta	3,633 ($\pm 0,016$)	3,055 ($\pm 0,028$)
Com exotesta	4,469 ($\pm 0,053$)	2,985 ($\pm 0,003$)

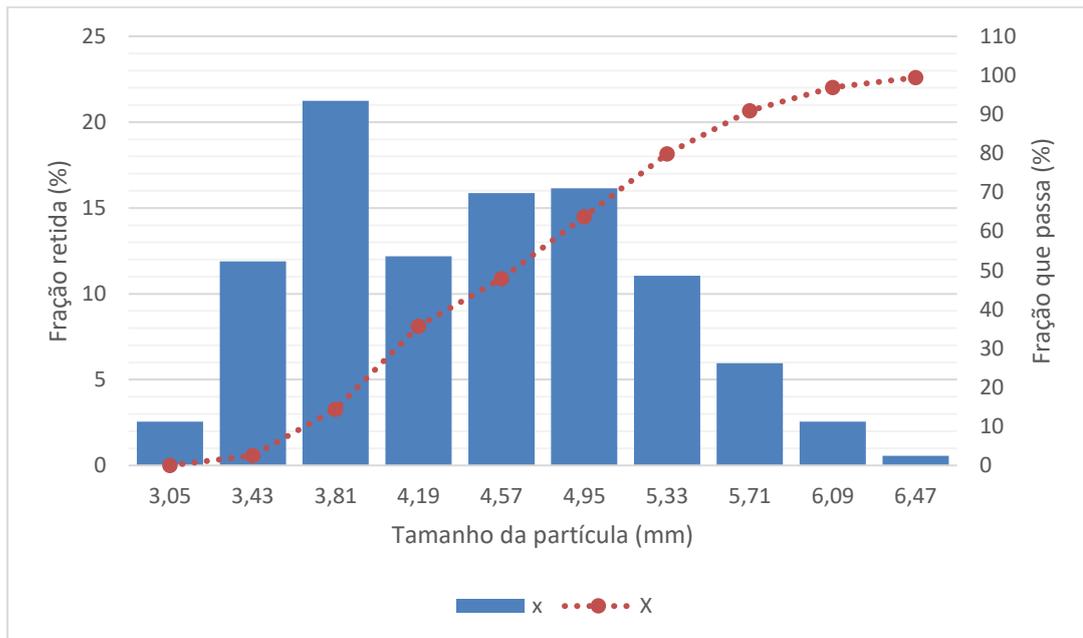
Fonte: Da autora (2022).

Notou-se que, o material *in natura* com exotesta possui diâmetro superior ao material *in natura* sem exotesta, fato já esperado, pois a presença da exotesta garante um maior diâmetro das sementes, uma vez que apresenta uma camada mucilaginosa. A Figura 5.1 mostra a distribuição granulométrica das sementes *in natura* com exotesta. Ademais, de acordo com Tellabide et al. (2020), quando a razão entre o diâmetro de entrada do fluido e o diâmetro das partículas é maior que 20-30 vezes o diâmetro das partículas, o regime de escoamento é considerado instável. O que foi observado para ambas as sementes em que para o material *in natura* sem e com exotesta obteve-se valores de 13,762 e 11,188, respectivamente. Já para as sementes secas sem e com exotesta, obteve-se 16,366 e 16,750, respectivamente. Ou seja, todas as variedades abordadas de sementes (*in natura*, secas, com exotesta e sem exotesta) geram regimes de escoamento instável.

Através da frequência relativa (Figura 5.1), isto é, a fração retida na peneira, nota-se que as peneiras de abertura 3,81, 4,57 e 4,95 mm retiveram a maior parte da amostra (21, 15 e 16%, respectivamente), ou seja, a maioria do diâmetro das sementes *in natura* encontra-se próximo desses valores. A menor fração retida representa 3% da amostra com diâmetro de 3,05 mm, indicativo este do menor diâmetro possível da amostra. Em relação a distribuição cumulativa, ou seja, a fração que passa na peneira, pode-se notar que 99% da amostra possui

diâmetro inferior a 6,47 mm. Assim, pode-se dizer que 86% das sementes de mamão *in natura* com exotesta possuem diâmetro igual ou superior a 3,81 mm. O diâmetro médio de Sauter obtido foi de 4,469 ($\pm 0,053$) mm, comparando-se este valor com o obtido por Arim (2014), que foi de 5,6 ($\pm 0,22$) mm, tem-se uma pequena diferença, que pode estar relacionada à variabilidade natural inerente aos materiais.

Figura 5.1 – Curva granulométrica das sementes de mamão *in natura* com exotesta.



Legenda: x representa a frequência relativa e X a frequência acumulada.
Fonte: Da autora (2022).

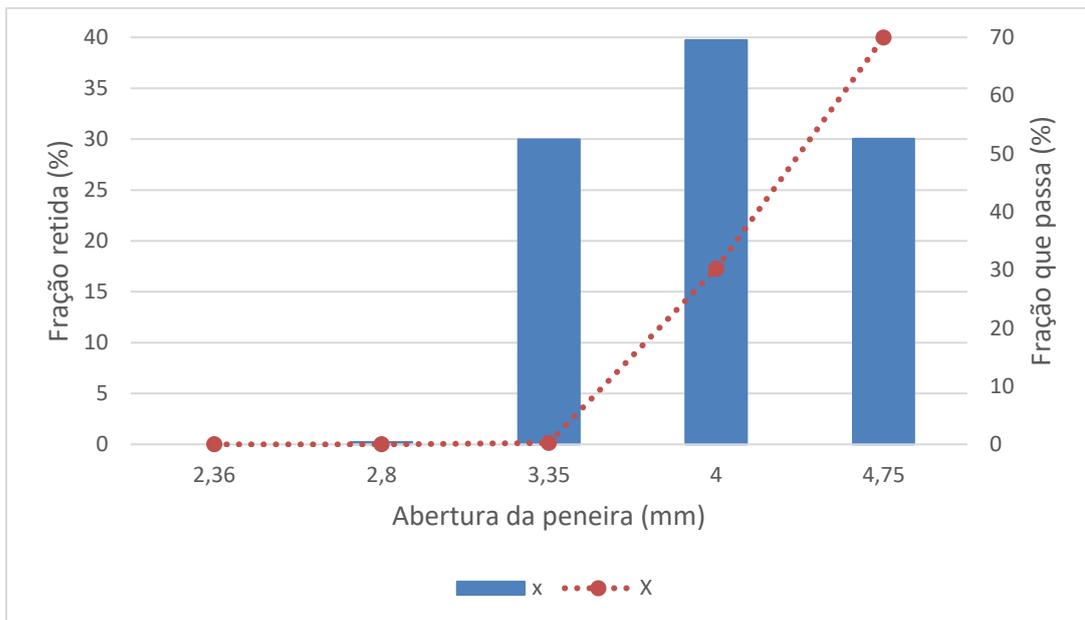
Após a secagem, as sementes com exotesta apresentaram diâmetros muito próximos das sementes sem exotesta (2,985 ($\pm 0,003$) mm) e 3,055 ($\pm 0,028$), respectivamente), sendo o valor para as sementes sem exotesta apenas ligeiramente superior. Nota-se também uma diferença entre o valor do diâmetro médio das sementes com exotesta após secas obtido neste trabalho e o encontrado por Arim (2014), igual a 4,36 ($\pm 0,26$) mm. As curvas granulométricas para as sementes após secas sem exotesta e com exotesta podem ser observadas no Apêndice B.

A curva granulométrica das sementes de mamão *in natura* sem exotesta, obtida a partir dos resultados do peneiramento, é apresentada na Figura 5.2. É importante notar que o valor obtido para o diâmetro médio de Sauter de 3,633 ($\pm 0,016$) mm, é próximo do valor de 3,24 ($\pm 0,10$) mm encontrado por Chielle et al. (2016).

Através da distribuição de frequência relativa (Figura 5.2), nota-se que a peneira de abertura 4 mm reteve a maior parte da amostra, 40 % desta, o que representa o diâmetro da

maioria das sementes. Assim, esperava-se que o diâmetro médio de Sauter fosse próximo desse valor. Para o diâmetro de 2,8 mm teve-se uma fração retida de 0,2%, o que indica que este é o menor diâmetro possível obtido para a amostra. Já observando a distribuição cumulativa, 70% das partículas possuem diâmetro menor que 4,75 mm, havendo diâmetros iguais ou maiores do que este na amostra. Dessa maneira pode-se inferir que 70% das partículas têm diâmetro igual ou maior do que 4 mm.

Figura 5.2 – Curva granulométrica das sementes de mamão *in natura* sem exotesta.



Legenda: x representa a frequência relativa e X a frequência acumulada.

Fonte: Da autora (2022).

No entanto, o valor calculado para o diâmetro médio de Sauter das sementes sem exotesta e *in natura*, conforme apresentado na Tabela 5.1, foi de 3,633 mm. Nota-se que este valor é distante do valor que concentra maior parte da amostra segundo a Figura 5.2. Para realizar uma caracterização mais precisa da amostra seria necessário utilizar uma peneira de *mesh* 3,5, não disponível. Com essa peneira, uma melhor distribuição de frequência seria obtida e o diâmetro médio seria mais representativo da amostra.

Através de uma regressão não linear realizada no *software* Statistica 7, ajustou-se o modelo RRB aos dados da análise granulométrica, cujo coeficiente de determinação (R^2) apresentou valor de 0,983, obtendo-se a Equação 5.1, que relaciona a fração mássica cumulativa de material para qualquer diâmetro desejado.

$$X_i = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D_i}{4,623}\right)^{8,283}\right] \quad (5.1)$$

O valor de diâmetro médio de Sauter encontrado segundo o modelo foi de 4,260 mm, apresentando uma diferença percentual de 17,26% em relação ao obtido pela Equação 4.1. Considerando o diâmetro encontrado por Chielle et al. (2016), têm-se uma diferença considerável e essa se deve ao fato de que os autores também não utilizaram peneiras de menor tamanho e, conseqüentemente, pode-se ter uma limitação na determinação do diâmetro médio que representasse a maioria das sementes, ou ainda, devido ao fato de que o presente trabalho utilizou sementes advindas de duas variedades de mamão e os autores utilizaram apenas uma variedade.

Encontrou-se também a esfericidade das sementes, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Medida de esfericidade das sementes.

Sementes	Esfericidade <i>in natura</i> (%)	Esfericidade após secas (%)
Sem exotesta	81,967 (± 2,855)	77,867 (± 4,877)
Com exotesta	85,570 (± 2,412)	74,044 (± 2,562)

Fonte: Da autora (2022).

Os valores de esfericidade foram próximos para ambas as sementes com e sem exotesta. As sementes *in natura* sem exotesta tendem a apresentar esfericidade menor que as sementes com exotesta, uma vez que a película confere um formato mais arredondado às partículas. Já após secas, as sementes sem exotesta tendem a apresentar esfericidade maior se comparada às sementes com exotesta.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato de as sementes com exotesta após secas apresentarem um formato mais alongado, uma vez que a película é comprimida e protege a mesotesta da semente. Em contrapartida, as sementes sem exotesta, por apresentarem a mesotesta exposta, sendo essa uma camada que forma protuberâncias, apresentam um formato mais arredondado, logo maior esfericidade. Chielle et al. (2016) também determinaram a esfericidade de sementes de mamão sem exotesta *in natura* obtendo um valor de 77,43 (±3,29)%, próximo ao encontrado no presente trabalho.

Os valores de densidade aparente da semente são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valores de densidade aparente das sementes.

Sementes	Densidade aparente <i>in natura</i> (g/mL)	Densidade aparente após secas (g/mL)
Sem exotesta	1,062 ($\pm 0,007$)	0,565 ($\pm 0,012$)
Com exotesta	1,015 ($\pm 0,003$)	0,568 ($\pm 0,010$)

Fonte: Da autora (2022).

Para as sementes após secas, nota-se que os valores de densidade foram praticamente iguais e inferiores à densidade da água. Já para as sementes *in natura*, pode-se observar que, ambas as sementes apresentaram densidade superior à da água, sendo a densidade aparente das sementes sem exotesta ligeiramente maior que das sementes com exotesta. Chielle et al. (2016) mediram a densidade aparente de sementes de mamão *in natura* sem exotesta e encontraram o valor equivalente a 0,946 ($\pm 0,009$) g/mL. Os autores justificaram o alto valor da densidade aparente devido ao alto valor de umidade das sementes, sendo este resultado coerente com o apresentado em outros trabalhos como de Carlesso (2009) e Costa (2013).

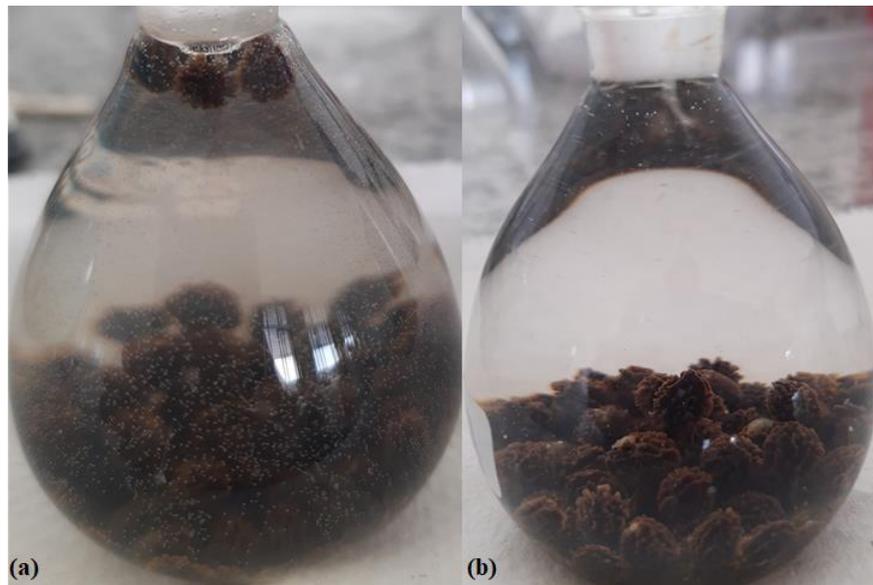
A partir da observação dos valores de densidades apresentadas na Tabela 5.3, pode-se concluir, em primeiro momento, que para a operação de secagem, a fluidização do material *in natura* pode ser mais difícil de ocorrer devido a altos valores de densidade, o que pode levar a uma maior resistência ao escoamento do fluido e, conseqüentemente, maiores valores de queda de pressão. Em contrapartida, apesar do baixo valor de densidade do material após seco, a fluidização dele pode ocorrer de maneira desordenada justamente pelo fato de não oferecer resistência considerável para o ar escoar. Além disso, ao se realizar secagem das sementes de mamão *in natura* é de se esperar obter maior queda de pressão se comparado ao material após seco, uma vez que *in natura* as sementes apresentam maiores diâmetro e densidade aparente, corroborando para uma maior resistência ao escoamento do ar.

Durante a medição da densidade aparente com água destilada observou-se o aparecimento de pequenas bolhas de ar junto às partículas e à parede do picnômetro, como observado na Figura 5.3 (a). Visando eliminar possíveis erros associados, o procedimento foi repetido para as sementes *in natura* sem exotesta utilizando álcool isopropílico como solvente (Figura 5.3 (b)). Além disso, como se observa na Figura 5.3 e na Tabela 5.3, a densidade das sementes é maior do que a do álcool isopropílico e da água, e, assim, elas se localizaram na parte inferior do picnômetro. No procedimento com o álcool foi encontrado um valor de densidade aparente de 1,078 ($\pm 0,009$) g/mL para a semente de mamão *in natura* sem exotesta, confirmando a precisão dos resultados realizados com água.

De acordo com o diagrama de Geldart, pode-se classificar as sementes de mamão sem exotesta e com exotesta, tanto *in natura* quanto secas, como pertencentes ao grupo particulado

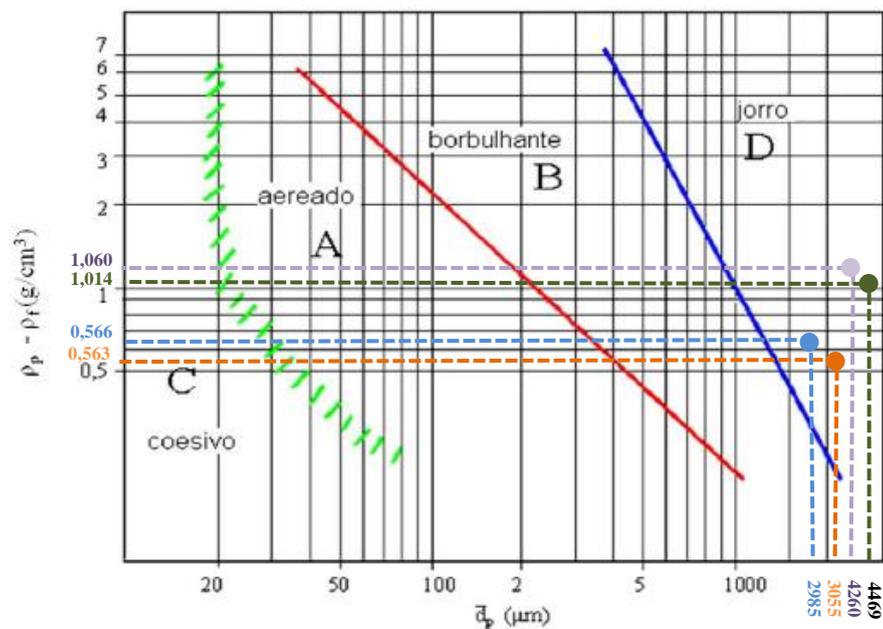
D, composto por partículas jorráveis grandes e/ou muito densas, cuja fluidização é considerada instável e dificultada devido a forma irregular e tamanho das partículas, conforme a Figura 5.4.

Figura 5.3 – Medição da densidade aparente de sementes de mamão *in natura* sem exotesta utilizando como solvente (a) água destilada; (b) álcool isopropílico.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 5.4 – Classificação das sementes de mamão pelo diagrama de Geldart.



Legenda: As sementes sem exotesta *in natura* e após secas apresentam coloração lilás e laranja, respectivamente. Já as sementes com exotesta *in natura* e após secas apresentam coloração verde escuro e azul claro, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Cortez (2002 apud DO NASCIMENTO, 2014).

