

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO

ANA CAROLINA RIBEIRO STOPPE

APERFEIÇOAMENTO DE UMA UNIDADE EXPERIMENTAL DE LEITO DE JORRO  
COM PARTICULADO INERTE PARA A PRODUÇÃO DE FERTILIZANTE FOLIAR

Uberaba  
2021

ANA CAROLINA RIBEIRO STOPPE

APERFEIÇOAMENTO DE UMA UNIDADE EXPERIMENTAL DE LEITO DE JORRO  
COM PARTICULADO INERTE PARA A PRODUÇÃO DE FERTILIZANTE FOLIAR

Dissertação apresentada ao Programa de  
Mestrado Profissional em Inovação  
Tecnológica, da Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro, como exame de defesa.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Kássia Graciele dos  
Santos  
Coorientador: Prof. Dr. José Luiz Vieira  
Neto

Uberaba  
2021

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro**

S886a Stoppe, Ana Carolina Ribeiro  
Aperfeiçoamento de uma unidade experimental de leito de jorro com  
particulado inerte para a produção de fertilizante foliar / Ana Carolina  
Ribeiro Stoppe. -- 2022.  
135 f. : il., graf., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) -- Uni-  
versidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2022

Orientadora: Profa. Dra. Kássia Graciele dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. José Luiz Vieira Neto

1. Instrumentos de medição. 2. Leito de secagem. 3. Material particulado.  
4. Polietileno. 5. Adubação foliar. 6. Solubilidade. I. Santos, Kássia Gra-  
ciele dos. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 631.8-027.3:678.742.2

**ANA CAROLINA RIBEIRO STOPPE****APERFEIÇOAMENTO DE UMA UNIDADE EXPERIMENTAL DE LEITO DE JORRO COM PARTICULADO INERTE PARA PRODUÇÃO DE FERTILIZANTE FOLIAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 30 de novembro de 2021

**Banca Examinadora:**

Dra. Kássia Graciele dos Santos – Orientadora  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Mário Sérgio da Luz  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Ricardo Corrêa de Santana  
Universidade Federal de Uberlândia



Documento assinado eletronicamente por **KASSIA GRACIELE DOS SANTOS, Professor do Magistério Superior**, em 30/11/2021, às 18:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARIO SERGIO DA LUZ, Professor do Magistério Superior**, em 30/11/2021, às 19:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Corrêa de Santana, Usuário Externo**, em 01/12/2021, às 07:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0631193** e o código CRC **03FFEBE2**.

---

*Decido esta dissertação*

*À minha amada mãe Eliane Maria Ribeiro,  
que sempre me apoiou de forma incondicional  
em meus projetos, seja acordando as 5h para  
me ajudar a pegar folhas de moringa ou me  
trazendo café durante as intermináveis horas  
de escrita deste trabalho. Obrigada!*

## AGRADECIMENTOS

Lembre-se a você mesmo que jamais corrigirá tal situação mantendo-se em estado de aflição. Precisa pensar criativamente e é impossível fomentar pensamentos criadores quando a mente está agitada. Portanto, peça a Deus que lhe dê mente tranquila, através da qual Ele lhe possa mandar resposta aos seus problemas.

Agradeço primeiramente à Deus pela calma e perseverança que me foi concedida ao longo deste trabalho, pois sem essas virtudes nada seria possível!

Aos meus pais Eliane e Carlos agradeço o carinho e suporte que me cederam durante toda a vida. Aos meus irmãos Carlos e Bruna, companheiros de caminhada, agradeço pela energia alegre que sempre me recebem e o amparo nos dias mais tristes.

Ao meu noivo Marcelo agradeço pelo carinho, compreensão e incentivo o qual sempre me ofereceu, desde o auxílio nos experimentos e desenhos técnicos até a companhia silenciosa nas horas de dissertação deste estudo.

Agradeço à minha querida orientadora Kássia que com muito esmero e amizade me guiou durante todo o processo, desde a montagem do equipamento até as várias horas de esclarecimento e discussões sobre os resultados. Aos momentos de distração e trocas de ideias inovadoras sobre tudo o que engloba a vida, o mundo e a engenharia química.

Ao meu coorientador José Luiz pelo acompanhamento quase semanal nos experimentos e ajustes que realizamos durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Assim como os conselhos e esclarecimentos sobre o tema da pesquisa.

À minha melhor amiga Mariane e estimada amiga Gabriela que me orientaram e auxiliaram tecnologicamente, em campos de conhecimento que fugiam da minha alçada.

*“Pesquisar é acordar para o mundo.”*

*Marcelo Lamy*

*“Se apenas houvesse uma única verdade, não  
poderiam pintar-se cem telas sobre o mesmo tema.”*

*Pablo Picasso*

## RESUMO

A utilização de leito de jorro para a secagem vem crescendo nos últimos anos, inúmeros pesquisadores têm adotado o preenchimento do leito com materiais inertes para aumentar a superfície de contato, promovendo uma secagem mais efetiva para materiais que não podem ser fluidizados e jorrados, como é o caso de pastas e soluções. Com o intuito de contribuir para área de pesquisa que abrange materiais particulados o seguinte trabalho teve como objetivo aperfeiçoar uma unidade de leito de jorro para a secagem de fertilizante foliar usando sólidos inertes. O fertilizante adotado possuiu dificuldade de solubilização, com a premissa de que essa técnica de secagem melhoraria a solubilidade, a caracterização do produto final foi abordada. Inicialmente ocorreu a troca e reparo de vários componentes do equipamento, como a substituição da resistência espiral para uma aletada, adição do isolamento da tubulação do ar de secagem e revestimento do leito, trocas de mangueiras, afiações e disjuntores. Também foi realizada a instrumentação da unidade através da parametrização do controlador de temperatura, instalação e programação de um sistema de aquisição de dados por meio de transdutores de pressão, para que fosse registrados dados de queda de pressão do leito e vazão de alimentação do ar de entrada. O inerte escolhido, o polietileno de baixa densidade PEBD, passou por um processo de validação que incluiu a investigação das características físicas, morfológicas e análise do ângulo de contato da superfície do material com a suspensão de fertilizante. O ângulo obtido foi de  $76^\circ$ , indicando que o PEBD é propício para a secagem de pastas e soluções em leito de jorro. Em seguida foram realizadas curvas características com o sólido inerte em diferentes cargas, a massa que apresentou melhor estabilidade fluidodinâmica foi escolhida para o processo de secagem. Os ensaios de secagem da solução foram realizados segundo o planejamento experimental  $2^3$  com uma repetição na melhor condição, as três variáveis do sistema foram o tempo de vazão de alimentação da solução, o tempo de intermitência entre os intervalos de alimentação e a altura do atomizador. Um balanço de massa foi realizado para mapear as frações mássicas de fertilizante perdidas ao longo do processo, sendo que as variáveis tiveram influência sobre três regiões, a superfície das partículas, a parede do leito e o filtro localizado no *overflow* do ciclone. As respostas geradas durante os testes foram a umidade, o rendimento e a produtividade. A altura do atomizador apresentou efeito em praticamente todas as respostas e frações mássicas estudadas, porém o tempo de intermitência teve maior influência as frações aderidas no filtro e parede do leito. De modo geral o maior tempo de intermitência acarretou em menores recuperações de produto. A temperatura foi monitorada em vários pontos durante os experimentos de secagem, as variáveis foram analisadas estatisticamente e o tempo de alimentação isolado e associado com a altura do atomizador foi o fator de maior efeito na queda de temperatura para as regiões mais distantes da entrada de ar quente do sistema. Apesar do rendimento durante a secagem ter sido baixo, 26,6% na melhor configuração, o pó seco resultante apresentou um aumento da solubilidade em 69% comparado com o fertilizante *in natura*, análises de DRX foram empregadas para se analisar a cristalinidade e nível de fase amorfa dos materiais. Durante os testes foram amostras quantidades significativas de produto sendo elutriados pelo *overflow* do ciclone, com base na distribuição granulométrica do produto final um novo ciclone foi projetado, com o intuito de sanar esse problema em trabalhos futuros. Uma anormalidade no movimento das partículas foi registrada ao longo do estudo, o fluxo tende ao lado esquerdo do leito, fazendo o material se chocar constantemente com a parede do equipamento, a análise CFD foi empregada para se buscar a causa desse movimento e um defeito na geometria na unidade foi encontrada. Para sanar essa questão foi simulada uma proposta de modificação na estrutura da tubulação de entrada de ar, fazendo com que o movimento fluidodinâmico das partículas se restaurasse para o centro do leito de jorro.

**PALAVRAS CHAVE:** instrumentação, secagem de pastas, leito de jorro, partículas inertes, PEBD, fertilizante foliar, solubilidade, CFD.

## ABSTRACT

The use of a spouted bed for drying has been increasing over the years with numerous researchers adopting the filling of the bed with inert materials to increase the contact surface. It results in a more effective drying method for materials that cannot be fluidized and spouted, such as masses and solutions. In order to contribute to the research area that covers particulate materials, this work aimed to improve a spouted bed unit for drying foliar fertilizer using inert solids. The adopted fertilizer had low solubility and with the premise that this drying technique would improve its solubility, the characterization of the final product was addressed. Initially, several components of the equipment were replaced and repaired, such as replacing the spiral resistance for a finned one; adding insulation for the drying air piping and bed covering; changing hoses; wiring and circuit breakers. The instrumentation of the unit was also carried out through the parameterization of the temperature controller; installation and programming of a data acquisition system by means of pressure transducers, so that data about drops in the bed pressure and the flow in the entry of air supply could be recorded. The chosen inert material, low density polyethylene (LDPE), underwent a validation process that included investigation of the physical and morphological characteristics and analysis of the contact angle of the material surface with the fertilizer suspension. Through the investigation, the angle found was 76 °, which indicates that LDPE is suitable for drying masses in a spouted bed. Then, the characteristic curves with the inert solid at different loads were evaluated and the mass that showed better fluid dynamic stability was chosen for the drying process. The solution drying tests were carried out according to the 2<sup>3</sup> experimental design with a repetition of the best condition, and the three variables of the system were: the solution feeding flow time, the intermittence time between the feeding intervals and the height of the atomizer. A mass balance was carried out to map the fertilizer mass fractions lost along the process, with the variables having an influence on three regions: the surface of the particles; the bed wall and the filter located in the cyclone overflow. The answers generated during the tests were moisture, yield and productivity. The height of the atomizer had an effect on practically all the responses and mass fractions studied, but the intermittency time had a greater influence as fractions adhered to the filter and bed wall. In general, the longer intermittence time resulted in lower product recoveries. The temperature was monitored at various points during the drying experiments with the variables being statistically analyzed. The variable, feeding time, associated with the variable, height of the atomizer, were the factors with the greatest effect on the temperature drop for the furthest regions from the inlet of hot air from the system. Although the yield during drying was low, 26.6% in the best configuration, the resulting dry powder showed a solubility increase of 69% compared to the *in natura* fertilizer. DRX analyzes were used to assess the crystallinity and level of amorphous phase of the materials. During the tests, significant amounts of product were eluted by the cyclone overflow so, based on the particle size distribution of the final product, a new cyclone was designed in order to solve this problem in future works. An abnormality in the movement of particles was recorded throughout the study: the flow tends to the left side of the bed, causing the material to constantly collide with the wall of the equipment. A CFD analysis was used to look for the cause of this movement and a defect in the geometry on the equipment was found. To solve this issue, a proposal to modify the structure of the air inlet pipe was simulated, making the fluid dynamic movement of the particles restored to the center of the spouted bed.

**KEYWORDS:** instrumentation, drying pastes, spouted bed, inert particles, LDPE, foliar fertilizer, solubility, CFD.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fertilizante foliar à base de Mn, S, Zn, Cu e B.....	22
Figura 2 – Desenho de um leito de jorro com o acoplamento de um ciclone como coletor. ...	23
Figura 3 – Pulverização de fertilizante foliar: (a) Pulverizador agrícola de barra (b) Pulverizador costal.....	29
Figura 4 - Folha e suas estruturas: localização da cutícula e estômato .....	29
Figura 5 – Representação das tensões interfaciais a partir do ângulo de contato.....	31
Figura 6 - Processo de solubilização .....	32
Figura 7 – Estrutura cristalina e amorfa da sílica. ....	34
Figura 8 - Esquema de difrações de ondas de raio-x em um cristal. ....	35
Figura 9 - Curva da taxa de secagem em função da umidade do material. ....	36
Figura 10 – Secador tipo rotativo .....	38
Figura 11 – Secador tipo pneumático.....	39
Figura 12 - Secador tipo <i>Spray Dryer</i> .....	39
Figura 13 – Secador tipo leito fluidizado .....	40
Figura 14 - Mecanismo de secagem: secagem de suspensão a partir de material inerte .....	42
Figura 15 - Esquema da técnica do leito de jorro aplicada em materiais pastosos.....	43
Figura 16 – Regiões de um leito de jorro .....	45
Figura 17– Curva característica do leito de jorro .....	46
Figura 18 – Desenho esquemático da circulação de fluido e partículas dentro de um ciclone.....	47
Figura 19 - Etapas da secagem em leito com partículas inertes.....	49
Figura 20 – Diagrama de Geldart, 1973. ....	50
Figura 21 – Perfis de velocidade para leito de jorro.....	55
Quadro 1 - Sistema de equações para o escoamento multifásico gás-sólido.....	55
Figura 22 – Imagens das partículas de polietileno (a) antes e (b) depois do tratamento do <i>software</i> . ....	65
Figura 23 – Gotas de água sobre superfícies de (a) vidro e (b)PEBD.....	66

Figura 24 – Ângulo de contato para granulação e recobrimento.....	67
Figura 25 – (a) Unidade experimental com leito de jorro da UFTM antes dos reparos; (b) unidade depois dos reparos; (a) resistência anterior; (d) resistência atual. ....	68
Quadro 2 - Detalhamento dos componentes da unidade experimental.....	69
Figura 26 - Unidade experimental e seus principais componentes. ....	70
Figura 27 - (a) Transdutor de pressão Dwyer; (b) circuito.....	72
Figura 28 - VI feita no Labview. ....	73
Figura 29 – (a) <i>Front</i> Painel da VI; (b) transdutor com as resistências; (c) sistema de instrumentação pronto. ....	74
Figura 30 – (a) Sistema de secagem. ....	77
Figura 31 - Malha desenhada para as simulações fluidodinâmicas: (a) CO com 7400 elementos; (b) CA com 10851 elementos.....	82
Figura 32 - Interface do app PEIQ: (a) página inicial; (b) dados sobre as partículas a serem coletadas e condições de operação; (c) propriedades do fluido de trabalho.....	83
Figura 33 – Imagem dos fertilizantes com zoom de 1600x: (a) <i>in natura</i> e (b) após secagem. ....	86
Figura 34 - Fertilizante foliar (a) antes e (b) depois de solubilizado.....	87
Figura 35 – Análises de DRX para os fertilizantes: (a) <i>In natura</i> ; (b) após secagem.....	88
Figura 36 - Sobreposição das análises de DRX para os fertilizantes. ....	89
Figura 37 - Medição do ângulo de contato: (a) esquema representativo e (b) medição realizada sobre uma gota de valor médio.....	90
Figura 38 - Curvas de calibração dos transdutores.....	92
Figura 39 - Equação 26, com valores de K e n inseridos no Labview. ....	92
Figura 40 – Equação obtida na calibração.....	93
Figura 41 – Curvas características do leito de jorro nas massas: (a) 200g, (b) 300g, (c) 400g, (d) 500g, (e) 1000g e (f) 1500g.....	94