As medidas de densidade *bulk* e densidade *bulk* compactada para as sementes de mamão são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores de densidade *bulk* e densidade *bulk* compactada das sementes.

Sementes	Densidade <i>bulk in natura</i> (g/mL)	Densidade <i>bulk compactada in natura</i> (g/mL)	Densidade <i>bulk após secas</i> (g/mL)	Densidade <i>bulk compactada após secas</i> (g/mL)
Sem exotesta	0,387 (\pm 0,017)	0,411 (\pm 0,021)	0,192 (\pm 0,003)	0,203 (\pm 0,003)
Com exotesta	0,651 (\pm 0,037)	0,667 (\pm 0,040)	0,254 (\pm 0,002)	0,261 (\pm 0,002)

Fonte: Da autora (2022).

Pode-se observar que a compactação não exerce influência de forma expressiva na densidade *bulk* para as sementes. Além disso, as sementes com exotesta apresentaram maiores valores para ambas as densidades. No entanto, pode-se notar que *in natura* a diferença é de quase o dobro do valor, uma vez que as sementes *in natura* com exotesta apresentam a camada mucilaginosa, já após seca essa diferença é menor, uma vez que apesar de se ter a presença da película protetora dos poros, não se tem a camada mucilaginosa. Esse resultado demonstra que em relação a fluidização do material no interior do leito de jorro, o material com exotesta poderá oferecer maior resistência ao escoamento do fluido se comparado ao sem exotesta, uma vez que apresenta maior densidade *bulk*, tanto *in natura* quanto secas. Os valores de densidade *bulk* para as sementes com exotesta, tanto *in natura*, quanto secas, estão próximos aos valores encontrados por Arim (2014). O autor encontrou valores de, respectivamente, 0,673 (\pm 0,015) g/mL para as sementes *in natura* e 0,217 (\pm 0,005) g/mL para as sementes após secas.

Os valores de porosidade obtidos pelos dois métodos descritos na seção materiais e métodos foram bem próximos. A Tabela 5.5 apresenta os valores de porosidade encontrados a partir da massa.

Tabela 5.5 – Valores de porosidade do leito de partículas formado pelas sementes.

Sementes	Porosidade <i>bulk in natura</i>	Porosidade <i>bulk após secas</i>
Sem exotesta	0,598 (\pm 0,019)	0,717 (\pm 0,011)
Com exotesta	0,313 (\pm 0,011)	0,641 (\pm 0,017)

Fonte: Da autora (2022).

As medições de porosidade apresentaram resultados conforme o esperado, uma vez que as sementes sem exotesta apresentam maior porosidade, já que apresentam seus poros expostos. Após secas, ambas as sementes, apresentam maior porosidade quando comparadas com a semente *in natura*. Assim, pode-se dizer que em relação a porosidade *bulk*, espera-se

que o material *in natura* sem exotesta seque de maneira mais fácil, se comparado ao material com exotesta, uma vez que a porosidade do leito é maior oferecendo assim maior possibilidade de contato ar-sementes. Ademais, a fluidização das sementes após secas poderá oferecer menor resistência a passagem do ar e garantir menor queda de pressão se comparado ao material *in natura*. Além disso, esses resultados se mostraram relativamente próximos ao encontrado por Arim (2014), que mediu valores de porosidade correspondentes a 0,38 ($\pm 0,01$) para sementes com exotesta *in natura* e 0,75 ($\pm 0,01$) para sementes após serem secas.

Outro resultado encontrado foi o peso de 1000 sementes (PMS) com e sem exotesta *in natura* e após secas, apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Peso de 1000 sementes.

Sementes	PMS <i>in natura</i> (g)	PMS após secas (g)
Sem exotesta	43,388 ($\pm 3,249$)	13,140 ($\pm 0,586$)
Com exotesta	74,425 ($\pm 2,396$)	15,556 ($\pm 0,790$)

Fonte: Da autora (2022).

Observa-se que o peso das sementes *in natura* é bem menor para as sementes sem exotesta do que com exotesta. Em contrapartida, após secas, o peso de ambas as sementes apresenta boa aproximação, uma vez que a influência da camada mucilaginosa é praticamente eliminada. Ademais, pode-se perceber a influência da umidade nesse parâmetro, já que as sementes *in natura*, cuja umidade é maior, apresentam PMS maiores. Em contrapartida, para as sementes após secas, cuja umidade diminui, o PMS também se apresenta menor. Pode-se dizer também que de acordo com esse parâmetro, a fluidização do material após seco pode ocorrer de maneira mais fácil, uma vez se tem menor peso e, conseqüentemente, menor resistência ao ar, se comparado às sementes *in natura*. Além disso, de acordo com Brasil (2009), as sementes de mamão são consideradas pequenas pois possuem tamanho tal que o peso de mil sementes é inferior a 200 g.

Ademais, determinou-se os valores de umidade das sementes (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 – Medida da umidade das sementes *in natura*.

Sementes	Umidade b.u. (%)	Umidade b.s.
Sem exotesta	73,999 ($\pm 1,562$)	2,858 ($\pm 0,215$)
Com exotesta	79,754 ($\pm 0,900$)	3,947 ($\pm 0,220$)

Fonte: Da autora (2022).

As sementes sem exotesta *in natura* apresentaram valores de umidade inferiores à aqueles medidos para as sementes com exotesta. Chielle et al. (2016) determinaram a umidade

das sementes sem exotesta *in natura*, também por método de estufa, e obtiveram o valor correspondente a 79 ($\pm 1,26$)% b.u., valor este próximo ao encontrado no presente trabalho. Segundo Silva et al. (2018), produtos com alto teor de umidade têm uma maior coesão entre as partículas, tendem a se agregar e, conseqüentemente, aumentar o atrito interno. Assim, pode-se dizer que as sementes sem exotesta apresentam menor atrito interno e facilitam a passagem de ar, corroborando na dinâmica no interior do leito de jorro.

Por fim, determinou-se o ângulo de repouso das sementes de mamão, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Medida do ângulo de repouso para as sementes de mamão.

Sementes	Ângulo de repouso para as sementes (°)	
	<i>In natura</i>	Após secas
Sem exotesta	32,07 ($\pm 1,62$)	30,70 ($\pm 0,26$)
Com exotesta	30,87 ($\pm 2,24$)	0,00 ($\pm 0,00$)

Fonte: Da autora (2022).

Pode-se observar, de acordo com a Tabela 5.8, que os valores de ângulo de repouso obtidos para as sementes *in natura* e secas apresentaram valores próximos. Os resultados encontrados foram semelhantes aos já relatados na literatura como para cevada com valor de 29,07° (SANTOS et al., 2018), milho com medida de 31,72° (CARPES, 2014), sorgo com valor correspondente a 32,70° (CORREIA et al., 2015) e painço com valor de 32,2° (DO NASCIMENTO, 2014).

De acordo com a Tabela 4.1, as sementes *in natura* com e sem exotesta e sem exotesta após secas podem ser classificadas como sólidos com boa fluidez, condição que favorece a dinâmica do leito de jorro, no entanto, as sementes com exotesta após secas são classificadas como aeradas, condição que não favorece a dinâmica do leito de jorro, uma vez que está mais propícia a formação de bolsões de ar.

O resultado de 0° encontrado para as sementes com exotesta após secas, exibido na Tabela 5.8, pode ser explicado pelo fato das sementes não se empilharem, conforme mostrado na Figura 5.5. Isso possivelmente ocorre, pois, as sementes com exotesta após secas apresentam a menor rugosidade, uma vez que não possuem a mesotesta exposta e sua superfície é completamente lisa, fator esse que faz com que essas sementes escoem com maior facilidade. A determinação dos demais ângulos de repouso podem ser visualizada no Apêndice C.

Figura 5.5 – Obtenção do ângulo de repouso para as sementes com exotesta após secas.



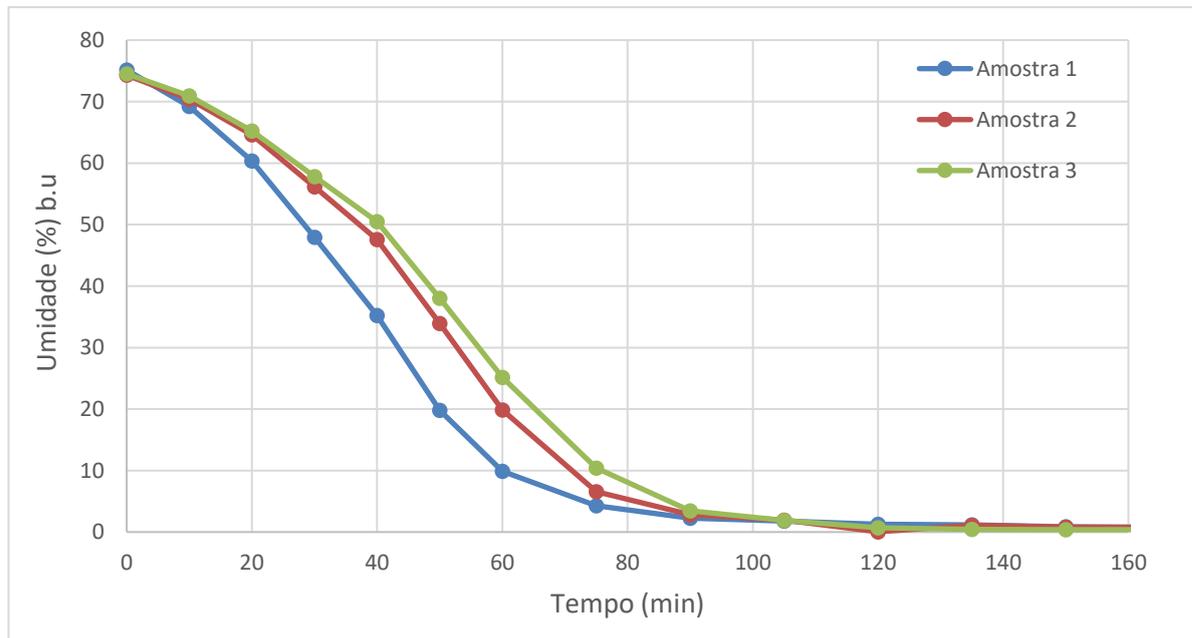
Fonte: Da autora (2022).

Como o ângulo de repouso depende de vários parâmetros, alguns resultados se mostraram influenciar mais do que outros. Ao se comparar o ângulo de repouso para as sementes *in natura* e secas em relação a esfericidade, notou-se que as sementes secas, cuja esfericidade é menor, apresentaram menor ângulo de repouso, resultado contrário ao esperado. E em relação ao tamanho da partícula, esperava-se que para as sementes *in natura* os ângulos de repouso fossem menores se comparados aos das sementes secas, o que também não foi observado (AL-HASHEMI; AL-AMOUDI, 2018). Tais resultados indicam que outro parâmetro deve influenciar o ângulo de repouso de forma mais importante que o efeito da esfericidade ou tamanho da partícula.

Já em relação a umidade do material, esperava-se conforme abordado por Al-Hashemi e Al-Amoudi (2018) que o ângulo de repouso das sementes *in natura* fossem maiores quando comparados aos das sementes secas, o que foi corroborado. Esse resultado evidencia que a escoabilidade das sementes de mamão aumenta com a redução da umidade, uma vez que segundo Silva et al. (2018), produtos com alto teor de umidade têm uma maior coesão entre as partículas e, conseqüentemente, maior atrito interno. E como o material seco apresenta-se com maior quantidade de sementes, era esperado que o ângulo de repouso dele fosse ligeiramente menor se comparado a sua forma *in natura*, o que foi observado. Assim, para a comparação do ângulo de repouso do material *in natura* e seco, notou-se que a esfericidade, diâmetro médio e densidade das sementes não apresentaram resultado conforme o esperado e, portanto, pode-se concluir que o efeito da umidade e da quantidade de sementes sobre o ângulo de repouso foi maior em relação aos parâmetros citados.

Portanto, após realizar o estudo de caracterização das sementes de mamão, foi possível concluir que as sementes *in natura* sem exotesta são a melhor opção para a realização dos experimentos fluidodinâmicos e de secagem em leito de jorro, uma vez que apresentam menor umidade e maior porosidade, além de apresentarem melhores condições para manuseio. Na Figura 5.6 são apresentadas as curvas de cinética de secagem em estufa para amostras de sementes de mamão *in natura* sem exotesta. Observando a figura, é possível notar que a secagem total das sementes ocorre com cerca de 120 min de operação da estufa a 105 °C.

Figura 5.6 – Cinética de secagem em estufa da semente de mamão *in natura* sem exotesta.



Fonte: Da autora (2022).

Uma vez que se notou grande diminuição no valor de densidade aparente das sementes após secas (Tabela 5.3), prosseguiu-se um estudo para observação da variação da densidade com a redução da umidade ao longo do tempo de secagem em estufa, conforme Tabela 5.9.

Pode-se observar através da Tabela 5.9 que, conforme a umidade das sementes de mamão diminui, sua densidade aparente também decresce, sendo que o valor da densidade das sementes após secas, ou seja, 1440 min, diminui 46,56% em relação a seu valor inicial. Tal resultado demonstra o quanto a densidade do material é variável durante o processo de secagem. Esse estudo auxilia no entendimento do quanto o comportamento fluidodinâmico das sementes pode ser afetado durante a secagem, uma vez que conforme o valor de densidade decai, se torna mais fácil o material ser arrastado.

Tabela 5.9 – Variação da densidade com a umidade ao longo da secagem em estufa.

Tempo (min)	Umidade b.u. (%)	Densidade (g/mL)
0	74,333 (\pm 1,645)	1,048 (\pm 0,015)
15	65,945 (\pm 4,047)	0,974 (\pm 0,054)
30	53,451 (\pm 7,617)	0,728 (\pm 0,113)
45	37,875 (\pm 12,229)	0,619 (\pm 0,071)
60	19,287 (\pm 11,343)	0,553 (\pm 0,031)
75	8,447 (\pm 6,084)	0,545 (\pm 0,025)
90	3,567 (\pm 1,943)	0,525 (\pm 0,022)
105	2,282 (\pm 0,919)	0,497 (\pm 0,007)
120	1,274 (\pm 0,825)	0,515 (\pm 0,025)
135	1,182 (\pm 0,421)	0,505 (\pm 0,009)
1440	0,000 (\pm 0,000)	0,488 (\pm 0,014)

Fonte: Da autora (2022).

5.2 Análises numéricas

5.2.1 Escolha do tipo de malha

A escolha da configuração de malha a ser aplicada na geometria tridimensional representativa do leito de jorro se deu baseada nos parâmetros razão de aspecto (*Aspect Ratio*), assimetria (*Skewness*) e qualidade ortogonal (*Orthogonal Quality*), conforme dados apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Análise de qualidade dos três tipos de malha gerados.

Teste	Número de células	Máxima razão de aspecto	Skewness (%)				Qualidade ortogonal
			0,00 - 0,25	0,25 - 0,50	0,50 - 0,75	0,75 - 1,00	
Malha 1	252500	70,74	50,43	34,43	11,21	3,93	0,59
Malha 2	390000	180,06	53,07	37,39	7,13	2,41	0,70
Malha 3	287225	1401,88	38,22	45,52	14,46	1,80	0,43

Fonte: *Softwares* Gambit e Fluent.

Como se pode visualizar na Tabela 5.10, a malha 1 apresentou um valor adequado para a máxima razão de aspecto da malha, 70,737, valor que atende ao critério para garantir uma boa qualidade. Como malhas com razão de aspecto superiores a 100 devem ser evitadas, as malhas 2 e 3 não são indicadas para utilização segundo este critério.

Analisando o parâmetro *Skewness*, percebe-se que todas as malhas apresentaram uma pequena fração dos elementos, considerada desprezível se comparada as demais frações, com valores do parâmetro superiores a 0,75, com qualidade considerada pobre, ruim e degenerada, de acordo com a Tabela 4.2. Observa-se também que para todas as malhas, a maior parte dos

elementos possui classificação boa ou excelente, faixa de *Skewness* de 0 até 0,5.

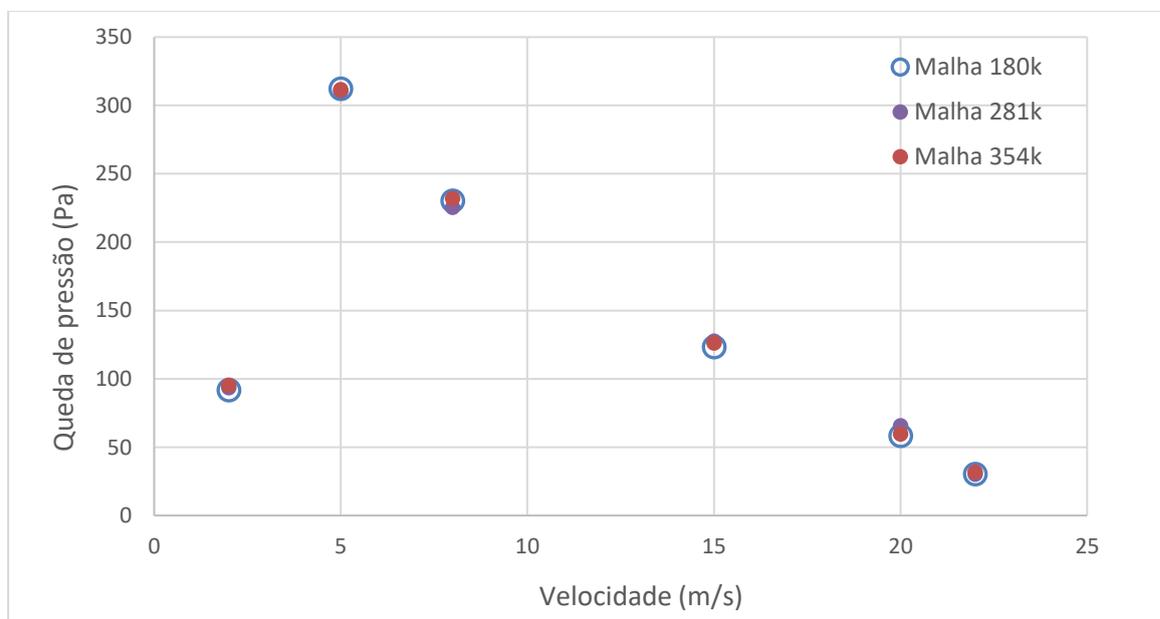
A qualidade ortogonal mostrada na Tabela 5.10 representa o valor mínimo desse parâmetro para 90% das células presentes nas malhas. Assim, entre as malhas analisadas, de acordo com a Tabela 4.3, as malhas 1 e 3 tem a maior parte de seus elementos com classificação boa e a malha 2 tem a maioria de seus elementos com classificação muito boa.