Figura 42 - Comparação entre os dados experimentais e os estimados pelas correlações para (a) velocidade de jorro mínimo; (b) queda de pressão de jorro mínimo e (c) queda de pressão máxima. ....	96
Figura 43 - Superfície de resposta do tempo de alimentação e altura do atomizador em função da umidade.....	100
Figura 44 – Superfície de resposta do tempo de intermitência e altura do atomizador em função do rendimento. ....	101
Figura 45 – Superfície de resposta dos efeitos sob a fração mássica de fertilizante não coletado devido à adesão na superfície das partículas inertes.....	103
Figura 46 – Imagem em diferentes posições do leito de frações mássicas retidas na parede.	104
Figura 47 - Superfície de resposta dos efeitos sob a fração mássica de fertilizante retida no filtro. ....	105
Figura 48 – Altura de atomização 0,40 m. ....	110
Figura 49 – Altura de atomização 0,68 m. ....	110
Figura 50 - Superfície de resposta para as temperaturas em $T_2$ e $T_3$ . ....	112
Figura 51 – Contornos de fração volumétrica de sólidos para (a) Leito de jorro originalmente instalado na unidade experimental; (b) Proposta de adição de um tronco de cone para diminuir a turbulência na entrada do leito. ....	114
Figura 52 – Cotação de termopar com retenção de dados. ....	115
Figura 53 – Layout do aplicativo PEIQ com (a) representação do ciclone; (b) resultados para Lapple; (c) resultados para Stairmand. ....	116
Figura 54 – Cotação de bomba peristáltica para baixas vazões. ....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Os 10 artigos mais citados pelos temas Spouted Bed e Drying pastes. ....	57
Tabela 2 - Os artigos refinados temas Spouted Bed, Drying pastes e Experimental Design. ..	60
Tabela 3 – Modelos de distribuição granulométrica. ....	62
Tabela 4 - Correlações empíricas no jorro mínimo e queda máxima de pressão no leito. ....	75
Tabela 5 - Planejamento experimental para os ensaios realizados. ....	79
Tabela 6 – Condições de contorno das simulações. ....	82
Tabela 7 - Distribuição granulométrica do fertilizante <i>In Natura</i> .....	84
Tabela 8 - Modelos de distribuição granulométrica para o Fertilizante <i>in natura</i> .....	85
Tabela 9 - Distribuição granulométrica do fertilizante granulado seco.....	85
Tabela 10 - Modelos de distribuição granulométrica para o Fertilizante granulado seco. ....	85
Tabela 11 – Diâmetro médio de Sauter .....	87
Tabela 12 – Tempo de solubilidade.....	87
Tabela 13 – Características físicas e morfológicas do material inerte (PEBD) e do leito (de PEBD).....	90
Tabela 14 - Resultados dos ângulos de contato entre as gotas de água e da solução de fertilizante com a superfície de PEBD.....	91
Tabela 15 – Valores das quedas de pressão máxima e de jorro mínimo observadas. ....	95
Tabela 16 – Variáveis fixas do processo. ....	98
Tabela 17 - Matriz das variáveis independentes e das respostas para o rendimento, produtividade e umidade. ....	99
Tabela 18 – Efeitos das variáveis sob a umidade. ....	99
Tabela 19 – Efeitos das variáveis sob o rendimento e produtividade. ....	101
Tabela 20 - Matriz das variáveis independentes e das respostas para as frações de perdas de produto.....	102
Tabela 21– Efeito das variáveis sobre a fração mássica de fertilizante não coletado devido à adesão na superfície das partículas inertes. ....	103

Tabela 22 – Efeito das variáveis de processo na fração mássica de fertilizante perdida na parede do leito e no filtro. ....	105
Tabela 23 – Efeitos das médias sobre a parede do ciclone e tubulação de exaustão.....	106
Tabela 24 – Matriz das variáveis independentes e das respostas para as vazões de ar de entrada e quedas de pressão do leito médias. ....	106
Tabela 25 – Flutuação da Queda de pressão média durante o experimento: (a) Teste 1; (b) Teste 5; (c) Teste 2; (d) Teste 6; (e) Teste 3; (f) Teste 7; (g) Teste 4; (h) Teste 8.....	107
Tabela 26 - Flutuação da Vazão de ar média durante o experimento: : (a) Teste 1; (b) Teste 5; (c) Teste 2; (d) Teste 6; (e) Teste 3; (f) Teste 7; (g) Teste 4; (h) Teste 8.....	108
Tabela 27 – Efeitos das variáveis sob as vazões médias e queda de pressa. ....	109
Tabela 28 – Matriz das variáveis independentes e das temperaturas ao longo do secador. ...	111
Tabela 29 – Efeito das médias sob as temperaturas em T0 e T1.....	111
Tabela 30 – Efeito das variáveis sob as temperaturas em T <sub>2</sub> e T <sub>3</sub> . ....	112
Tabela 31 - Parâmetros de programação de processo do controlador de temperatura. ....	133
Tabela 32 - Condições de operação e propriedades das partículas.....	134
Tabela 33 -Correlações preditas para Velocidade Jorro Mínimo .....	134
Tabela 34 - Correlações preditas para Queda de Pressão de Jorro Mínimo .....	135
Tabela 35 - Correlações preditas para Queda de Pressão Máxima.....	135
Tabela 36 – Matriz das variáveis independentes e das temperaturas ao longo do secador. ...	135

## LISTA DE SIGLAS

$\tau$	Coeficiente de difusão [m <sup>2</sup> /s]
$dQ$	Varição entre o fluxo de calor [J/s]
$\rho$	Densidade aparente do fluido [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	Densidade aparente da partícula inerte [g/cm <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	Porosidade do leito
$V_p$	Volume de partículas [cm <sup>3</sup> ]
$V_{total}$	Volume do recipiente [cm <sup>3</sup> ]
$\emptyset$	Esfericidade
$\lambda$	Comprimento de onda
$\rho_q$	Densidade da fase q
$\vec{g}$	Aceleração da gravidade
$\mu_g$	Viscosidade cisalhante
$\lambda_g$	Viscosidade bulk da fase gasosa
$F_g$	Força de corpo externa
$\vec{v}_g$	Velocidade na interface
$\mu_s$	Viscosidade cisalhante granular
$\lambda_s$	Viscosidade bulk granular
$\vec{v}_{sg}$	Velocidade na interface
$\tau_g$	Tensor tensão da fase gasosa

$\underline{\tau}_s$	Tensor tensão de sólido
$\mu_s, cin$	Viscosidade cinética
$\mu_s, col$	Viscosidade devido a colisão das partículas
$C_d$	Coefficiente de arraste
$C_{fr,sa}$	Coefficiente de fricção entre as partículas da fase sólida s e a
$d_p$	Diâmetro da partícula
$d_s$	Diâmetro da partícula da fase s
$g_{0,ss}, g_{0,as}$	Função distribuição radial
$K_{sg}$	Coefficiente de troca de momento entre as fases
$\dot{m}$	Taxa de transferência de massa
$p$	Pressão compartilhada pelas fases
$Re$	Número de Reynolds
$R_{sg}$	Força de interação entre as fases gasosa e sólida
$S_g, S_s$	Termo de geração da propriedade na equação de conservação
$t$	Tempo
$u$	Velocidade
$v_g$	Velocidade do gás
$\alpha_g$	Fração volumétrica da fase gasosa
$\alpha_s$	Fração volumétrica da fase granular
$\theta_s$	Temperatura Granular
$\rho_g$	Densidade da fase gasosa
$\rho_s$	Densidade da fase granular
$k_{\theta s}$	Coefficiente de difusão de temperatura granular
$e_{ss}, e_{sa}$	Coefficiente de restituição entre sólidos
$d_a$	Diâmetro da partícula da fase a

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>24</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	24
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	24
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>26</b>
3.1	FERTILIZANTES .....	26
3.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE FERTILIZANTES FOLIARES...	30
<b>3.2.1</b>	<b>Molhabilidade .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Solubilidade.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Arranjo Estrutural .....</b>	<b>33</b>
3.2.3.1	<i>Estrutura Cristalina .....</i>	33
3.2.3.2	<i>Estrutura Amorfa.....</i>	33
3.2.3.3	<i>Polimorfismo .....</i>	33
3.2.3.4	<i>Análises DRX.....</i>	34
3.3	SECAGEM DE SOLUÇÕES E PASTAS .....	36
<b>3.3.1</b>	<b>O processo de secagem .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Métodos de secagem .....</b>	<b>37</b>
3.4	SECAGEM DE SOLUÇÕES E PASTAS EM LEITO DE JORRO .....	41
<b>3.4.1</b>	<b>Fluidodinâmica de um leito de Leito de Jorro .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Equipamentos que compõem uma unidade experimental de secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes .....</b>	<b>47</b>
3.4.2.1	<i>Ciclone .....</i>	47
3.4.2.2	<i>Medidores De Pressão .....</i>	48
<b>3.4.3</b>	<b>Variáveis que influenciam a micro granulação em leito de jorro com partículas inertes .....</b>	<b>49</b>
3.4.3.1	<i>Partículas Inertes .....</i>	49

3.4.3.2	<i>Temperatura de trabalho</i> .....	51
3.4.3.3	<i>Vazão de alimentação da pasta ou solução</i> .....	51
3.4.3.4	<i>Concentração inicial da pasta ou solução</i> .....	51
3.4.3.5	<i>Altura do atomizador</i> .....	52
3.4.3.6	<i>Pressão de atomização</i> .....	52
3.4.3.7	<i>Intermitência de alimentação</i> .....	53
3.4.3.8	<i>Quantidade de inerte</i> .....	53
3.5	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA AO LEITO DE JORRO	53
3.6	ESTADO DA ARTE: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DA SECAGEM DE PASTAS E SOLUÇÕES EM LEITO DE JORRO COM INERTES E O USO DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	56
<b>4</b>	<b>MÉTODOS</b> .....	<b>62</b>
4.1	TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DO FERTILIZANTE FOLIAR .....	62
4.1.1	<b>Distribuição granulométrica</b> .....	<b>62</b>
4.1.2	<b>Tempo de Solubilidade</b> .....	<b>63</b>
4.1.3	<b>Potencial hidrogeniônico (pH)</b> .....	<b>63</b>
4.1.4	<b>Análises de DRX</b> .....	<b>63</b>
4.1.5	<b>Umidade</b> .....	<b>63</b>
4.2	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA PARTÍCULA INERTE .....	64
4.2.1	<b>Caracterização física e morfológica dos sólidos inertes</b> .....	<b>64</b>
4.2.2	<b>Medida do ângulo de contato do sistema sólido-líquido</b> .....	<b>66</b>
4.3	<u>INSTRUMENTAÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL</u> .....	71
4.3.1	<b>Controle de temperatura</b> .....	<b>71</b>
4.3.2	<b>Transdutores de pressão</b> .....	<b>71</b>
4.4	ESTUDO EXPERIMENTAL DA FLUIDODINÂMICA DO LEITO DE JORRO ..	74
4.5	EXPERIMENTOS DE SECAGEM DO FERTILIZANTE FOLIAR NO LEITO DE JORRO	76

4.5.1	<b>Preparo da amostra .....</b>	<b>76</b>
4.5.2	<b>Condições operacionais .....</b>	<b>76</b>
4.5.3	<b>Planejamento experimental .....</b>	<b>78</b>
4.6	<b>IDENTIFICAÇÃO DOS GARGALOS DO PROCESSO E SUGESTÕES DE MELHORIA NA UNIDADE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>80</b>
4.6.1	<b>Simulação de Fluidodinâmica Computacional (CFD) do leito de jorro .....</b>	<b>80</b>
4.6.2	<b>Propostas de melhorias para a unidade experimental .....</b>	<b>82</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>84</b>
5.1	<b>CARACTERIZAÇÃO DO FERTILIZANTE .....</b>	<b>84</b>
5.1.1	<b>Distribuição Granulométrica.....</b>	<b>84</b>
5.1.2	<b>Solubilidade.....</b>	<b>87</b>
5.1.3	<b>pH.....</b>	<b>88</b>
5.1.4	<b>DRX .....</b>	<b>88</b>
5.2	<b>SELEÇÃO DO SOLIDO INERTE E CARACTERIZAÇÃO DOS INERTES .....</b>	<b>89</b>
5.2.1	<b>Caracterização física e morfológica dos inertes.....</b>	<b>89</b>
5.2.2	<b>Medida do ângulo de contato do sistema sólido-líquido .....</b>	<b>90</b>
5.3	<b>INSTRUMENTAÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>91</b>
5.3.1	<b>Transdutores de pressão .....</b>	<b>91</b>
5.4	<b>ESTUDO EXPERIMENTAL DA FLUIDODINÂMICA DO LEITO DE JORRO..</b>	<b>93</b>
5.5	<b>EXPERIMENTOS DE SECAGEM DO FERTILIZANTE FOLIAR NO LEITO DE JORRO</b>	<b>97</b>
5.5.1	<b>Definição das faixas de condições experimentais da unidade experimental</b>	<b>97</b>
5.5.2	<b>Testes de Secagem da solução do fertilizante em leito de jorro com sólidos inertes.....</b>	<b>98</b>
5.5.2.1	<i>Umidade .....</i>	<i>99</i>
5.5.2.2	<i>Rendimento e produtividade.....</i>	<i>100</i>
5.5.2.3	<i>Mapeamento das perdas de fertilizante durante a secagem .....</i>	<i>102</i>