Dessa forma, identificou-se que a malha 1 atendeu aos critérios de qualidade segundo as três diferentes métricas analisadas, e, portanto, apresentou a melhor qualidade dentre as três diferentes configurações de malha estudadas. Assim, a malha 1 foi selecionada para ser utilizada nas posteriores simulações realizadas no trabalho.

5.2.2 Teste de independência de malha

A curva característica do leito de jorro foi obtida através de simulações usando malhas hexaédricas com diferentes números de células (180, 281 e 354 mil células) e diferentes velocidades de entrada de ar (2, 5, 8, 15, 20 e 22 m/s) conforme apresentado na Figura 5.7. Os valores de queda de pressão na entrada do leito foram obtidos pela média dos valores após a estabilização.

Figura 5.7 – Teste de independência de malha.

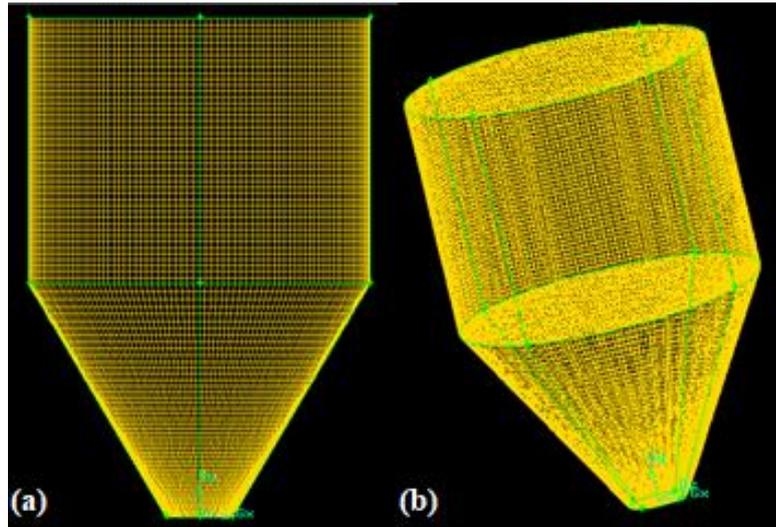


Fonte: Da autora (2022).

Observando a Figura 5.7, pode-se verificar que os resultados das simulações realizadas com as malhas de 180, 281 e 354 mil células se mostraram próximos em todas as velocidades, tanto baixas quanto altas. Sendo assim, optou-se por utilizar a malha de 180k (180225

células), apresentada na Figura 5.8, para as posteriores simulações, uma vez que as curvas obtidas para as diferentes malhas foram semelhantes, ou seja, não há necessidade de se trabalhar com a malha que contém um refinamento maior, de forma que a malha escolhida economiza tempo e esforço computacional.

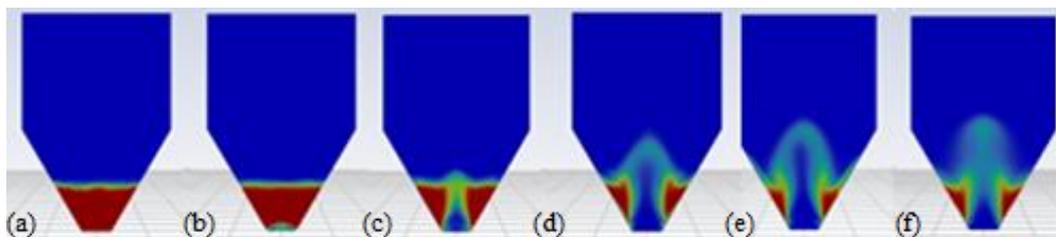
Figura 5.8 – Malha computacional tridimensional do leito de jorro: (a) vista lateral e (b) vista com inclinação do leito.



Fonte: Da autora (2022).

Ademais, observou-se que para a faixa de velocidades estudadas, entre 2 e 22 m/s, é possível verificar os momentos característicos da fluidização. A Figura 5.9 demonstra a evolução dos regimes de leito fixo para jorro estabelecido, conforme ocorre o aumento da velocidade de alimentação do ar para a malha com 180 mil células. A baixas velocidades, o leito permanece estático, e o gradual aumento da velocidade resulta no arraste das partículas até que se forme o jorro.

Figura 5.9 – Regimes de escoamento para (a) 2m/s (b) 5m/s (c) 8m/s (d) 15m/s (e) 20m/s e (f) 22m/s.



Fonte: Da autora (2022).

A Figura 5.9 permite visualizar os momentos característicos da fluidização descritos pela curva fluidodinâmica da Figura 5.7. Para a velocidade do ar de 2 m/s (Figura 5.9 (a)),

tem-se uma condição de escoamento em regime de leito fixo, na qual o ar percola o leito sem movimentar as partículas. Nessa fase há um aumento da queda de pressão com o aumento da vazão de ar como mostrado na Figura 5.7. Quando a velocidade do ar se torna alta o suficiente, a partir do valor de 5 m/s (Figura 5.9 (b)), o ar passa a empurrar as partículas que se encontram próximas ao bocal de injeção, e assim, forma-se uma cavidade que oferece grande resistência ao fluxo de gás. Dessa forma, a queda de pressão correspondente continua a aumentar. Demais aumentos da velocidade de ar resultaram num alongamento dessa cavidade para um jorro interno, de forma que a queda de pressão no leito aumenta até o seu valor máximo, cerca de 312 Pa (Figura 5.7).

A partir desse ponto, como ilustrado para a velocidade de 8 m/s (Figura 5.9 (c)), a altura da cavidade interna se torna grande em comparação ao leito empacotado acima dela, e com isso a queda de pressão diminui à medida que a vazão de ar aumenta (Figura 5.7). Para as velocidades de 15, 20 e 22 m/s (Figuras 5.9 (d), (e) e (f), respectivamente), já ocorreu a expansão do leito, partículas foram deslocadas do núcleo central e o jorro interno rompeu a superfície do leito, de forma que todo o leito se tornou móvel e um jorro contínuo foi estabelecido. Assim a queda de pressão diminui de forma considerável (Figura 5.7).

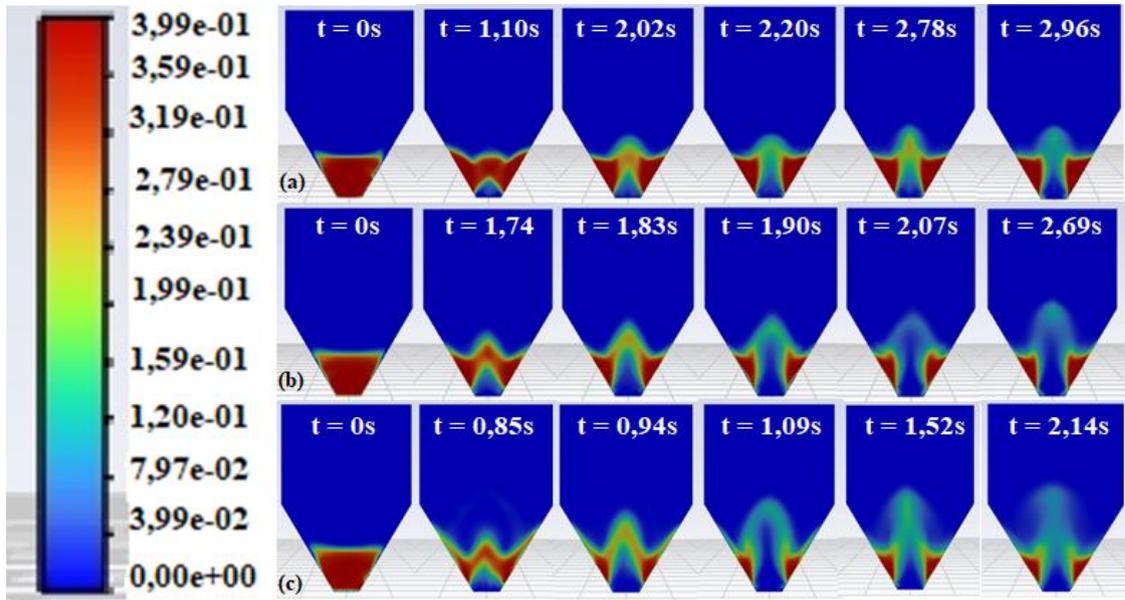
Os resultados anteriores indicam que as simulações desenvolvidas usando a malha com 180 mil células conseguem descrever bem o comportamento do escoamento no interior do leito de jorro, sendo concordantes com o fisicamente esperado.

5.2.3 Análise do padrão de escoamento para diferentes condições no leito de partículas

Através da realização de nove simulações, em que se variou a velocidade de entrada do ar (10, 15 e 20 m/s) e a altura de sementes presentes na parte cônica do leito (0,08; 0,10 e 0,12 m), foi possível obter os padrões de escoamento no leito de jorro. É possível verificar nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, os regimes de escoamento e as três regiões características do jorro, região anular, de jorro e fonte, sendo estas bem evidenciadas nos perfis de fração volumétrica dos sólidos.

Nos primeiros segundos de simulação, houve a formação de alguns bolsões de ar devido à entrada de ar no equipamento e o deslocamento de partículas para cima e para os lados. Graças ao formato cônico do leito e ao aumento de massa na região do ânulo, as partículas impõem dificuldade para o ar vencer a barreira formada, fechando assim a região do jorro. Após as partículas se redistribuírem, elas não oferecem mais tal resistência ao ar e este forma então, uma nova região da fonte e o movimento cíclico é então repetido, conforme observado por Ferreira (2019).

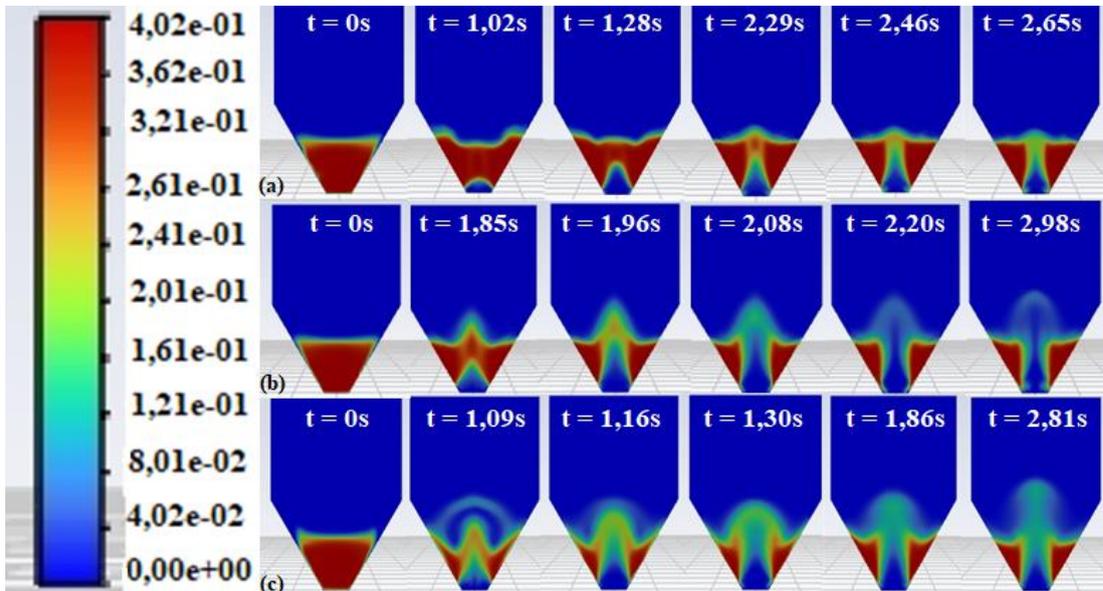
Figura 5.10 – Fração volumétrica dos sólidos para altura de sólidos equivalente a 0,08 m e velocidade de entrada de ar equivalente a (a) 10 (b) 15 e (c) 20 m/s.



Legenda: t é o tempo de simulação na qual obteve-se a imagem.

Fonte: Da autora (2022).

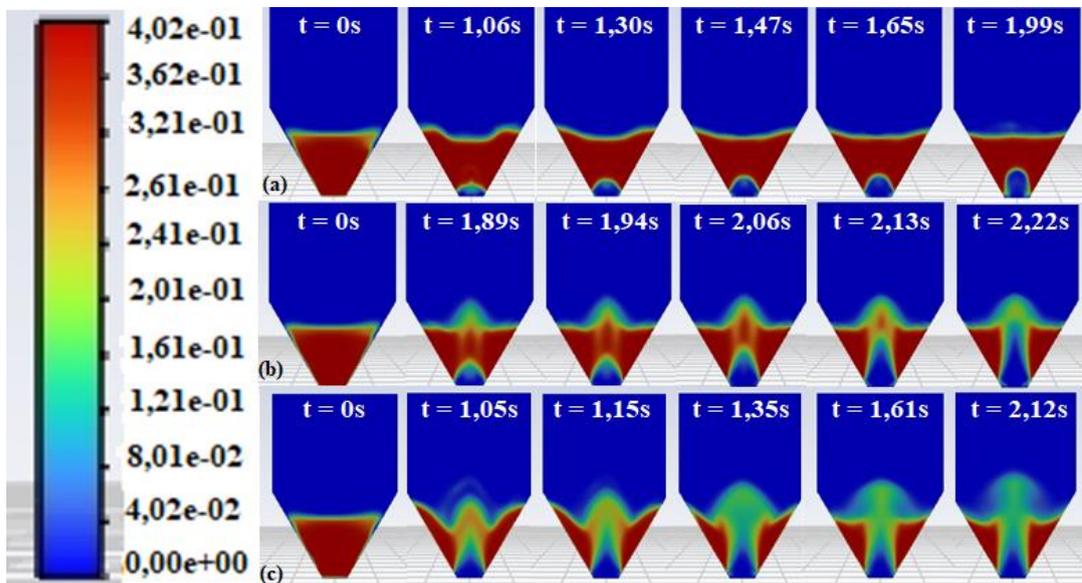
Figura 5.11 – Fração volumétrica dos sólidos para altura de sólidos equivalente a 0,10 m e velocidade de entrada de ar equivalente a (a) 10 (b) 15 e (c) 20 m/s.



Legenda: t é o tempo de simulação na qual obteve-se a imagem.

Fonte: Da autora (2022).

Figura 5.12 – Fração volumétrica dos sólidos para altura de sólidos equivalente a 0,12 m e velocidade de entrada de ar equivalente a (a) 10 (b) 15 e (c) 20 m/s.

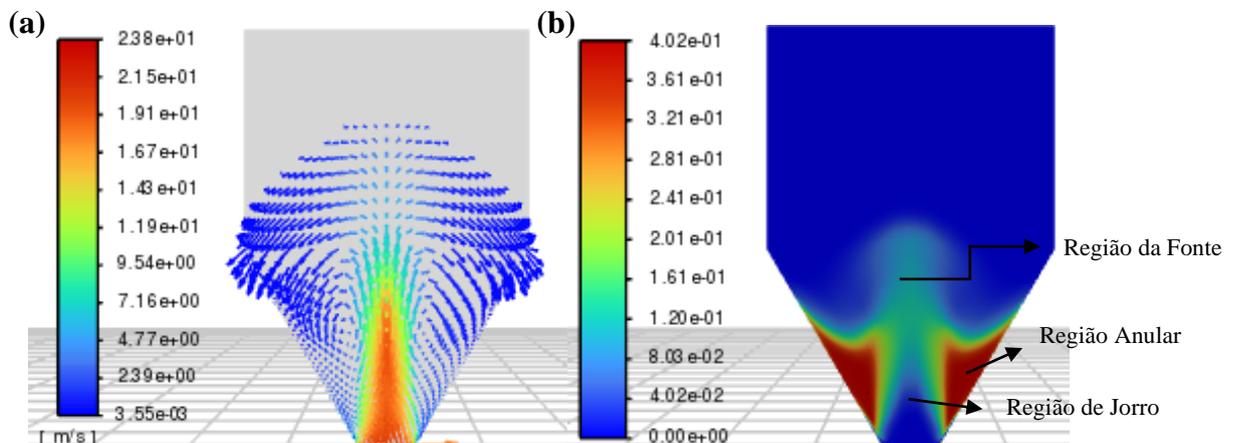


Legenda: t é o tempo de simulação na qual obteve-se a imagem.

Fonte: Da autora (2022).

Ao observar as Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, é possível identificar as regiões características de um leito de jorro. A região de jorro localizada na parte central do leito, com baixa concentração de partículas a região anular localizada entre as paredes do leito e a região de jorro, com maior concentração de partículas e a região de fonte localizada acima do leito de sólidos, onde as partículas ficam suspensas pela ação da força de arraste. Todas essas observações estão detalhadas na Figura 5.13, cujas imagens correspondem a uma simulação no tempo 2,21 s para a altura do leito de partículas de 0,10 m e velocidade de 20 m/s.

Figura 5.13 – Perfil de escoamento dado com (a) vetor velocidade do ar; (b) fração de volume para as sementes.



Legenda: As colorações azul, verde e vermelho indicam, respectivamente, baixa, média e alta velocidade do ar e concentração de partículas.