5.5.3	Flutuações de Vazão de alimentação de ar e Queda de Pressão no leito ...	106
5.5.4	Distribuição de temperatura na unidade experimental .....	109
5.6	IDENTIFICAÇÃO DOS GARGALOS DO PROCESSO E SUGESTÕES DE MELHORIA NA UNIDADE EXPERIMENTAL .....	113
5.6.1	Análise de Fluidodinâmica Computacional do leito de jorro .....	113
5.6.2	Proposta de modificações no equipamento .....	114
5.6.2.1	<i>Controle de temperatura .....</i>	<i>114</i>
5.6.2.2	<i>Coleta de partículas no ciclone.....</i>	<i>115</i>
5.6.2.3	<i>Menores vazões de alimentação de solução .....</i>	<i>116</i>
5.6.2.4	<i>Troca de material inerte.....</i>	<i>117</i>
5.6.2.5	<i>Estudo da altura do atomizador.....</i>	<i>117</i>
6	CONCLUSÃO.....	119
	REFERÊNCIAS .....	122

## 1. INTRODUÇÃO

Ao passo que as produções no campo aumentam em volume, se eleva também a necessidade de nutrição das plantas, uma vez que os nutrientes do solo essenciais para o desenvolvimento vão se esgotando com o passar do tempo. Se ocorrer a falta de algum nutriente durante o crescimento das plantas, afetará diretamente no potencial de produtividade da lavoura. Desta forma, cada vez mais os fertilizantes precisam ser inseridos nos sistemas de plantação para se alcançar níveis adequados de produtividade com resultados vantajosos para os produtos (REETZ, 2016).

Existem diversas formas de fertilização, entre elas a fertilização foliar. Este tipo é aplicado nas partes aéreas das plantas, sendo que a absorção de nutrientes se torna muito mais rápida e efetiva. As aplicações são realizadas por pulverizadores, aspersores e aviões agrícolas (ALBERTO, 2017)

Os fertilizantes foliares são classificados como uma classe especial. Apesar de não substituírem a fertilização de base realizada no solo no durante do plantio, estes são empregados como complemento aos convencionais. As origens de suas matérias-primas são de produtos provenientes da petroquímica e da mineração (FAGERIA *et al*, 2009).

Alguns fertilizantes foliares são comercializados na forma de pó, devido à facilidade de transporte e redução de peso da carga. Para serem aplicados nas plantações, precisam ser solubilizados pelo produtor em determinada quantidade de água, chamado de volume de calda, podendo ser aplicados por pulverizadores, aspersores e aviões agrícolas. Na figura 1 pode ser observado o fertilizante foliar em pó empregado neste estudo. Ele contém em sua composição 25% Mn, 18,5% S, 4% Zn, 1% Cu e 0,5% B (ALBERTO, 2017).

O cerrado, vegetação predominante do triângulo mineiro, apresenta deficiência em B, Cu, Mn, Mo e Zn. Sendo a plantação de soja uma das principais da região, o Mn tem a função de equilibrar as enzimas responsáveis pela fotossíntese da planta, porém a adubação via solo de Mn é pouco efetiva, sendo a adubação foliar uma boa opção de aplicação em caso de deficiência (REZENDE, 2004).

A solubilidade de determinados fertilizantes foliares em pó não é tão rentável, pois pode ocorrer o entupimento de bicos e a formação de sólidos do fundo dos tanques de aplicação, gerando perdas. A fim de melhorar a solubilidade dos fertilizantes foliares, alguns processos de

transferência de calor e massa podem ser aplicados em sua solução aquosa, para se mudar a estrutura morfológica do sólido final e melhorar o seu rendimento. Uma técnica que está em estudo seria a secagem da solução com o auxílio de um secador em regime de leito de jorro.

Figura 1 – Fertilizante foliar à base de Mn, S, Zn, Cu e B.



Fonte: da autora, 2021.

O equipamento leito de jorro é composto por uma coluna cilíndrica e uma base cônica. Possui três regiões que o caracterizam, o canal de jorro, a fonte e o ânulo. A fase fluida é injetada verticalmente na base da coluna através de um orifício. A uma velocidade considerável o fluido atravessa o orifício e entra na coluna que está recheada de partículas sólidas. Ele atravessará essas partículas pela região central do leito, formando um canal oco, o canal de jorro.

As partículas são movidas até uma altura superior à do leito, formando a região de fonte. Em seguida, como as partículas não estão mais sob a força de arraste, fazem o movimento inverso e se juntam ao leito, onde se localiza a região anular entre o canal e a parede do equipamento (BORGES, BÉTTEGA, 2019).

A Figura 2 ilustra um leito de jorro em operação, é notável a representação da fonte no centro do equipamento. No caso da do leito ilustrado na figura, tem-se uma aplicação na qual um ciclone é acoplado na saída do leito de jorro, que tem a função de coletar o produto formado pelo leito.

O funcionamento dos leitos de jorro obedece aos fenômenos de transferência de calor e massa ao mesmo tempo, visto que o material no interior do leito entra em contato com o ar de secagem, ocasionando também um movimento cíclico das partículas. Este movimento favorece uma maior mistura, ajudando diminuir as zonas mortas em processos de secagem, o que pode levar a maiores homogeneidades no produto final (FERNANDES, 2005).

Para acompanhar este tipo de interação entre fluido e partícula, se utiliza a aplicação de simulações por fluidodinâmica computacional. Esta técnica é significativa para o domínio dos fenômenos de transferências, além de colaborar com projetos de construção, modificações estruturais e acompanhamento durante estudos de processos operacionais.

Figura 2 – Desenho de um leito de jorro com o acoplamento de um ciclone como coletor.



Fonte: Adaptado Fernandes, 2005.

A aplicação da ciência de fluidodinâmica computacional em um leito de jorro associada com a ideia de se melhorar a qualidade físico-química de um fertilizante foliar, se apresenta de forma promissora na comunidade acadêmica de pesquisas agrícolas, uma vez que o aumento da solubilidade dos fertilizantes tornará o processo de aplicação mais rentável tanto para o produtor rural como para a comercialização da indústria.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Projetar e construir uma unidade experimental para obtenção de um fertilizante foliar em pó, através da atomização da solução de fertilizante e sua secagem em leito de jorro operando com sólidos inertes.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Realizar uma revisão da literatura de forma a apontar os efeitos de cada variável que influencia o processo, sobre respostas como o rendimento mássico de pó, a umidade final do material, morfologia e tamanho de partícula do pó obtido, solubilidade, dentre outras.
- Escolher o sólido inerte mais adequado ao processo de secagem/granulação e caracterizá-lo.
- Realizar a instrumentação da unidade experimental: implementar sistema de aquecimento com controle de temperatura do ar na entrada do leito e sensoriamento de temperatura em diversas posições do processo; bem como implementar um sistema de aquisição *online* de dados de vazão de alimentação de ar e queda de pressão na base do leito.
- Avaliar a possibilidade de uso e adaptação de uma unidade experimental de jorro já existente, verificando se as geometrias do leito de jorro e do ciclone são adequadas ao processo.
- Estudar experimentalmente a fluidodinâmica do leito de jorro disponível, realizando curvas características de queda de pressão em função da vazão de ar para diferentes cargas de sólidos inertes.
- Realizar simulações computacionais utilizando fluidodinâmica computacional (CFD), para avaliar a estabilidade do leito de jorro disponível e propor novas possíveis geometria de leito, adequadas ao processo;
- Definir as faixas possíveis de operação da unidade experimental (como faixas de vazão de alimentação da solução, de vazão de ar de secagem, de temperatura, de carga de

sólidos inertes, pressão do ar no bico atomizador) e propor mudanças e aquisição de novos equipamentos, baseado em trabalhos da literatura.

- Realizar testes preliminares de secagem do fertilizante na unidade existente (utilizando atomização da solução e gotejamento) para identificar o atual rendimento de granulação e propor melhorias no processo.
- Caracterizar o fertilizante em pó obtido nos testes preliminares e verificar se há melhorias na solubilidade do pó.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta sessão do trabalho traz uma revisão teórica dos principais conceitos abordados durante toda a pesquisa. Tem início nas definições de fertilizantes, tendo a variedade foliar como destaque. Além das demonstrações dos tipos de aplicação e formas de absorção das plantas são detalhadas as características de interesse de estudo sobre o fertilizante foliar, como a molhabilidade, solubilidade e arranjo estrutural.

Em seguida são apresentados os processos de secagem e granulação de pastas e soluções, com uma explicação sucinta do mecanismo de secagem dos equipamentos empregados a esses materiais, como o secador rotativo, transporte pneumático, *sray dryer*, leito fluidizado e leito de jorro. Como a secagem de pastas em leito de jorro é o assunto de interesse deste estudo, ele possui um tópico especial, no qual são detalhadas as características deste mecanismo de secagem, suas principais propriedades e variáveis de interferência do processo. Por fim, é realizada uma explicação sobre a fluidodinâmica computacional, ferramenta de grande destaque no cenário de desenvolvimento de projetos de engenharia química e utilizada para analisar a fluidodinâmica do leito aqui empregado.

#### 3.1 FERTILIZANTES

Há milhares de anos, no período neolítico, quando nossos ancestrais buscavam formas realizar assentamentos, um fator decisivo para a sobrevivência era a disponibilidade de alimentos nas redondezas. Nesta época o homem descobriu a agricultura, assim se teve início as pequenas plantações (BR FÉRTIL, 2017). Um período depois, eles perceberam que as plantas se desenvolviam melhor em lotes onde havia esterco animal. A partir desta descoberta surge a aplicabilidade do primeiro fertilizante, o adubo (MULTI TECNICA, 2018).

No ano de 1842, um pesquisador, que por décadas realizou diversos estudos, revela sua descoberta, a nutrição vegetal se dá por absorção de determinados elementos minerais presentes no solo. Este homem, chamado Justus Von Liebig, ficou conhecido como o pai da agricultura moderna (MULTI TECNICA, 2018).

Em suas pesquisas Liebig elucida que as plantas se desenvolvem conforme absorvem os elementos químicos encontrados no solo, dessa forma ao se enriquecer o solo com determinados nutrientes, as plantas tendem a crescer mais (MULTI TECNICA, 2018). A partir disso, o esterco foi sendo substituído por compostos químicos, dando início à era dos fertilizantes químicos.

Portanto pela definição, fertilizantes são materiais que tem a função de fornecer um ou mais elementos químicos necessários para promover o crescimento e desenvolvimento das plantas. Os principais tipos de fertilizantes são os fertilizantes químicos (minerais), adubos e resíduos de plantas. Diferente dos demais, os fertilizantes minerais são materiais produzidos por processos industriais com o objetivo específico de ser usado como fertilizante, (DIAS; FERNANDES, 2006).

Os elementos químicos fundamentais para o desenvolvimento dos vegetais são comumente chamados de nutrientes para plantas. Ao longo dos anos foi-se necessário listar as substâncias reconhecidas como as responsáveis pelo crescimento das plantas. Essa lista aumentou com o passar do tempo e hoje abrange um total de dezesseis elementos (UNIDO; IFDC, 1998).

Estes elementos são divididos entre macronutrientes e micronutrientes, a diferença que se dá entre os eles não exprime que um seja mais importante do que outro, indica somente que eles são necessários em quantias e concentrações diferentes. Os macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre) são fundamentais em grandes quantidades, pois têm funções estruturais que fazem parte do grupo de moléculas essenciais. Já os micronutrientes (boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco) são requeridos em quantidades menores (miligramas à microgramas), pois tem funções reguladoras, fazendo parte do grupo de enzimas (NUNES, 2016).

Os fertilizantes podem ser comercializados de diferentes formas, os dois modos mais comuns são os granulares e os líquidos.

- Granulares: são fertilizantes em forma de partículas ou *pellets* com diâmetros em torno de 1-4 mm. Eles podem ser obtidos por meio da aglomeração de pequenas partículas ou esmagando partículas grandes, se controlando o processo de cristalização.
- Líquidos: é um termo geral que pode se referir a um fertilizante totalmente líquido ou que seja parcialmente em solução. Este último inclui líquidos homogêneos ou líquidos que contenham algumas partículas em suspensão.

Os fertilizantes granulares são incorporados ao solo para que as plantas possam absorver os nutrientes pelas raízes, sendo que as misturas podem ser criadas através de produtos de

análise conhecida até se obter uma proporção que satisfaça as necessidades do solo (DESENVOLVIMENTO RURAL, 2017).

Já os fertilizantes líquidos têm elevado a popularidade nos últimos tempos. Eles podem ser aplicados no solo ou via foliar. Quando a aplicação é realizada via foliar, os nutrientes são absorvidos através das vias aéreas e de uma forma mais rápida do que se aplicados no chão. (VERTALT, 2018). Fertilizantes Foliare

Durante o ciclo de plantio é comum ocorrer condições específicas no solo que causam insuficiência de nutrientes para as culturas. Alguns fatores como o pH do solo, lixiviação, em razão ao acúmulo de chuvas e volatilização acarretada por altas temperaturas, interferem na disponibilidade de nutrientes, deixando-os inatingíveis para as raízes das plantas (BIOSUL, 2020).

Durante esses períodos a oferta de nitrogênio e potássio no solo diminuem, além da escassez de micronutrientes como ferro, cobre, manganês e zinco, gerando baixas taxas de absorção dos nutrientes pelas raízes, conseqüentemente levando a uma queda na produtividade. Desta forma, o fertilizante foliar entra na lavoura para suprir a carência de elementos associada à aplicação de fertilizantes granulares via solo, fortificando as colheitas e acelerando a velocidade de crescimento das culturas, incrementando assim sua produtividade (BIOSUL, 2020).

O método de adubação foliar é realizado através da administração de nutrientes minerais diretamente sobre as vias aéreas da planta, principalmente pela superfície das folhas. As aplicações podem ser realizadas em diferentes estágios do plantio, possibilitando o alcance de diferentes propósitos (MOCELLIN, 2004). Elas podem ser realizadas por meio de aspersores, pulverizadores ou aviões agrícolas, como mostra a figura 3 (ALBERTO, 2017).

Estas aplicações devem ser feitas através de bicos pulverizadores, prevenindo a formação de gotas muito grandes, as quais molham a folhagem em excesso e escorrem para o solo. O emprego de pulverizadores corretos influencia na quantidade de gotículas que se aderem à superfície da planta, aumentando a absorção da solução, além de evitar a formação de gotas maiores, que combinadas com a luz solar, geram queimaduras sobre as folhas (MOCELLIN, 2004).

Outro fato para se atentar durante a pulverização é buscar envolver as duas superfícies da folha, tanto a inferior quanto a superior, para garantir a melhor absorção de nutrientes de ambos os lados (MOCELLIN, 2004).

Figura 3 – Pulverização de fertilizante foliar: (a) Pulverizador agrícola de barra (b) Pulverizador costal.