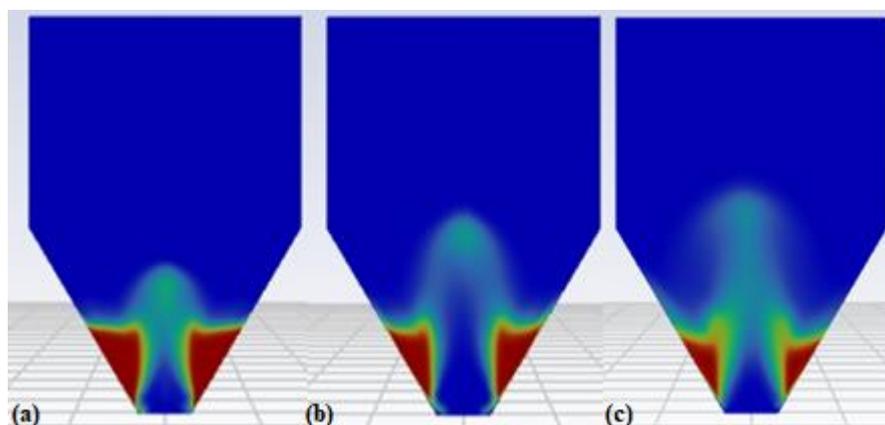
Fonte: Da autora (2022).

Por meio dos vetores de velocidade do ar (Figura 5.13 (a)), pode-se notar o movimento cíclico das sementes, característico do leito de jorro, em que o movimento ascendente apresenta a maior velocidade de ar (região de jorro), e o movimento descendente apresenta a menor velocidade de ar (região da fonte). Ademais, o tamanho do vetor indica o valor da velocidade em módulo em determinada direção e sentido, sendo assim, pode-se observar que os vetores velocidade apresentam menor tamanho próximo à parede na região cônica e tamanho maior próximo à entrada de fluido no leito. Esses resultados são coerentes com o esperado, uma vez que próximo à entrada do ar e na região central têm-se a maior velocidade de ar e, conseqüentemente, maior força de arraste das partículas.

Através das Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, pode-se observar que para a menor altura de sólidos, equivalente a 0,08 m, em todas as velocidades houve a formação de jorro e estabelecimento das três regiões características. Para a altura de sólidos de 0,10 m, a menor velocidade, equivalente a 10 m/s, demonstrou não possuir energia cinética suficiente para o arraste das partículas até o topo, necessário para a formação de uma região de fonte bem definida. Comportamento similar foi observado para a altura de sólidos de 0,12 m e para a mesma velocidade de ar (10 m/s), onde neste caso, a velocidade foi insuficiente até mesmo para a formação do jorro interno, gerando-se apenas uma cavidade inicial.

Além disso, pode-se notar pelas simulações realizadas que, o aumento da velocidade do ar de entrada influencia na altura da fonte, sendo que quanto maior a velocidade, maior a altura da fonte, conforme apresentado na Figura 5.14 e observado por Li, Che e Liu (2012). Ademais, observou-se que na região anular a fração de sólidos se mantém praticamente constante, conforme esperado e em concordância com o observado por Lourenço (2006).

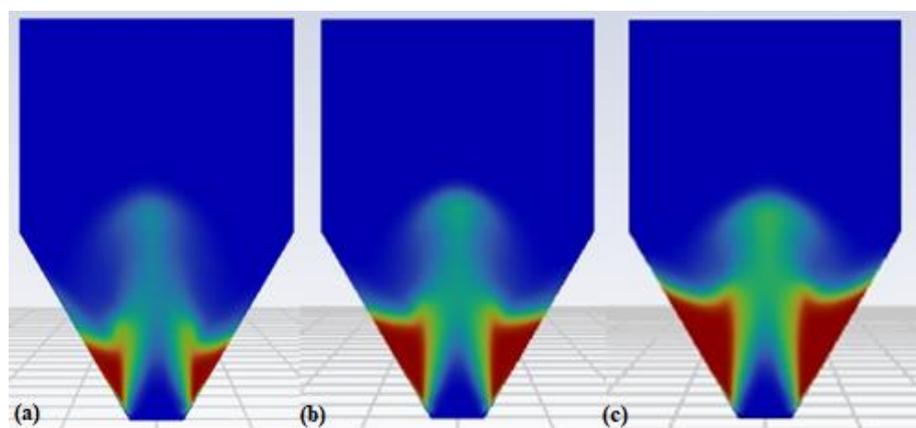
Figura 5.14 – Comparação da altura da fonte para uma altura do leito de sementes de 0,08 m e velocidades do ar de entrada no leito de (a) 10 (b) 15 e (c) 20 m/s.



Fonte: Da autora (2022).

Outro ponto, observado por Santana (2011), é que a altura do leito de sementes interfere na altura da fonte, uma vez que, para uma mesma velocidade de ar, quanto maior a quantidade de sementes, maior será a força necessária para empurrar as partículas, isto é, torna-se mais difícil para o ar vencer a resistência da força peso, ocorrendo, assim, uma menor expansão do leito, atingindo-se dessa forma, uma menor distância, conforme apresentado na Figura 5.15. Essa observação também foi relatada por Souza, Freire e Béttega (2018), de acordo com os autores, para uma dada velocidade de ar, aumentar a carga de sólidos em um leito de jorro pode impedir a sua circulação, pois o suprimento de ar pode ser insuficiente para arrastar o sólidos, conforme observado no presente trabalho.

Figura 5.15 – Comparação da altura da fonte para a velocidade do ar de entrada no leito de 20 m/s e alturas do leito de sementes de (a) 0,08 (b) 0,10 e (c) 0,12 m.



Fonte: Da autora (2022).

Além disso, pode-se notar (Figura 5.15) que o bico apresenta-se em ambas as alturas do leito de sementes como concentrado, mas é perceptível que o aumento do leito estático de partículas aumentou a concentração do bico, conforme abordado por Chen (2008), uma vez que o bico passa a ter uma coloração cada vez mais acentuada. De maneira análoga, a redução da altura do leito de partículas fez com que o bico se tornasse mais diluído, conforme mencionado por Júnior, Duarte e Santos (2015).

Na Tabela 5.11 são apresentados os valores de queda de pressão correspondentes para cada uma das condições simuladas. Os dados completos com os valores de queda de pressão simulados ao longo do tempo podem ser visualizados no Apêndice D.

Tabela 5.11 – Quedas de pressão na entrada do leito segundo as simulações.

Velocidade do ar de entrada (m/s)	Altura do leito de sementes (m)	Queda de pressão (Pa)
10	0,08	196,030 ($\pm 0,870$)
15	0,08	126,209 ($\pm 14,408$)
20	0,08	58,439 ($\pm 0,848$)
10	0,10	257,413 ($\pm 47,562$)
15	0,10	176,941 ($\pm 23,333$)
20	0,10	109,843 ($\pm 2,019$)
10	0,12	370,932 ($\pm 15,427$)
15	0,12	238,487 ($\pm 40,002$)
20	0,12	160,167 ($\pm 2,358$)

Fonte: Da autora (2022).

Para as velocidades mais baixas, as partículas oferecem maior resistência à passagem do ar, de forma que a queda de pressão apresenta um valor relativamente alto. Com o aumento da velocidade, o ar consegue passar pelas partículas e assim ocorre uma redução no valor da queda de pressão, conforme mostrado na Tabela 5.11, e também verificado por Duarte (2006). Além disso, observou-se que, para alturas do leito de partículas maiores, uma maior resistência ao escoamento do fluido é oferecida e, conseqüentemente, maiores valores de queda de pressão são obtidos.

Uma observação importante a se fazer é que, para algumas das condições simuladas e apresentadas na Tabela 5.11, observou-se uma flutuação da queda de pressão em uma faixa de valores, ou seja, a queda de pressão apresentou uma oscilação considerável, conforme apresentado no Apêndice D. Tal variação da queda de pressão pode ser um indício de instabilidade da condição. Ferreira (2019) também observou esse comportamento em seus resultados numéricos e afirmou que houve oscilações tanto na base quanto no topo do leito de jorro, sendo observada uma oscilação mais acentuada na base do leito. O autor explicou que esse efeito pode estar relacionado ao comportamento do fluido no interior do leito, responsável por conduzir a formação de um padrão de escoamento em golfadas ou pistonado. De acordo com Chen (2008), essas oscilações de queda de pressão podem ser atribuídas à variações no diâmetro do bico e no fluxo descontínuo de partículas da região do anel para a região da fonte.

Os resultados simulados no presente trabalho indicaram que para velocidades na faixa de 10 a 20 m/s e alturas do leito de sementes de 0,08, 0,10 e 0,12 m são encontradas algumas condições favoráveis para o desenvolvimento da condição de jorro. Desta forma, essas condições foram as primeiras a serem testadas para realização dos testes fluidodinâmicos e secagem em leito de jorro.

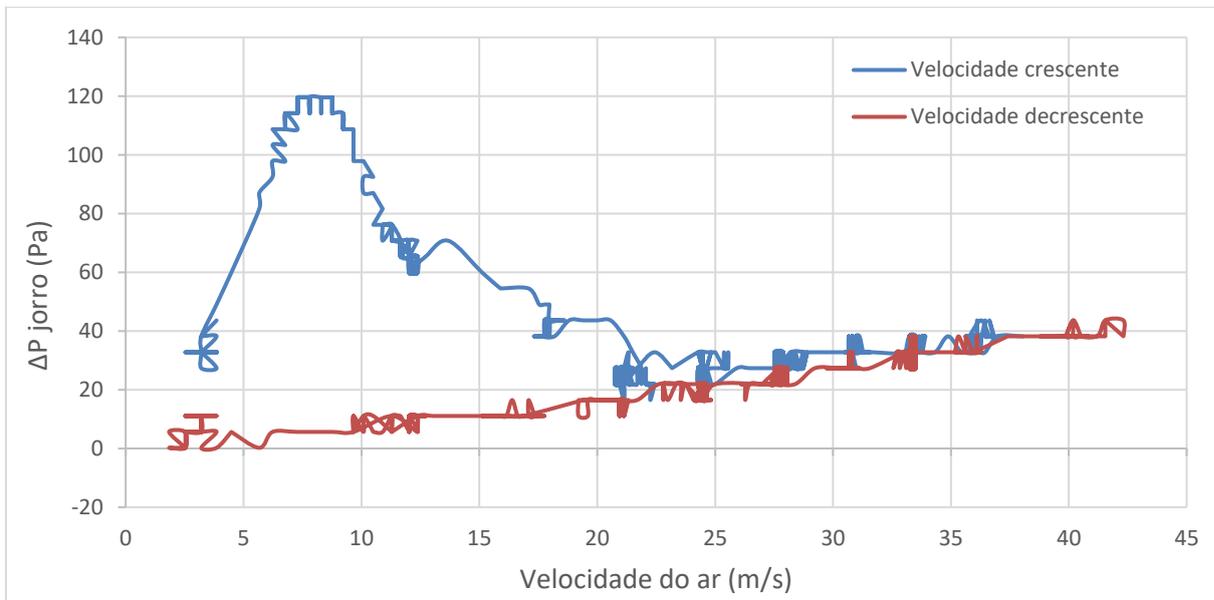
5.3 Análises experimentais

5.3.1 Curva característica do escoamento de sementes de mamão em leito de jorro

A curva característica do leito de jorro operando com sementes de mamão *in natura* e sem exotesta, preenchendo o leito até uma altura de 0,10 m na parte cônica, é apresentada na Figura 5.16. Tal figura representa o comportamento da queda de pressão no leito de partículas em função da velocidade de ar.

Os padrões fluidodinâmicos exibidos na Figura 5.16 evidenciam um perfil coerente com o padrão típico de um leito de jorro. Inicialmente, para a curva de velocidade crescente, pode-se observar que, para menores velocidades de ar, a queda de pressão aumenta conforme o aumento da velocidade, até o ponto de queda de pressão máxima, uma vez que o ar percola o leito de partículas. Para vazões maiores de ar, a queda de pressão tende a diminuir e estabilizar em um valor constante, pois nessa etapa já se iniciou o movimento das partículas. Primeiramente, uma cavidade compactada é formada, sendo que a mesma é rompida com o aumento da velocidade de ar, e ocorre a expansão do jorro interno até que ele rompa a superfície do leito, todo o leito se torna móvel e a condição de jorro estável é atingida, na qual as partículas estabelecem um movimento cíclico, alcançando certa altura e retornando ao leito.

Figura 5.16 – Curva característica do escoamento de sementes de mamão em leito de jorro.



Fonte: Da autora (2022).

Apesar da Figura 5.16 permitir uma fácil identificação dos regimes de contato ar-sementes e a compreensão da transição do leito estático a jorro estabelecido, não foi possível

identificar experimentalmente os regimes ou sua transição a partir da observação visual do leito. A dificuldade para se observar o movimento das partículas no interior do leito pode ser atribuída à geometria do leito e a quantidade de sementes utilizadas durante os testes. O leito possui um visor em acrílico apenas na extensão de sua parte cilíndrica dificultando a observação do movimento das sementes, que, em sua maioria, se estabeleciam na parte cônica do leito durante os ensaios. Outro aspecto que dificultou a observação do movimento das partículas no interior do leito foi o fato das sementes de mamão serem muito escuras e, devido ao contato ar-semente e semente-semente, desprenderem partes constituintes de exotesta aderidas a elas, deixando o visor sujo e embaçado.

Além disso, foi observado que, ao se iniciar a alimentação de ar, uma certa porção de partículas eram carregadas juntamente com o ar até a saída do leito, sendo a sua saída impedida por uma tela posicionada no topo da seção cilíndrica, conforme apresentado na Figura 5.17. Foi observado que tais partículas retornavam para a parte inferior do equipamento, retomando o movimento. Acredita-se que paralelamente à formação do jorro ocorria o transporte de uma pequena parcela do material. Não se sabe com certeza o que poderia estar causando esse arraste de partículas no leito, mas acredita-se que este comportamento possa estar associado à heterogeneidades das propriedades do material ou a secagem rápida de algumas sementes, pois partículas com diâmetro e/ou densidade reduzidas teriam seu arraste facilitado, uma vez que as velocidades utilizadas nos ensaios seriam suficientemente altas para promover o seu transporte.

Figura 5.17 – Tela utilizada para fechar a saída do leito de partículas.



Fonte: Da autora (2022).

Ademais, observou-se também que, durante a formação do regime de jorro, a fonte variava na direção radial e a partir do instante em que o regime se estabelecia, esta

apresentava uma posição centralizada e uma altura constante durante o tempo de operação do equipamento. Apesar da aparente condição de estado estacionário, houve certa oscilação nos valores de queda de pressão para cada condição da curva fluidodinâmica. De acordo com Chen (2008), essas oscilações de queda de pressão podem ser atribuídas às variações no diâmetro do bico e no fluxo descontínuo de partículas da região do anel para a região da fonte. Outra possível explicação pode estar relacionada às oscilações no sistema de alimentação de ar.

Mais uma observação a se fazer é que, a razão entre o diâmetro de entrada do fluido e o diâmetro das partículas é equivalente a 13,7, isto é, a razão não está dentro da faixa de 20 a 30 vezes o diâmetro das partículas. E, portanto, de acordo com Tellabide et al. (2020), o regime de escoamento é considerado altamente instável. Esse resultado está de acordo com a classificação de Geldart que classifica as sementes de mamão como pertencentes ao grupo D, cuja fluidização é instável. Sabe-se que comportamentos não usuais do escoamento em leito de jorro podem estar associados a algumas condições de instabilidade, por exemplo, o arraste de algumas partículas.

É importante mencionar que ao decorrer da obtenção da curva característica das sementes de mamão, o material vai perdendo umidade e alterando suas características de forma que ao final da operação, as sementes não estão mais com sua umidade inicial e suas características iniciais, mas sim com uma umidade que foi reduzida e alterações nas suas características ao longo do tempo, o que pode influenciar os resultados obtidos. Além da umidade, conforme visto anteriormente, outras propriedades das sementes também são alteradas com a secagem, tais como: diâmetro, esfericidade, densidade aparente e *bulk*, peso de mil sementes e porosidade *bulk*.

Pela curva fluidodinâmica também pode-se constatar que a queda de pressão máxima é de 120 Pa, ou seja, essa é a energia necessária para que o jorro rompa a estrutura do leito compactado e forme o jorro interno. A queda de pressão de jorro estável é de cerca de 21 Pa e a velocidade do ar de jorro mínimo é cerca de 22 m/s, ou seja, esses valores representam a exigência mínima das condições de operação na qual o jorro ainda existe.

Os valores de queda de pressão obtidos experimentalmente e através da simulação, para uma altura de leito de 0,10 m, são apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Queda de pressão simulada *versus* experimental.

Velocidade de entrada do ar (m/s)	Queda de pressão experimental (Pa)	Queda de pressão simulada (Pa)	Erro percentual (%)
10	95,160 (\pm 4,539)	257,413 (\pm 47,562)	170,506
15	56,278 (\pm 3,132)	176,941 (\pm 23,333)	214,405
20	43,619 (\pm 0,000)	109,843 (\pm 2,019)	151,824

Fonte: Da autora (2022).

Nota-se uma grande discrepância entre os valores de queda de pressão obtidos a partir da simulação em relação aos valores experimentais (Tabela 5.12). No entanto, é importante destacar alguns pontos. Durante a obtenção da curva fluidodinâmica, ar é inserido no equipamento a temperatura ambiente, já que o objetivo é observar os aspectos fluidodinâmicos e não a realização da secagem do material. No entanto, observou-se que as sementes secavam parcialmente com o tempo durante a obtenção da curva. A variação da umidade das sementes pode influenciar nos resultados, uma vez que a redução da umidade pode resultar em variações de diâmetro e de densidade das sementes ao longo do experimento. Para exemplificar essas variações pode-se fazer uma análise dos dados da caracterização do material das Tabelas 5.1 e 5.3 que indicam que para a semente sem exotesta *in natura*, o diâmetro médio é de 3,633 mm e o mesmo cai para 3,055 mm após secas. Tal variação para a densidade é ainda mais expressiva, onde o valor para as sementes sem exotesta *in natura* é de 1,062 g/mL e cai para 0,565 g/mL quando secas, quase metade do valor inicial.

Nas simulações, os valores estabelecidos para o diâmetro e para a densidade das sementes foram fixados nos valores correspondentes obtidos para as sementes sem exotesta *in natura*, considerando que o material preserva as suas características do início ao fim do experimento. Nesse caso, não haveria influência da variação de umidade nas propriedades do material. A Tabela 5.12 aponta valores de queda de pressão sempre mais altos para as simulações, o que é coerente considerando-se um escoamento com partículas maiores e mais densas.