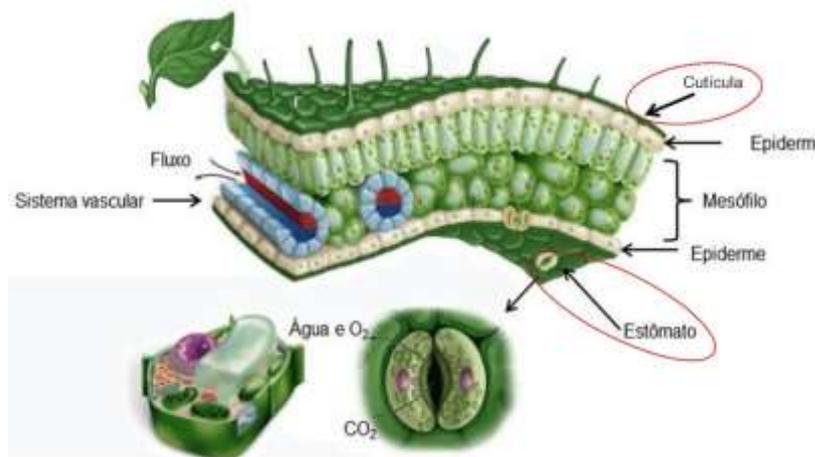
(a)

(b)

Fonte: (a) RURAL PECUÁRIA, 2021. (b) CULTURAMIX, 2021.

Sobre a superfície das folhas a absorção do fertilizante foliar pode ocorrer por meio da cutícula ou dos estômatos, figura 4, de forma passiva e ativa (MATIOLI, 2019).

Figura 4 - Folha e suas estruturas: localização da cutícula e estômato



Fonte: MATIOLI, 2019.

Enquanto ocorre a absorção de água nas raízes da planta, a evapotranspiração (saída de água e  $O_2$ ) dá-se pelos estômatos. Como os estômatos estão abertos, acontece uma pressão negativa para dentro das folhas, nesse momento o fertilizante foliar que está ao redor entra na folha, causando um equilíbrio. Já o acesso pela cutícula se dá por meio de rupturas e

microcanais que facilitam a passagem do fertilizante. Através dela a solução passa pelo apoplasto e simpasto, onde é transportada para outras células e órgãos da planta (SANTOS, 2020).

O desempenho da absorção dos fertilizantes foliares está intimamente ligado às propriedades das formulações. As características físico-químicas da solução aquosa, como massa molar, pH e solubilidade atuam sobre a taxa de absorção dos nutrientes pela superfície da folha. A pulverização da solução ocasiona de imediato uma alta velocidade de infiltração que diminui com o tempo, devido à secagem da solução. Os fatores que mais influenciam essa secagem são as condições ambientais e a formulação da solução aplicada (FERNÁNDEZ, SOTIROPOULOS, BROWN, 2015).

Para a pulverização de uma solução é essencial que os compostos químicos presentes estejam devidamente dissolvidos ou suspensos. Em fertilizantes foliares os compostos como quelatos, sais ou complexos minerais são dissolvidos em água. A solubilidade em água do fertilizante foliar é um aspecto fundamental para a absorção foliar, sendo que a absorção só irá ocorrer quando o composto utilizado estiver dissolvido em uma fase líquida na superfície da planta, que se propagará em seguida para os órgãos da mesma (FERNÁNDEZ, SOTIROPOULOS, BROWN, 2015).

A fertilização foliar se tornou bastante comum nos últimos anos, durante o dia a dia do agricultor, sendo uma alternativa na forma de aplicação à tradicional adubação da lavoura. Mas como os fertilizantes foliares ainda são uma alternativa de fertilização vegetal relativamente nova, comparado ao histórico de fertilizantes granulares, abrem-se leques para desenvolvimento de pesquisas que aprimorem algumas características físico-químicas deste tipo de produto, como por exemplo, a melhora da solubilidade e molhabilidade de determinadas substâncias (BRASQUÍMICA, 2017).

## 3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE FERTILIZANTES FOLIARES

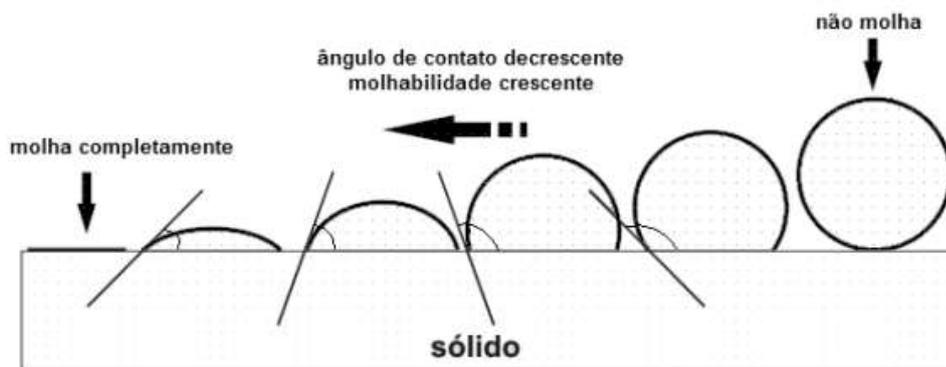
### 3.2.1 Molhabilidade

A molhabilidade, segundo Nascimento (2015), é a capacidade de um líquido aderir-se a uma superfície sólida na forma de gotícula. Assim, quanto maior for a aderência, maior será a área de contato da gotícula com a superfície, e conseqüentemente mais bem empregada será a molhabilidade do líquido na superfície.

O seu estudo leva a conhecer o comportamento hidrofílico/lipofílico da superfície em relação ao seu desempenho perante o fluido. Ela é o resultado das forças de adesão do líquido sobre a superfície sólida, permitindo que o líquido tenha um maior ou menor espalhamento da gota depositada. Assim, se avalia o ângulo de contato formado entre a gota e a superfície, para desta forma se considerar a interação entre eles, quanto maior o ângulo menor será a molhabilidade (NASCIMENTO, 2015).

A figura 5 ilustra uma representação da interação da gotícula com a superfície e seu ângulo de contato. Considera-se que se o ângulo estiver entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  o líquido molha a superfície, mas se estiver entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$  o líquido não molha a superfície (NASCIMENTO, 2015).

Figura 5 – Representação das tensões interfaciais a partir do ângulo de contato.



Fonte: NASCIMENTO, 2015.

O estudo da molhabilidade de um líquido sobre uma superfície a partir do ângulo de contato entre elas é capaz de prever como o líquido irá recobrir o material sobre o qual ele é aplicado. Por meio da análise deste ângulo é possível, por exemplo, se determinar qual material inerte será usado como veículo para processos de secagem de pastas. De forma que a pasta recobrisse o inerte suficientemente para realizar a secagem sem que se aderisse a superfície por completo.

Outra propriedade que pode sofrer alterações em uma substância é a solubilidade, já que a mesma pode variar dependendo do sistema em que ela se encontra, como pode ser visto na próxima sessão.