Outro fator importante é que as simulações não foram capazes de prever o arraste de partículas no leito verificado experimentalmente, que acontecia com uma pequena porção de material no leito. Com esse arraste de partículas da região de jorro, em paralelo ao movimento cíclico das partículas, tem-se um aumento da porosidade nessa região e o ar precisa vencer uma menor resistência para escoar, o que leva a uma redução nos valores de queda de pressão experimentais, aspecto que não está sendo considerado nas simulações.

Além disso, é importante ser mencionado que se observou uma forte influência da

altura do leito de partículas sobre os valores de queda de pressão simulados na entrada do leito. Para a altura do leito de sementes de 0,08 m foram obtidos os valores de 196,030 (\pm 0,869), 126,209 (\pm 14,379) e 58,439 (\pm 0,846) Pa de queda de pressão para simulações com velocidades do ar de 10, 15 e 20 m/s, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 5.11. Nota-se que estes valores apresentam uma proximidade muito maior com os resultados de queda de pressão obtidos experimentalmente. Com esses dados, os erros percentuais simulados seriam 106,001, 124,259 e 33,976%, valores estes bem inferiores aos obtidos para à altura de 0,10 m. Devido ao fato de que a determinação da quantidade em massa de sementes que corresponderia a altura de 0,10 m tenha sido feita de forma visual, na parte da seção cônica do leito, pode-se suspeitar que a altura de 0,10 m não tenha sido realmente alcançada, mas sim um valor menor.

Assim, no geral, pode se dizer que as simulações apresentaram resultados positivos para analisar qualitativamente o comportamento das sementes no interior do leito de jorro, no entanto, não apresentaram bons resultados quantitativos, o que poderia ser explicado pelo fato de não terem sido considerados nas simulações aspectos relacionados à transferência de massa e calor entre as sementes e o ar.

5.3.2 Secagem das sementes de mamão em leito de jorro

Os resultados da secagem das sementes sem exotesta *in natura* em leito de jorro são apresentados na Tabela 5.13. Os dados completos de secagem podem ser visualizados no Apêndice E.

Tabela 5.13 – Resultados de umidade e taxa de secagem em base úmida.

Exp.	T _{média} do ar (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Umidade inicial (%) b.u.	Umidade final (%) b.u.	Taxa de secagem (% b.u. / h)
1	40	24	74,749	68,391	25,433
2	40	31	74,294	62,569	46,903
3	40	36	77,510	62,658	59,410
4	50	24	76,128	67,565	34,254
5	50	31	75,656	64,075	46,325
6	50	36	73,347	51,766	86,325
7	50	36	77,977	55,330	90,586
8	50	36	74,649	52,143	90,024
9	64	24	75,009	60,679	57,311
10	64	31	73,834	47,083	107,003
11	64	36	74,402	48,552	103,402

Fonte: Da autora (2022).

A partir dos dados apresentados na Tabela 5.13 nota-se que a umidade inicial em torno de 75,232 ($\pm 1,463$)% alcança valores finais ao redor de 58,255 ($\pm 7,577$)% em apenas 15 min de secagem em leito de jorro. Além disso, nota-se que a taxa de secagem varia em função da temperatura e da velocidade do ar. Para a temperatura de 40°C, a taxa de secagem variou de 25,433 a 59,410% com o aumento da velocidade de ar, isto é, uma variação de cerca de 34% no valor da taxa de secagem. Já para a temperatura de 50°C, a taxa de secagem variou de 34,254 a 90,586%, o que representa uma variação de 56% a depender da velocidade. E para a temperatura de 64°C, a taxa de secagem variou de 57,311 a 107,003%, alterando cerca de 50% a depender da velocidade acionada.

Nota-se que o aumento da temperatura do ar de secagem exerce grande influência na taxa de secagem, de acordo com o esperado, uma vez que, quanto maior a temperatura, mais favorecido é o processo de transferência de calor e massa entre as fases sólido-fluido e assim, uma maior quantidade de água é removida das sementes. Observa-se que a velocidade do ar também exerce uma influência considerável na taxa de secagem, quanto maior é a velocidade, maior é a taxa de secagem, para uma mesma temperatura do ar, resultado que também está conforme o esperado pois altas velocidades de fluido propiciam maiores taxas de transferência convectiva de calor e massa.

Uma análise de regressão múltipla utilizando os dados de taxa de secagem da Tabela 5.13 auxilia no entendimento e quantificação da influência das variáveis (temperatura e velocidade do ar de secagem) sobre a resposta (taxa de secagem). A Tabela 5.14 apresenta os resultados da regressão múltipla, contendo apenas as variáveis e interações que influenciaram significativamente a resposta, considerando o nível de confiança de 95%.

Tabela 5.14 – Resultados da regressão para a taxa de secagem.

Variável	Parâmetro	Nível de significância (<i>p</i>)
Constante	63,26382	0,000000
Temperatura (T)	22,99527	0,000104
Velocidade (V)	22,57346	0,000065
T ² .V ²	-7,75976	0,018217

Fonte: *Software* Statistica 7.

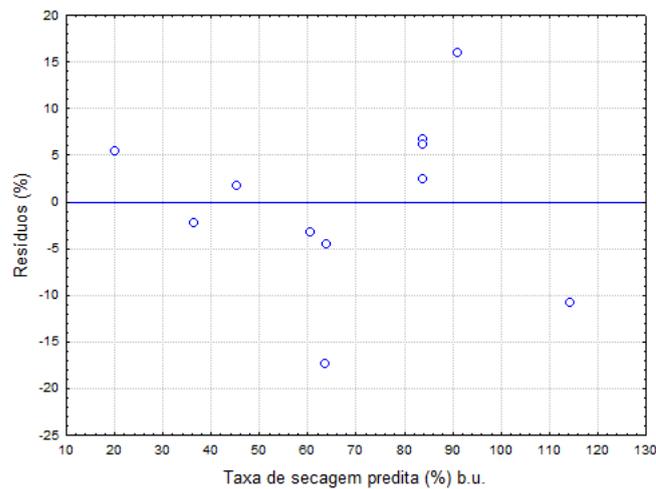
A partir dos dados da Tabela 5.14, é possível dizer que as duas variáveis analisadas influenciam significativamente a resposta de forma isolada e combinada quadrática. Um quadrado do coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,955 indica que o modelo se ajusta de maneira satisfatória aos dados experimentais. Os dados da Tabela 5.13 podem ser dispostos na forma da Equação 5.2, que permite estimar a taxa de secagem em função das duas variáveis

estudadas, temperatura e velocidade do ar utilizando os valores codificados.

$$\eta = 63,26382 + 22,99527T^* + 22,57346V^* - 7,75976T^{*2} - 7,75976V^{*2} \quad (5.2)$$

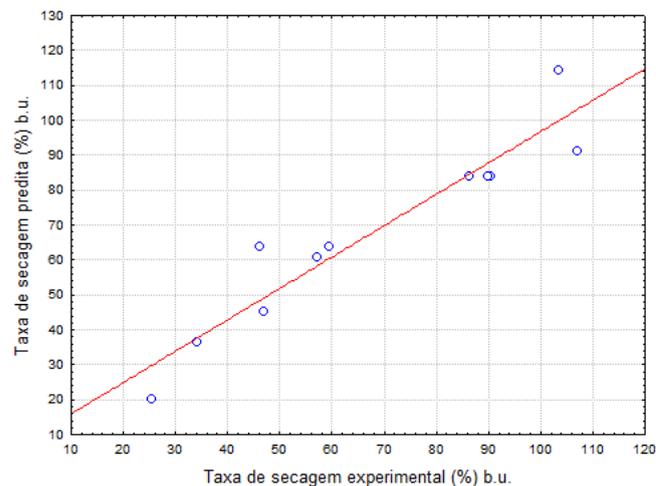
As Figuras 5.18 e 5.19 permitem analisar a distribuição de resíduos para a Equação 5.2. A Figura 5.18 apresenta uma distribuição dos resíduos aleatória em torno de uma média zero com variância constante, não apresentando tendências, ou seja, os resíduos são aleatórios e independentes, sendo assim, o modelo é adequado aos dados experimentais. Já a Figura 5.19 mostra que os pontos experimentais se aproximaram da linha contínua, isto é, a normalidade é observada e têm-se a confirmação de que o modelo proposto se ajusta bem aos dados experimentais.

Figura 5.18 – Distribuição de resíduos para a equação de taxa de secagem.



Fonte: *Software* Statistica 7.

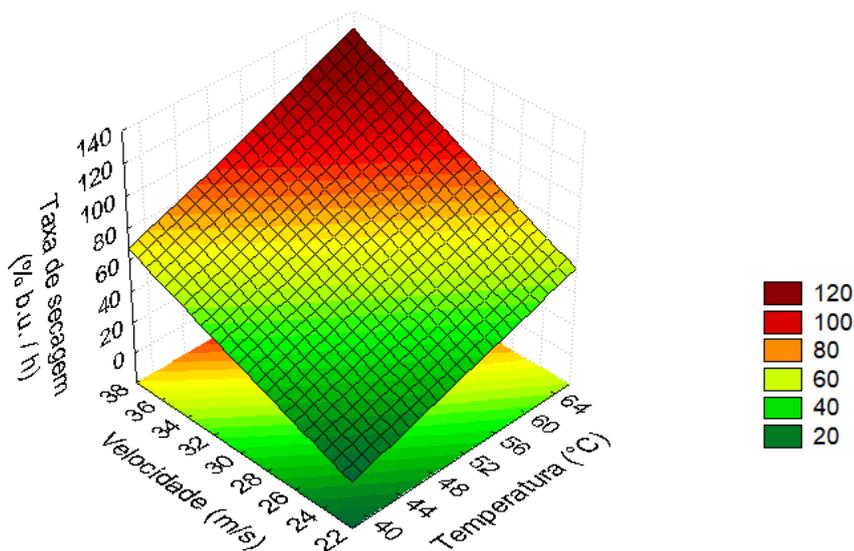
Figura 5.19 – Normalidade dos resíduos para a equação de taxa de secagem.



Fonte: *Software* Statistica 7.

Na superfície de resposta apresentada na Figura 5.20 tem-se a variação da taxa de secagem em função da temperatura e da velocidade do ar.

Figura 5.20 – Superfície de resposta para a taxa de secagem em função da temperatura e da velocidade do ar.



Fonte: *Software Statistica 7.*

A partir da Figura 5.20 percebe-se que a taxa de secagem é maximizada com o acréscimo das duas variáveis. O aumento da velocidade e da temperatura do ar favorece a transferência de calor e massa entre o ar e as sementes de mamão resultando, conseqüentemente, em uma maior taxa de secagem das sementes. Sendo assim, a condição que garante a maior taxa de secagem é a que se utiliza os valores mais altos para a temperatura e velocidade do ar, equivalentes a 64 °C e 36 m/s.

Por fim, é importante salientar que, para um tempo de secagem de 15 min no leito de jorro, à temperaturas de no máximo 64° C, foi possível reduzir a umidade do material de valores iniciais em torno de 75,232 ($\pm 1,463$)% até valores finais ao redor de 52,105 ($\pm 7,461$)%. A partir da curva da cinética de secagem das sementes em estufa (Figura 5.6), pode se dizer que para alcançar uma mesma redução de umidade da semente na estufa seriam necessários de 30 a 40 min a uma temperatura de 105°C. Essa comparação demonstra que a operação de secagem em leito de jorro pode ser mais eficiente e econômica do que a secagem em estufa, sendo possível alcançar altas taxas de secagem em períodos mais curtos e temperaturas mais baixas. Esses resultados podem ser explicados pelas características do escoamento no leito de jorro que proporcionam altas taxas de transferência de calor e massa, colaborando para a otimização das condições da operação de secagem.

Um comparativo entre as sementes de mamão sem exotesta *in natura* e após serem secas em estufa e em leito de jorro é apresentado na Figura 5.21.

Figura 5.21 – Sementes de mamão sem exotesta (a) *in natura* e após secas em (b) estufa por 24 h a 105 °C e em (c) leito de jorro por 15 min a 50 °C.



Fonte: Da autora (2022).

A partir dessa figura é possível notar a diferença de tonalidade das sementes *in natura* e secas tanto em estufa quanto em leito de jorro. Percebe-se que inicialmente as sementes apresentam coloração escura (Figura 5.21 (a)), condição na qual se encontram totalmente úmidas (73,999% b.u.). Após a secagem, as sementes apresentam uma coloração marrom e o tom de cor depende do teor de umidade e da exposição ao calor. A secagem em estufa (Figura 5.21 (b)) representa a secagem completa das sementes (0,000% b.u.), isto é, a remoção máxima de água das sementes, sendo possível notar para essa condição uma coloração marrom mais acentuada. Já na Figura 5.21 (c) as sementes apresentam uma coloração marrom não tão acentuada, uma vez que para essa amostra não se realizou a secagem completa, atingindo uma umidade final em b.u. de 51,766%.

6 CONCLUSÕES

Da caracterização das sementes, observou-se que a exotesta das sementes confere a elas uma maior esfericidade, os altos valores de densidade aparente decorrem da alta umidade das sementes e a compactação não tem influência sobre a densidade *bulk*. Portanto, foi possível realizar um estudo de caracterização comparativo das sementes de mamão tanto *in natura* quanto após secas e, também, com e sem exotesta. Verificou-se que as sementes *in natura* sem exotesta apresentaram menor umidade e maior porosidade, além de apresentarem melhores condições para manuseio, sendo selecionada para os estudos de secagem.

Além disso, foi possível classificar as sementes *in natura* sem exotesta de acordo com o grau de escoabilidade como sendo de boa fluidez. Qualitativamente, de acordo com o diagrama de Geldart, as sementes foram classificadas como pertencentes ao grupo particulado D, composto por partículas jorráveis grandes e/ou muito densas, e de acordo com o peso de mil sementes, como partículas consideradas pequenas.

O estudo qualitativo da fluidodinâmica do escoamento e dos regimes de escoamento ar-sementes no interior do leito de jorro realizados por meio da técnica CFD permitiram compreender melhor a influência dos parâmetros velocidade do ar de secagem e altura do leito de partículas sobre os regimes de escoamento e a formação das regiões características. As simulações computacionais se mostraram capazes de representar a fluidodinâmica e a distribuição das sementes de mamão no interior do equipamento, apesar de não conseguir prever o arraste de algumas partículas. Além disso, os resultados encontrados para as simulações do escoamento de sementes de mamão no leito de jorro são concordantes com resultados reportados na literatura utilizando outros materiais.

A curva fluidodinâmica característica do leito de jorro foi obtida experimentalmente utilizando sementes de mamão *in natura* sem exotesta e apresentou um comportamento coerente com o padrão típico de um leito de jorro, permitindo assim, a fácil identificação dos regimes de escoamento. Foi possível obter as condições mínimas de operação nas quais o jorro ainda existe, sendo elas, a queda de pressão de jorro estável, equivalente a 21 Pa e a velocidade do ar de jorro mínimo, equivalente a 22 m/s. Ademais, observou-se experimentalmente um comportamento atípico das sementes de mamão, em que paralelamente à formação do jorro houve o carregamento de algumas partículas até a saída do jorro. Esse comportamento foi atribuído à heterogeneidade das propriedades do material ou a uma secagem muito rápida de algumas sementes favorecendo o seu transporte graças a velocidades muito altas.

Ao se comparar os resultados experimentais de queda de pressão com os simulados

não houve uma boa aproximação do ponto de vista quantitativo, o que pode ser atribuído ao fato das simulações não levarem em consideração a secagem do material ao longo do tempo e, conseqüentemente, a mudança das propriedades como diâmetro médio e densidade aparente das sementes de mamão no decorrer do experimento. No entanto, do ponto de vista qualitativo, a simulação apresentou uma boa aproximação e foi capaz de auxiliar na compreensão do comportamento das sementes no interior do leito de jorro.

Foi verificada a influência de variáveis envolvidas na secagem das sementes de mamão em leito de jorro, e pode-se concluir que, maiores valores de temperatura e de velocidade do ar favorecem a operação de secagem da semente, o que se traduz em taxas de secagem mais elevadas. Além disso, verificou-se que o leito de jorro apresentou uma maior eficiência na operação de secagem de sementes de mamão se comparado à secagem em estufa, resultado este que pode ser atribuído ao movimento cíclico das partículas no interior do leito, o que proporciona altas taxas de transferência de calor e de massa.

Por fim, foi possível concluir que o leito de jorro se mostrou eficaz na secagem de sementes de mamão operando em períodos curtos com baixas temperaturas de ar, característica que torna a técnica promissora para o aquecimento e secagem de produtos alimentares. Portanto, o trabalho possuiu importância pois auxilia na compreensão do processo de secagem de sementes em leito de jorro, uma vez que combina resultados quantitativos, dados pelo estudo experimental, e resultados qualitativos, proporcionados pelo uso das técnicas de CFD.

REFERÊNCIAS

- AFOLABI, I. S. et al. Radiations and biodegradation techniques for detoxifying Carica papaya seed oil for effective dietary and industrial use. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 10, p. 6475–6483, 2015.
- AL-HASHEMI, H. M. B.; AL-AMOUDI, O. S. B. A review on the angle of repose of granular materials. **Powder Technology**, v. 330, p. 397–417, 2018.
- ALMEIDA, R. L. J. et al. Obtenção de batata-doce em pó em leito de jorro e influência da temperatura de secagem nas propriedades físico-químicas. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 4, 2020.
- ALTINO, H. O. N. Secagem em leito fixo de materiais granulares com diferentes esfericidades. 2019. 73 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.
- ANDRADE, E. T. DE et al. Cinética De Secagem E Qualidade De Sementes De Feijão. **Engvista**, v. 8, n. 2, p. 83–95, 2006.
- ANSYS CFX. ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. **Release 14.0. Canonsburg**, 2011.
- ANSYS FLUENT. ANSYS Fluent User's Guide. **Releasde 15.0. Canosburg**, 2013.
- ANSYS MESHING. ANSYS Meshing User's guide. **Release 13.0. Canonsburg**, 2010.
- ARIM, A. L. Avaliação da secagem de sementes de mamão formosa (Carica papaya L.) utilizadas na adsorção do corante vermelho do congo. 2014. Tese (Mestrado em Engenharia)-Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2014.
- ARROTÉIA, D. R. et al. Estudo Do Processo De Secagem Da Linhaça Em Leito Fluidizado E Em Leito De Jorro. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 2, p. 215–224, 2017.
- ARTUR, A. P. S. et al. Estudo fluidodinâmico do leito de jorro 2D para materiais orgânicos. **Revista Higiene Alimentar**, v. 32, p. 111–116, 2018.
- ARTUR, A. P. S. et al. Análise de mínima fluidização de leito fluidizado em 3D via CFD para o material orgânico café. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 4851–4865, 2020.
- AVERSA, M. et al. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 3, p. 922–932, 2007.
- BARCELOS, K. M. Análise do potencial do leito de jorro como reator para pirólise da casca de coco: Estudo experimental e de simulação CFD. 2016, 113 p. Tese (Mestrado em Energia)-Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2016.
- BARROSO, P. T. W. et al. Evaluation of the composition of Carica papaya L. seed oil extracted with supercritical CO₂. **Biotechnology Reports**, v. 11, p. 110–116, 2016.

- BARROZO, M. A. S.; SANTOS, K. G.; CUNHA, F. G. Mechanical extraction of natural dye extract from *Bixa orellana* seeds in spouted bed. **Industrial Crops and Products**, v. 45, p. 279–282, 2013.
- BEKKIOUI, N. et al. Modelling of a solar wood dryer with glazed walls. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 11, n. 3, p. 191–205, 2009.
- BERBERT, P. A. et al. Qualidade fisiológica de semente de mamão em função da secagem e do armazenamento. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 1, p. 40–48, 2008.
- BÉTTEGA, R.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Scale-up study of spouted beds using computational fluid dynamics. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, n. 2, p. 193–203, 2009.
- BEZERRA, C. V. et al. Green banana (*Musa cavendishii*) flour obtained in spouted bed - Effect of drying on physico-chemical, functional and morphological characteristics of the starch. **Industrial Crops and Products**, v. 41, n. 1, p. 241–249, 2013.
- BORTOLOTTI, C. T. et al. Hydrodynamic study of a mixture of West Indian Cherry Residue and Soybean Grains in a spouted bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 91, n. 11, p. 1871–1880, 2013.
- BOYCE, C. M. et al. Limitations on Fluid Grid Sizing for Using Volume-Averaged Fluid Equations in Discrete Element Models of Fluidized Beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 54, n. 43, p. 10684–10697, 2015.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de defesa agropecuária. **Regras para análise de sementes**, Brasília, p. 399, 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946_regras_analise__sementes.pdf>. Acesso em: 06 març. 2021.
- BRAZ, B. H.; MAIA, G. D.; FREIRE, J. T. Efeito da forma da partícula nos parâmetros fluidodinâmicos de um leito de jorro semicilíndrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 38., 2017, Maringá. **Anais [...]**. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2017. p. 1-13.
- CARLESSO, V. D. O. Secagem e Armazenamento de Sementes de mamão (*Carica papaya* L.). 2009. 132 p. Tese (Doutorado em Agropecuária)-Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2009.
- CARLESSO, V. DE O. et al. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 27, n. 3, p. 444–448, 2005.
- CARPES, D. P. Distribuição Longitudinal De Sementes De Milho E Soja Em Função Do Tubo Condutor , Mecanismo Dosador e Densidade de Semeadura. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014, p. 87, 2014.
- ÇEÇEN, A. The maximum spoutable bed heights of fine particles spouted with air. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 72, n. 5, p. 792–797, 1994.

- CHEIM, L. M. G. et al. Characterization of the Seeds of a Landrace Popcorn (*Zea mays* L. subsp. *mays*) Cropped in an Organic System via Family Farming. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. 1–22, 2021.
- CHEN, Z. Hydrodynamics Stability and Scale-up of Slot-Rectangular Spouted Beds. 2008. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Universidade da Columbia Britânica, Vancouver, 2008.
- CHIELLE, D. P. et al. Spouted bed drying of papaya seeds for oil production. **LWT - Food Science and Technology**, v. 65, p. 852–860, 2016.
- CORREIA, T. P. DA S. et al. Influência da inclinação do terreno e velocidade de operação na semeadura de sorgo por semeadora de fluxo contínuo. v. 30, p. 331–337, 2015.
- COSTA, A. B. S. Secagem convectiva de folhas de hortelã: análise baseada no ajuste de correlações empíricas, superfícies de respostas e redes neurais. 2013. 109 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.
- CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**. 2 ed. São Paulo, Editora Blucher, 2014.
- CUNHA, F. G. et al. Annatto powder production in a spouted bed: An experimental and CFD study. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 2, p. 976–982, 2009.
- CUNHA, F. G. E. Estudo da extração mecânica de bixina das sementes de urucum em leito de jorro. 2008. 92 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- DA ROSA, C. A. Estudo experimental e numérico da fluidodinâmica e das transferências de calor e massa em um leito de jorro contínuo : Uso da técnica CFD. 2010. 97 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- DA SILVA, D. I. S. et al. Changes of antioxidant constituents in pineapple (*Ananas comosus*) residue during drying process. **Industrial Crops and Products**, v. 50, p. 557–562, 2013.
- DE ALMEIDA, C.; ROCHA, S. C. S. Eficiência do processo de recobrimento de sementes de brócolos recobertas com polímero em leito de jorro. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 305–314, 2008.
- DE BRITO, R. C. et al. Effect of mechanical energy on the energy efficiency of spouted beds applied on drying of sorghum [*Sorghum bicolor* (L) moench]. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 117, n. March, p. 95–105, 2017.
- DE MELO, D. M. et al. Irrigation of papaya in a sandy loam soil in the semiarid of Bahia, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 1, p. 1–8, 2020.
- DIAS, R. A. L. Extração de fenóis e taninos totais da casca da romã (*Punica granatum*, L.) Efeito da secagem em leito de jorro sobre a extração de fenóis e taninos totais da casca da romã (*Punica granatum*, L.). 2015. 132 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

DO NASCIMENTO, L. D. Caracterização, análise fluidodinâmica e secagem de sementes de painço em leito de jorro. 2014. 141 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

DO NASCIMENTO, L. D. et al. Fluid-dynamics evaluation in a conical spouted bed and characterization of foxtail millet seeds. **Particuology**, v. 23, p. 75–81, 2015.

DOGAN, O. M. et al. Hydrodynamics and stability of slot-rectangular spouted beds. Part I: Thin bed. **Chemical Engineering Communications**, v. 181, p. 225–242, 2000.

DUARTE, C. R. Estudo Experimental E De Simulação Da Fluidodinâmica E Recobrimento Em Leito De Jorro. 2006. 194 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

DUARTE, C. R.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. A study of the fluid dynamics of the spouted bed using CFD. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 22, n. 2, p. 263–270, 2005.

DUZZIONI, A. G. et al. Effect of drying kinetics on main bioactive compounds and antioxidant activity of acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) residue. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 1041–1047, 2013.

EMBRAPA. A cultura do mamão. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica (Coleção Plantar, 65)**, p. 130, 2009. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/128280/1/PLANTAR-Mamuo-ed03-2009.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

ESCUDEIRO, R. L.; FERREIRA, M. C. Avaliação De Índices De escoabilidade De Pós Obtidos a Partir Da Secagem De Suspensões Em Leitos De Jorro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 1., 2014, São Carlos. **Anais [...]** São Carlos: Blucher Chemical Engineering Proceedings, 2014. p. 312-317.

FERNANDEZ-AKARREGI, A. R. et al. Design and operation of a conical spouted bed reactor pilot plant (25 kg/h) for biomass fast pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v. 112, p. 48–56, 2013.

FERREIRA, A. D. Estudo experimental e numérico da fluidodinâmica de um leito de jorro. 2019. 54p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2019.

FERREIRA, C. G. et al. Estudo Da Fluidodinâmica De Um Leito De Jorro Aplicado a Uma Mistura De Casca De Coco E Areia Via Análise Experimental E Simulação Por Cfd. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12., 2017, São Carlos. **Anais [...]** São Carlos: Blucher Chemical Engineering Proceedings, 2017. p. 1944–1949.

GORINSTEIN, S. et al. Comparative contents of dietary fiber, total phenolics, and minerals in persimmons and apples. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 49, n. 2, p. 952-957, 2001.

GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder technology**, v. 7, n. 5, p. 285-292, 1973.

GRBAVCIC, B. et al. Fluid flow pattern, minimum spouting velocity and pressure drop in spouted beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 54, n. 1-2, p. 33-42, 1976.

HAMEED, B. H. Evaluation of papaya seeds as a novel non-conventional low-cost adsorbent for removal of methylene blue. **Journal of Hazardous Materials**, v. 162, n. 2-3, p. 939-944, 2009.

IBGE. Produção Agrícola Municipal. p. 1-4, 2020. Disponível em: <http://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/brasil/mamao/b1_mamao.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2022.

JAYATUNGA, G. K.; AMARASINGHE, B. M. W. P. K. Drying kinetics, quality and moisture diffusivity of spouted bed dried Sri Lankan black pepper. **Journal of Food Engineering**, v. 263, p. 38-45, 2019.

JITTANIT, W.; SRZEDNICKI, G.; DRISCOLL, R. Seed drying in fluidized and spouted bed dryers. **Drying Technology**, v. 28, n. 10, p. 1213-1219, 2010.

JONG, J. A. H.; HOFFMANN, A. C.; FINKERS, J. Properly determine powder flowability to maximize plant output. **Chemical Engineering Progress**, v. 95, p. 25-34, 1999.

JORGE, N.; MALACRIDA, C. R. Extratos De Sementes De Mamão (C Arica Papaya L.) Como Fonte De Antioxidantes Naturais *. **Alim.Nutr., Araraquara**, v. 19, p. 337-340, 2008.

JÚNIOR, I. P.; DUARTE, C. R.; SANTOS, D. A. DOS. Estudo Experimental E De Simulação Da Fluidodinâmica Do Leito De Jorro. **Revista Horizonte Científico**, v. 9, p. 1-21, 2015.

KOWALSKA, H. et al. What's new in biopotential of fruit and vegetable by-products applied in the food processing industry. **Trends in Food Science and Technology**, v. 67, p. 150-159, 2017.

LI, Y.; CHE, D.; LIU, Y. CFD simulation of hydrodynamic characteristics in a multiple-spouted bed. **Chemical Engineering Science**, v. 80, p. 365-379, 2012.

LITTMAN, H. et al. A theory for predicting the maximum spoutable height in a spouted bed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 55, n. 5, p. 497-501, 1977.

LOPES, H. M.; SOUZA, C. M. Efeitos da giberelina e da secagem no condicionamento osmótico sobre a viabilidade e o vigor de sementes de mamão (Carica papaya L.). **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 1, p. 181-189, 2008.

LOPEZ, G. et al. Kinetic modeling and experimental validation of biomass fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Chemical Engineering Journal**, v. 373, n. March, p. 677-686, 2019.

LOURENÇO, G. A. Transporte pneumático horizontal de partículas de baixa densidade:

proposta de um sistema de alimentação e estudos de fluidodinâmica. 2019. 155 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

LOURENÇO, R. DE O. Identificação e monitoramento de regimes de escoamento em leito de jorro. 2006. 115 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

MALACRIDA, C. R.; KIMURA, M.; JORGE, N. Characterization of a high oleic oil extracted from papaya (*Carica papaya* L.) seeds. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 31, n. 4, p. 929–934, 2011.

MALEK, M. A.; LU, B. C. Y. Pressure drop and spoutable bed height in spouted beds. **Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development**, v. 4, n. 1, p. 123–128, 1965.

MALEK, M. A.; MADONNA, L. A.; LU, B. C. Y. Estimation of spout diameter in a spouted bed. **Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development**, v. 2, n. 1, p. 30–34, 1963.

MALEKJANI, N.; JAFARI, S. M. Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. **Trends in Food Science and Technology**, v. 78, p. 206–223, 2018.

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

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted beds**. New York: Academic Press, 1974. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ss0TfGgfEiIC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Spouted+beds&ots=aDHdGDSFdz&sig=QwsPY2aMH8aKuP0CJN7D0d94vy0&redir_esc=y#v=onepage&q=Spouted%20beds&f=false>. Acesso em: 8 jun. 2022.

MORGAN, M. H.; LTTTMAN, H. Predicting the Maximum Spoutable Height in Spouted Beds of Irregularly Shaped Particles. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 21, n. 1, p. 23–26, 1982.

MUSSI, L. P. et al. Spouted bed drying of jambolão (*Syzygium cumini*) residue: Drying kinetics and effect on the antioxidant activity, anthocyanins and nutrients contents. **LWT - Food Science and Technology**, v. 61, n. 1, p. 80–88, 2015.

MUJUMDAR, A. S.; DEVAHASTIN, S. **Fundamental principles of drying**. Exergex, Brossard, Canada, v. 1, n. 1, p. 1-22, 2000. Disponível em: <<http://staff.sut.ac.ir/haghighi/download/documents/Drying.pdf>>. Acesso em 08 jun. 2022.

NIKSIAR, A.; SOHRABI, M.; RAHIMI, A. Comparative Evaluation of Existing Correlations to Predict Spouted Bed Hydrodynamics. **Drying Technology**, v. 31, n. 9, p. 975–989, 2013.

NORTON, T.; SUN, D. W. Computational fluid dynamics (CFD) - an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 17, n. 11, p. 600–620, 2006.

OLIVEIRA, A. D. S. et al. Desenvolvimento e construção de leito de jorro para recobrimento de partículas de ureia. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 4, p. 32–45, 2019.

OZEN, M. **Meshing workshop**. Ozen Engineering, Inc. [Portable Document Format]. 2014. Disponível em:
<https://d1wqtxtslxzle7.cloudfront.net/51822095/MESHING_WORKSHOP_2014-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1654710685&Signature=PS0WoE6OjU9qobH1kvg~smGpDpfzzYGhY4RvGquDriBX-K083DJQQMblfF1T4ujpmS9T1-LjVpyXmJUlw787slBWtc~cOvaQdykY5WjJ~F9vd~wcpfEfY3RzIGZGVMKnyQkrswWZawXMDAwY2MgkEpPtX6-usKLi4XFPofCaMiGJyxVTouUu~XzXTm2YQjr~UNaXw6KaqlcvRPSYqE9zalPYyphJ8slOzl7uQGH1J5QUVckbNupZJqON8k1GsgQfFER2z8Y2AYRvbHRGyM-7aVRkg5a6bvpkibO9fLFZDL2bwAi1c8o047rFj7X5ASx81jBzINgj9WxPE41mQTF2A__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA>. Acesso em 8 jun. 2022.

PARK, K. J. B. et al. Considerações Termodinâmicas das Isotermas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. 83–94, 2008.

PARK, K. J. B. et al. Secagem: Fundamentos E Equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 16, n. 1, p. 93–127, 2014.

PESHEV, D. et al. Particle formulation of hydroalcoholic rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) extracts using a spouted bed. **Particuology**, v. 51, p. 26–34, 2020.

POZITANO, M.; ROCHA, S. C. DOS S. Caracterização física e germinação de sementes de *Senna macranthera*. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 4, p. 777–784, 2011.

RAMALHO, H. F.; SUAREZ, P. A. Z. A química dos óleos e gorduras e seus processos de extração e refino. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 1, p. 2–15, 2013.

RINALDI, M. M.; LIMA, T. A. DE; PALMIRO, D. A. R. Caracterização Física de Frutos de Mamão e Química de Cascas e Sementes. **Embrapa Cerrados-Boletim de pesquisa e desenvolvimento-263**, p. 17, 2010.

ROCHA, A. P. T. et al. Coating process of *Phyllanthus niruri* Linn granules using spouted bed. **Powder Technology**, v. 336, p. 85–91, 2018.

SAHIN, S.; SUMNU, G.; TUNABOYU, F. Usage of solar-assisted spouted bed drier in drying of pea. **Food and Bioproducts Processing**, v. 91, n. 3, p. 271–278, 2013.

SANTANA, E. B. Análise experimental do comportamento fluidodinâmico e da secagem de sementes de linhaça em leito de jorro. 2011. 143 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

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

SANTOS, K. G. DOS. Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por cfd com malhas

tridimensionais. 2008. 110 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SANTOS, S. A. DOS et al. Estudos morfo-anatômicos de sementes de dois genótipos de mamão (Carica papaya L.). **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 2, p. 116–122, 2009.

SANTOS, V. D. DOS et al. Estudo comparativo da secagem em leitos de jorro e fluidizado de sementes de cevada (Hordeum vulgare L.). **Revista da Jornada da Pós-Graduação e Pesquisa- Congrega**, v. 15, p. 168–178, 2018.

SARAVIA, C. T.; PERES, W. B.; RISSO, J. Manejo da temperatura do ar na secagem intermitente de sementes de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 29, n. 2, p. 23–27, 2007.

SCHMIDT, A. K. O.; CONDOTTA, R. Estudo Da Secagem Da Polpa De Celulose Branqueada / Study of Cellulose Pulp Drying. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 82357–82371, 2020.

SENRAYAN, J.; VENKATACHALAM, S. Solvent-assisted extraction of oil from papaya (Carica papaya L.) seeds: evaluation of its physiochemical properties and fatty-acid composition. **Separation Science and Technology (Philadelphia)**, v. 53, n. 17, p. 2852–2859, 2018.

SILVA, B. R. D. S. et al. Estudo experimental da fluidodinâmica em leito de jorro de misturas binárias de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e de inertes. **Scientia Plena**, v. 14, n. 6, p. 1–10, 2018.

SOARES, A. C.; PEREIRA, N. R. Secagem da polpa de jambolão (Syzygium cumini) em secador de leito de jorro: efeito da clara de ovo como agente carreador de secagem na qualidade do produto. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 23, p. 1–15, 2020.

SOBIESKI, W. Numerical analysis of sensitivity of eulerian multiphase model for a spouted-bed grain dryer. **Drying Technology**, v. 26, n. 12, p. 1438–1456, 2008.

SOUSA, R. C. et al. Drying of pasty and granular materials in mechanically and conventional spouted beds. **Particuology**, v. 42, p. 176–183, 2019.

SOUZA, A. S.; FREIRE, J. T.; BÉTTEGA, R. Computational Fluid Dynamics Evaluation of the Influence of Cone Geometry on Solids Circulation in Spouted Beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 57, n. 41, p. 13876–13888, 2018.

TAN, C. X.; TAN, S. T.; TAN, S. S. An overview of papaya seed oil extraction methods. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 4, p. 1506–1514, 2020.

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

TOME, A. C.; AUGUSTINHA, B. F. Teor de Vitamina C em Farinha da Casca, Polpa e Semente de Mamão (Carica papaya) Submetidas a Diferentes Temperaturas de Secagem. **Uniciências**, v. 22, n. especial, p. 43–46, 2018.

VENTURINI, T. et al. Estudo Da Secagem E Extração De Sementes De Mamão (Carica Papaya L.). **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 5, n. 5, p. 950–959, 2012.

VIEIRA NETO, J. L. et al. Effect of a draft tube on the fluid dynamics of a spouted bed: Experimental and CFD studies. **Drying Technology**, v. 26, n. 3, p. 299–307, 2008.

VINGERING, N. et al. Fatty acid composition of commercial vegetable oils from the French market analysed using a long highly polar column. **Oleagineux Corps Gras Lipides**, v. 17, n.3, p. 185–192, 2010.

YANTY, N.A.M. et al. Physico-chemical characteristics of Papaya (Carica papaya L.) seed oil of the Hong Kong/Sekaki variety. **Journal of Oleo Science**, v. 63, n. 9, p. 885–892, 2014.

ZHONGHUA, W.; MUJUMDAR, A. S. Simulation of the hydrodynamics and drying in a spouted bed dryer. **Drying Technology**, v. 25, n. 1, p. 59–74, 2007.

APÊNDICE A – Calibração dos sensores

Para a calibração dos sensores de pressão foi utilizado um manômetro em tubo U preenchido com água. O valor da pressão lida no manômetro em tubo U foi comparado com o valor fornecido pelo *software* de aquisição de dados, conforme Tabela A.1.

Tabela A.1 – Dados utilizados para a calibração da pressão.

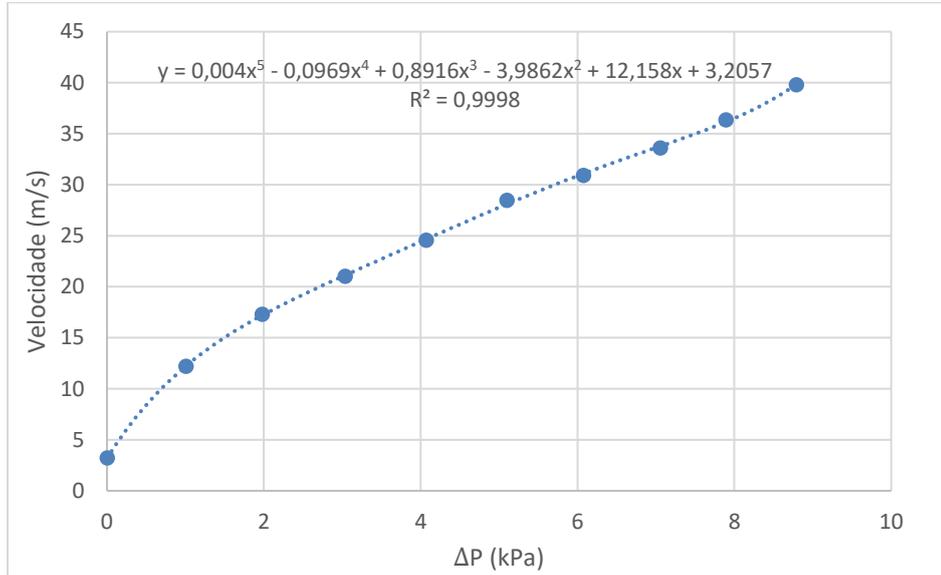
P jorro aquisição <i>software</i> (Pa)	P manômetro U (Pa)	Diferença percentual (%)
11,10	0,00	-
68,92	62,78	8,9
66,73	70,63	5,8
60,61	52,97	12,6
54,39	55,92	2,8
49,58	46,60	6,0
43,39	45,62	5,1
39,96	39,24	1,8
36,75	45,62	24,1
36,49	38,75	6,2
37,00	40,71	10,0
40,47	44,15	9,1
44,33	52,48	18,4

Fonte: Da autora (2022).

Notou-se uma proximidade muito grande dos valores obtido pelo sensor de pressão da unidade e pelo manômetro tubo em U, e sabendo que os valores fornecidos pelo sensor eram mais confiáveis pois não dependiam de uma leitura imprecisa de altura de líquido, optou-se por não entrar com uma equação de calibração.

Já a velocidade de ar alimentado no leito de jorro foi obtida por método indireto utilizando-se dos valores de queda de pressão na placa de orifício. Utilizou-se um anemômetro modelo *Instrotherm* TAD-500 para a aquisição dos valores de velocidade. A Figura A.1 apresenta os resultados das medidas e a equação de calibração obtida, em que x representa a queda de pressão no orifício (ΔP) e y representa a velocidade na entrada do leito. A Tabela A.2 apresenta os valores obtidos antes e após a calibração.

Figura A.1 – Equação obtida para a calibração da velocidade.



Fonte: Da autora (2022).

Tabela A.2 – Dados utilizados para a calibração da velocidade.

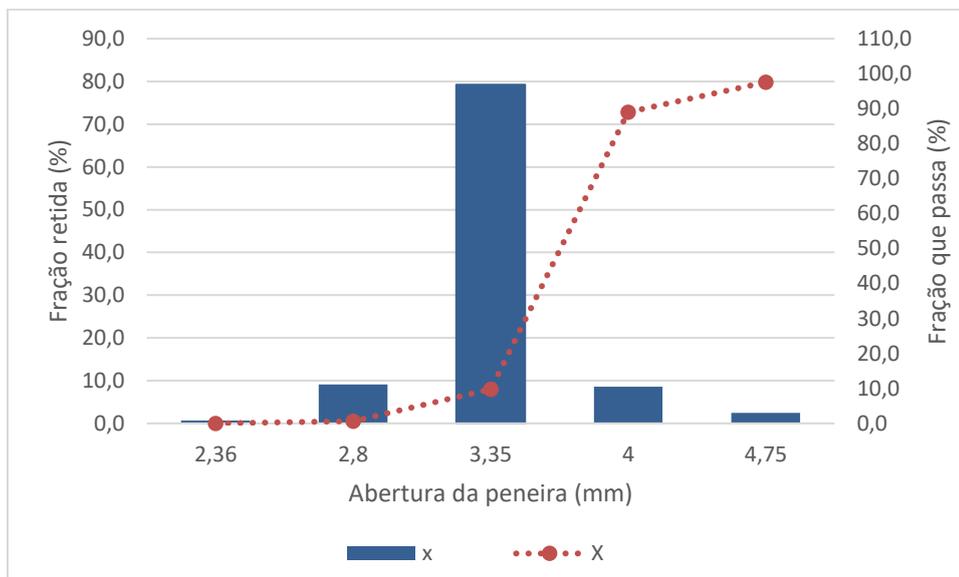
ΔP placa de orifício (kPa)	V anemômetro (m/s)	V corrigida (m/s)	Diferença percentual (%)
0,000	3,200	3,206	0,178
1,005	12,200	12,209	0,071
1,980	17,300	17,204	0,553
3,035	21,000	21,121	0,578
4,070	24,550	24,647	0,395
5,100	28,450	28,048	1,412
6,075	30,900	30,968	0,219
7,055	33,600	33,515	0,254
7,890	36,350	35,696	1,800
8,790	39,800	39,044	1,900

Fonte: Da autora (2022).

APÊNDICE B – Distribuição granulométrica das sementes de mamão após secas

As Figuras a seguir apresentam as curvas granulométricas para as sementes de mamão após secas sem exotesta (Figura B.1) e com exotesta (Figura B.2).

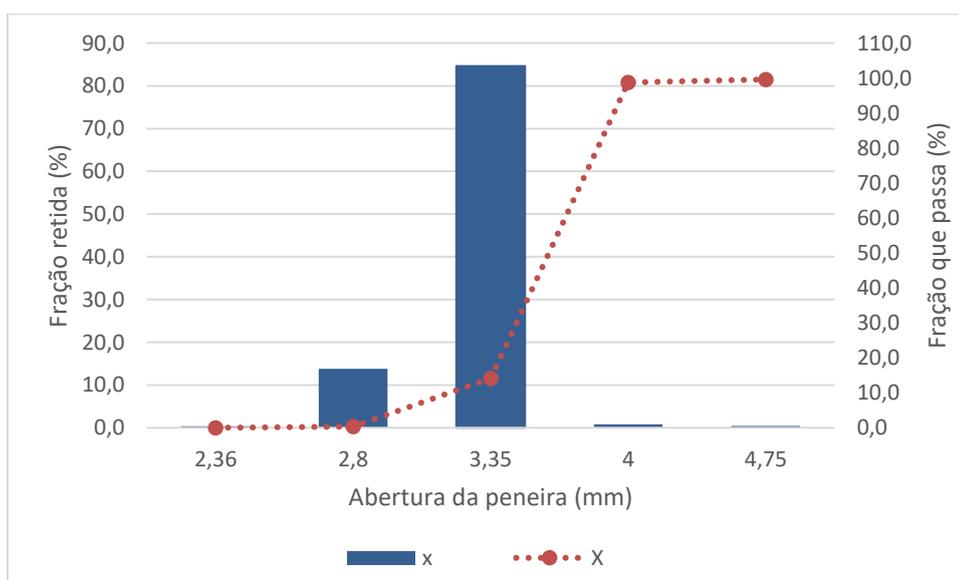
Figura B.1 – Curva granulométrica das sementes de mamão após secas sem exotesta.



Legenda: x representa a frequência relativa e X a frequência acumulada.

Fonte: Da autora (2022).

Figura B.2 – Curva granulométrica das sementes de mamão após secas com exotesta.



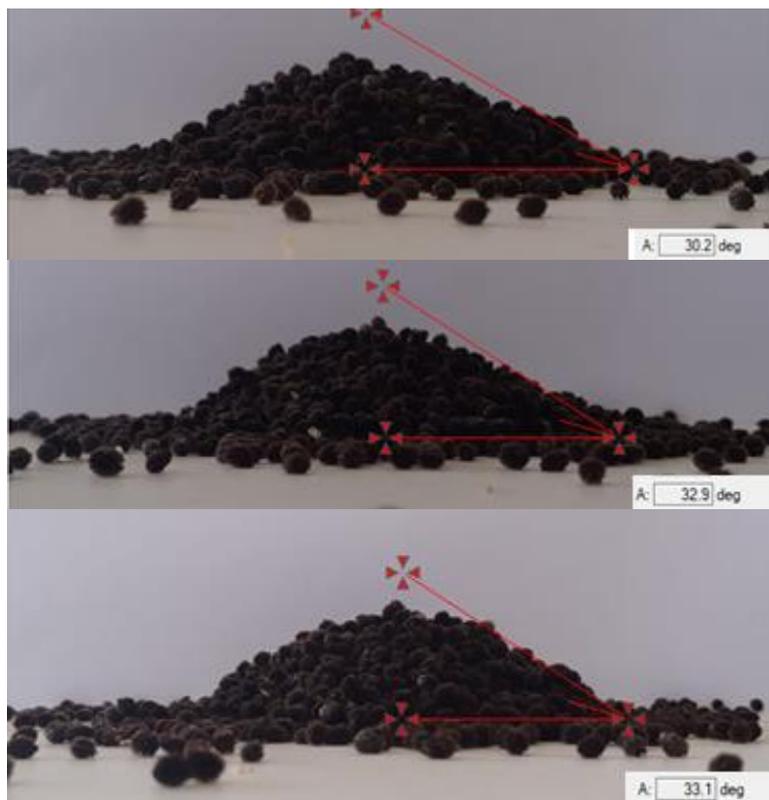
Legenda: x representa a frequência relativa e X a frequência acumulada.

Fonte: Da autora (2022).

APÊNDICE C – Determinação do ângulo de repouso

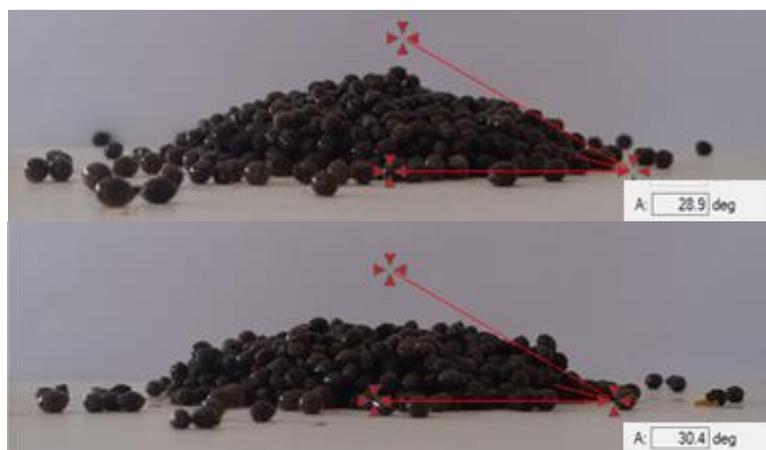
Abaixo são apresentadas as figuras para a obtenção do ângulo de repouso para as sementes *in natura* sem exotesta (Figura C.1) e com exotesta (Figura C.2) e também para as sementes após secas sem exotesta (Figura C.3).

Figura C.1 – Sementes *in natura* sem exotesta.



Fonte: Da autora (2022).

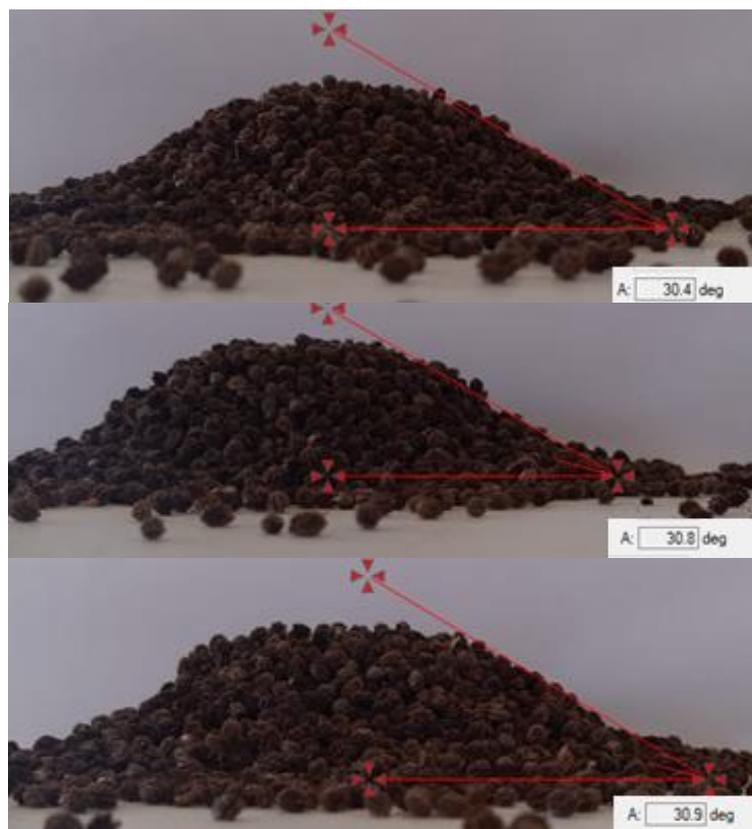
Figura C.2 – Sementes *in natura* com exotesta.





Fonte: Da autora (2022).

Figura C.3 – Sementes após secas sem exotesta.

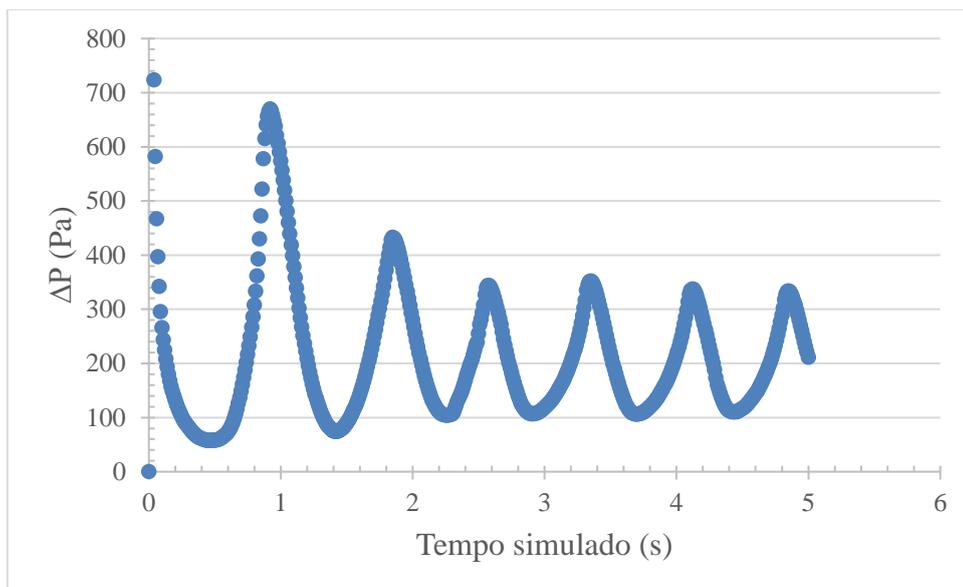


Fonte: Da autora (2022).

APÊNDICE D – Simulação de padrões de escoamento no leito de jorro

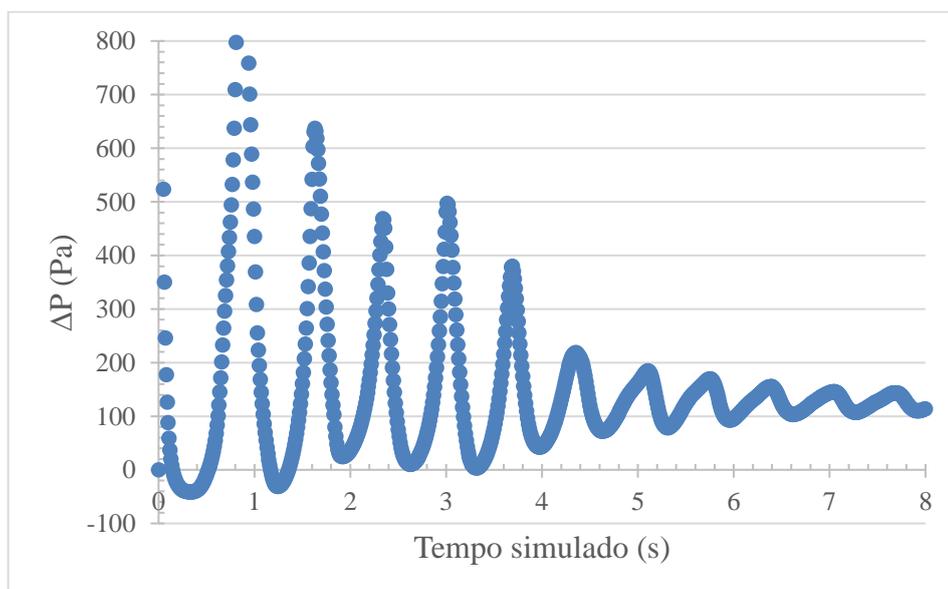
As Figuras a seguir apresentam os valores completos de queda de pressão na entrada do leito com o tempo para cada condição de escoamento simulada. Apartir da média dos valores após estabilização foram obtidos os valores apresentados na Tabela 5.11.

Figura D.1 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 10 m/s e altura do leito de sementes de 0,08 m.



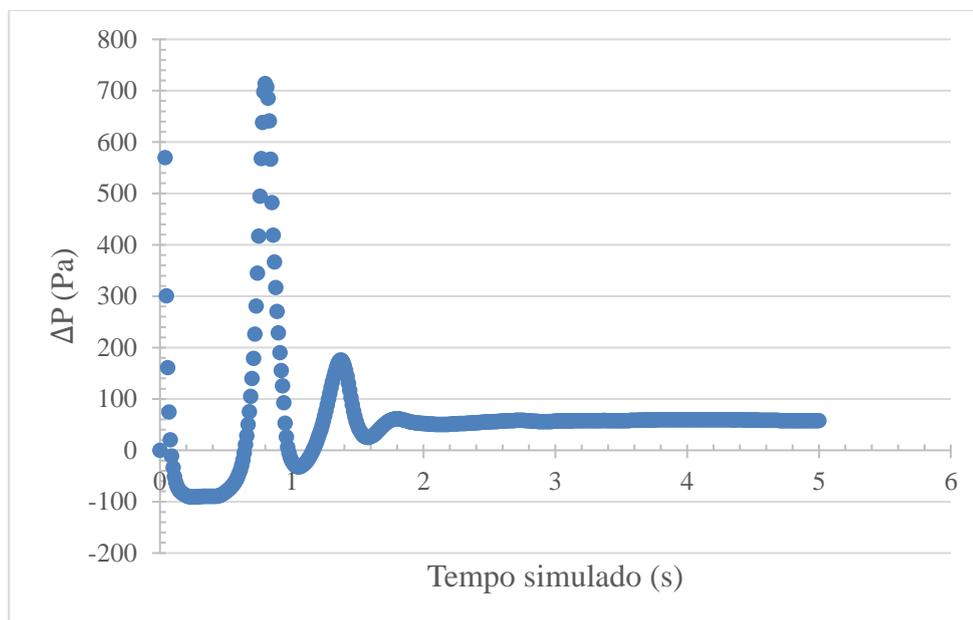
Fonte: Da autora (2022).

Figura D.2 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 15 m/s e altura do leito de sementes de 0,08 m.



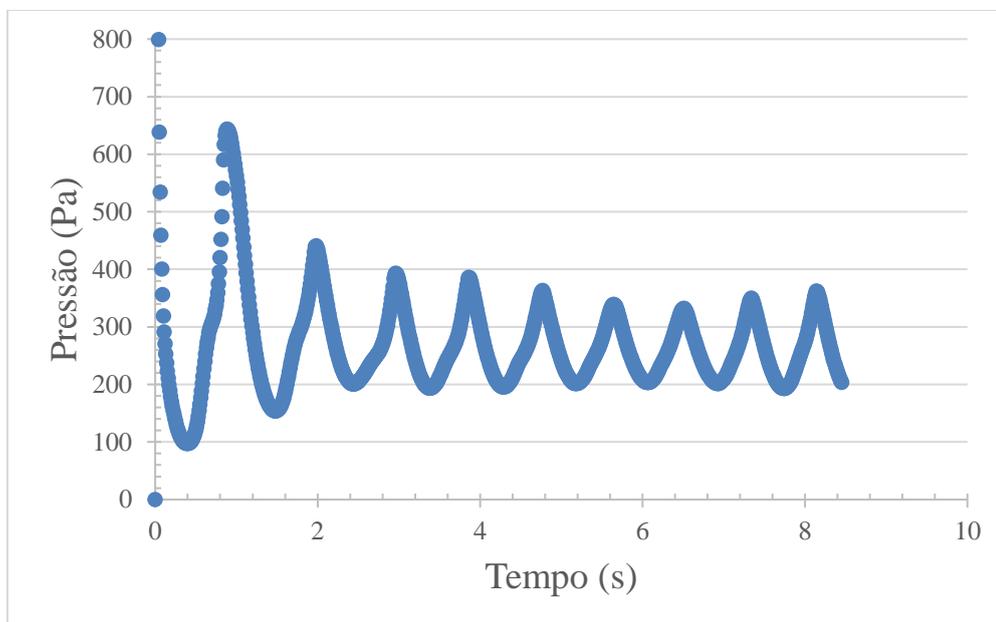
Fonte: Da autora (2022).

Figura D.3 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 20 m/s e altura do leito de sementes de 0,08 m.



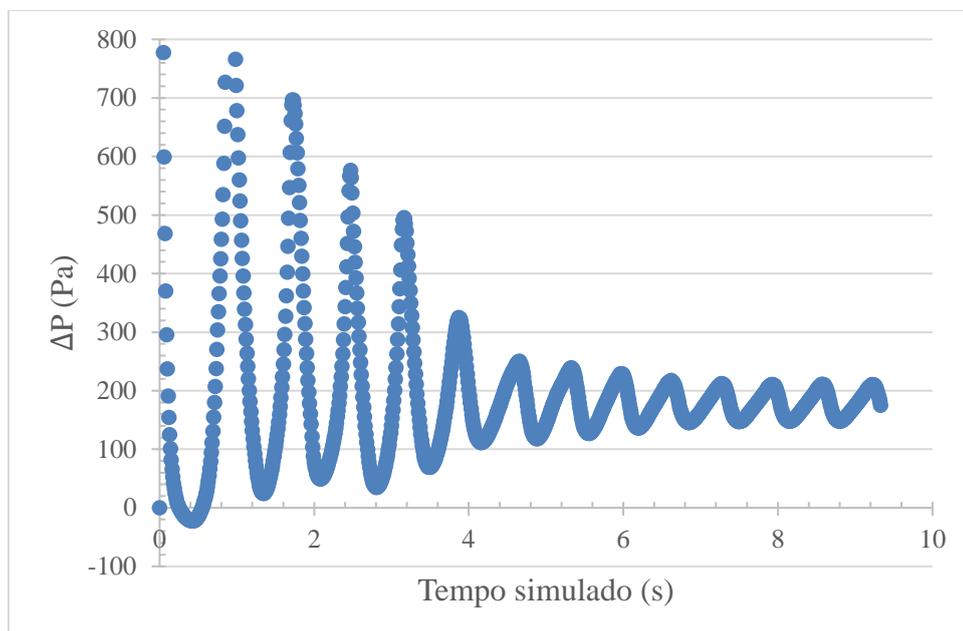
Fonte: Da autora (2022).

Figura D.4 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 10 m/s e altura do leito de sementes de 0,10 m.



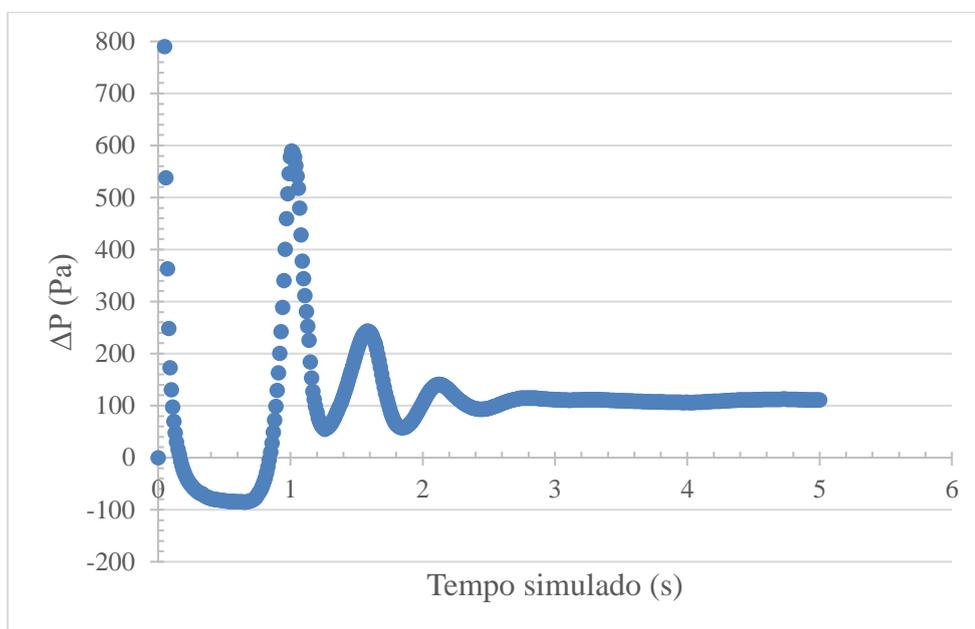
Fonte: Da autora (2022).

Figura D.5 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 15 m/s e altura do leito de sementes de 0,10 m.



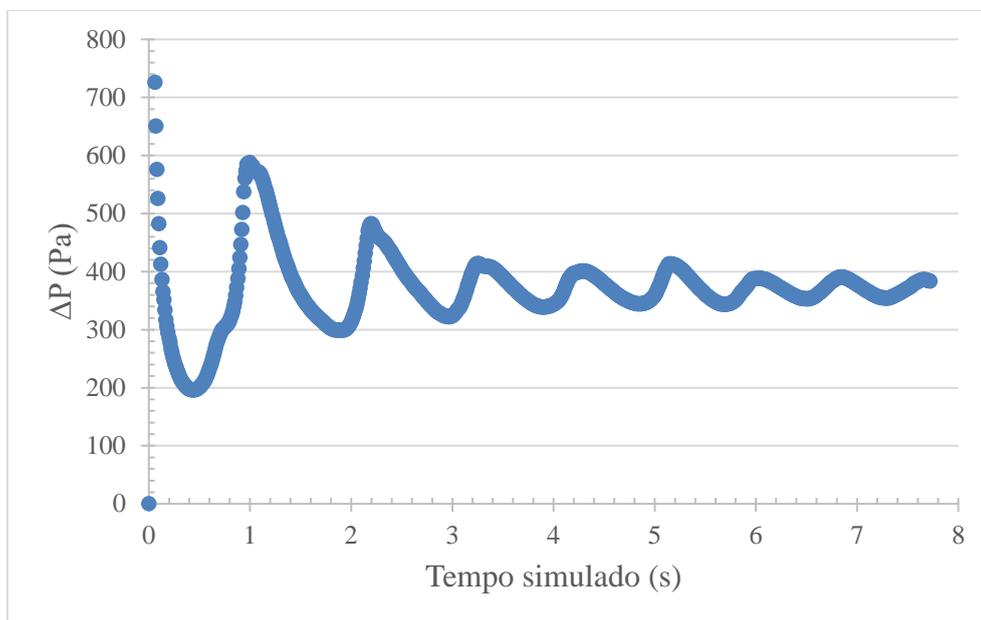
Fonte: Da autora (2022).

Figura D.6 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 20 m/s e altura do leito de sementes de 0,10 m.



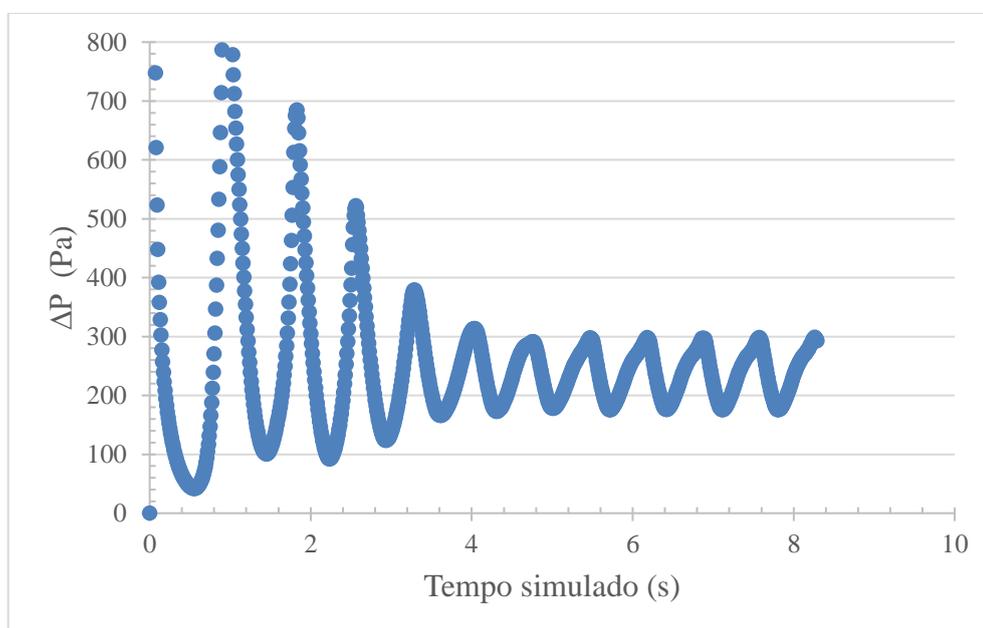
Fonte: Da autora (2022).

Figura D.7 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 10 m/s e altura do leito de sementes de 0,12 m.



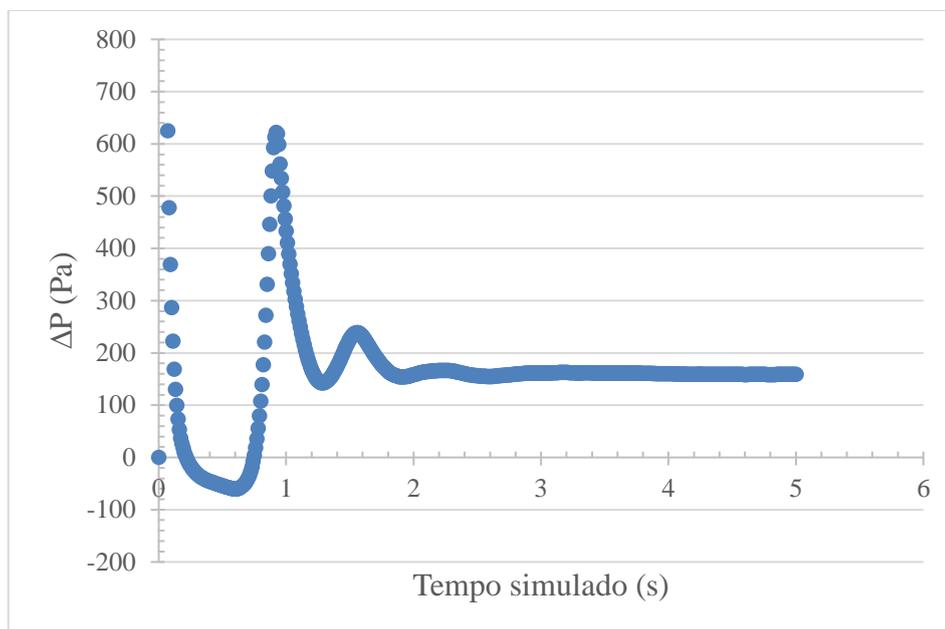
Fonte: Da autora (2022).

Figura D.8 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 15 m/s e altura do leito de sementes de 0,12 m.



Fonte: Da autora (2022).

Figura D.9 – Gráfico de queda de pressão versus tempo para a simulação com velocidade de 20 m/s e altura do leito de sementes de 0,12 m.



Fonte: Da autora (2022).

APÊNDICE E – Resultados de umidade e taxa de secagem em leite de jorro

A Tabela E.1 apresenta todos os cálculos realizados para obtenção da umidade e taxa de secagem seguido dos seus respectivos resultados.

Tabela E.1 – Dados e resultados de umidade inicial e final e taxa de secagem.

Exp.	T_{média} do ar (°C)	Velocidade (m/s)	Umidade inicial (%) b.u.	Umidade final (%) b.u.	Taxa de secagem (% b.u. / h)
1	40 (± 0,000)	24 (± 0,708)	74,749 (± 0,416)	68,391 (± 0,084)	25,433 (± 1,979)
2	40 (± 2,828)	31 (± 1,126)	74,294 (± 0,164)	62,569 (± 0,972)	46,903 (± 3,253)
3	40 (± 9,899)	36 (± 1,026)	77,510 (± 0,629)	62,658 (± 0,587)	59,410 (± 2,773)
4	50 (± 1,061)	24 (± 0,708)	76,128 (± 0,231)	67,565 (± 0,722)	34,254 (± 2,797)
5	50 (± 0,354)	31 (± 1,126)	75,656 (± 0,414)	64,075 (± 0,754)	46,325 (± 3,993)
6	50 (± 4,243)	36 (± 1,026)	73,347 (± 0,497)	51,766 (± 1,758)	86,325 (± 8,996)
7	50 (± 3,536)	36 (± 1,026)	77,977 (± 2,228)	55,330 (± 2,144)	90,586 (± 16,586)
8	50 (± 2,475)	36 (± 1,026)	74,649 (± 0,734)	52,143 (± 1,070)	90,024 (± 6,748)
9	64 (± 1,414)	24 (± 0,708)	75,009 (± 0,174)	60,679 (± 1,068)	57,311 (± 3,874)
10	64 (± 6,364)	31 (± 1,126)	73,834 (± 0,156)	47,083 (± 0,431)	107,003 (± 1,158)
11	64 (± 2,828)	36 (± 1,026)	74,402 (± 0,256)	48,552 (± 2,043)	103,402 (± 7,608)

Fonte: Da autora (2022).