### 3.2.2 Solubilidade

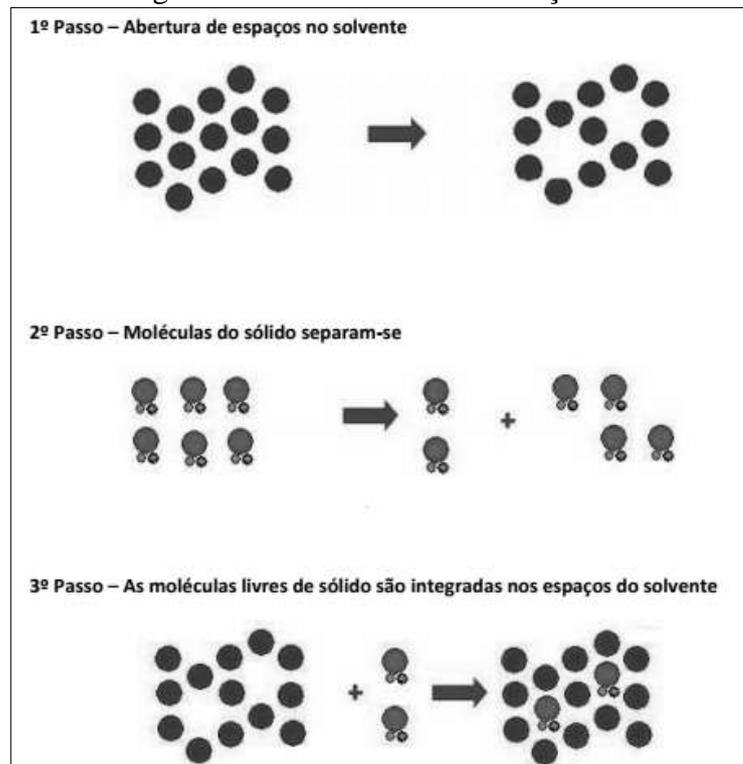
A tendência de uma substância em se misturar uniformemente com outra substância é conhecida como solubilidade, por exemplo, na mistura de sólido com um líquido, líquido com líquido, gás em líquido ou gás em gás (GOWARIKER *et al.* 2009).

A solubilidade de um sólido em um líquido varia de 0 a 100%, dependendo da temperatura e natureza química das duas substâncias. Sólidos perdem sua cristalinidade e se tornam molecularmente ou ionicamente dispersos no solvente para formar uma solução. Por exemplo, os fertilizantes de sódio e potássio na água (GOWARIKER *et al.* 2009)..

Durante a solubilização o elemento mineral primário é liberado para um estado líquido solúvel ou pseudo-solúvel. Essa liberação dos elementos primários toma lugar durante a dissolução bioquímica, esses elementos retêm sua forma, perdem-na através da drenagem natural ou se transformam lentamente em géis amorfos ou para-cristalinos (GOWARIKER *et al.* 2009).

O processo de solubilização, ilustrado na figura 6, abrange a quebra de ligações inter-iônicas ou intermoleculares no soluto, a separação de moléculas de solvente para prover espaço no solvente para o soluto e a interação entre o solvente e a molécula de soluto ou íon (ALMEIDA, 2009).

Figura 6 - Processo de solubilização



Fonte: ALMEIDA, 2009.

Algumas técnicas podem ser empregadas para se aumentar a solubilidade de um sólido, como o polimorfismo, que é a capacidade de uma substância em se cristalizar em diferentes formas cristalinas (ALMEIDA, 2009).

### 3.2.3 Arranjo Estrutural

Os elementos sólidos podem ser classificados em dois tipos de distribuições espaciais, segundo a organização de seus átomos, moléculas ou íons: cristalinos e amorfos.

#### 3.2.3.1 Estrutura Cristalina

São elementos compostos por átomos, moléculas ou íon arranjados regularmente em 3 dimensões. A regularidade em que os átomos são agregados nos sólidos provém das geometrias impostas pelos átomos envolvidos e pelas ligações atômicas presentes. As posições ocupadas seguem uma ordem a qual se repete em grandes distâncias atômicas. Esse tipo de estrutura é descrito como geométrico (PMT 2100, 2005).

#### 3.2.3.2 Estrutura Amorfa

São elementos compostos por átomos, moléculas ou íons que não apresentam uma ordem em sua estrutura. Os arranjos atômicos são aleatórios e sem simetria. Eles podem ter pequenas ordenações de curto alcance (PMT 2100, 2005).

#### 3.2.3.3 Polimorfismo

O polimorfismo é definido pela aptidão que uma substância tem em se cristalizar de formas diferentes. O processo pode ser chamado de enantiotrópico quando a mudança de um polimorfo acontece de maneira reversível. Em um sistema monotrópico há um ponto de transição acima do ponto de fusão de ambos os polimorfos, porém os dois tipos não conseguem se transformar um no outro sem passar por uma transição de fases. Como os polimorfos podem variar seu ponto de fusão, e o ponto de fusão está relacionado com a solubilidade, desta forma podem existir polimorfos com diferentes solubilidades (ALMEIDA, 2009).

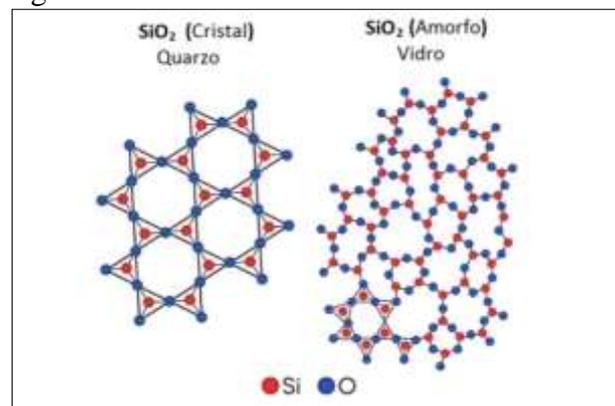
Os polimorfos são quimicamente iguais, mas demonstram diferentes propriedades físico-químicas, como densidade, estabilidade, solubilidade, entre outras. Segundo ALMEIDA (2009), depois de serem classificados como enantiótrópicos ou monotrópicos, é analisada a presença de formas metastáveis, que estão ligadas a uma maior energia, e assim maior solubilidade.

Geralmente uma forma amorfa possui uma maior energia associada e área superficial aumentada, se tornando mais adequada que a forma cristalina. A figura 7 apresenta duas formas

estruturais do mesmo composto, a sílica, uma se encontra no formato cristalino (quartzo) enquanto a outra se apresenta no formato amorfo (vidro) (OMOTTA, 2015).

Algumas substâncias existem na forma amorfa, não contendo estrutura cristalina interna, e apresentam um estado energético mais alto, sendo nomeados como líquidos superarrefecidos. Como precisam de menor energia para transferir uma molécula para o solvente, eles possuem uma maior solubilidade aquosa que as formas cristalinas (ALMEIDA, 2009).

Figura 7 – Estrutura cristalina e amorfa da sílica.



Fonte: OMOTTA, 2015.

Existe uma ordem de dissolução de diferentes formas sólidas, que é (ALMEIDA, 2009).

### **Amorfo>Polimorfo metastável> Polimorfo estável**

Um exemplo de procedimento para se atingir uma forma amorfa seria a fusão seguida de uma rápida recristalização a partir de diferentes solventes (ALMEIDA, 2009).

Neste trabalho será apresentado um método pelo qual se ocorre a modificação estrutural de um fertilizante foliar cristalino através da secagem da solução em equipamentos específicos para este tipo de procedimento, os leitos fluidizados.

#### **3.2.3.4 Análises DRX**

No processo de difração as ondas eletromagnéticas entram em contato com um obstáculo, no caso um cristal, e sofrem uma aparente flexão em torno do obstáculo (CARAM, 2019). Com a difração de raios-X é possível determinar a geometria, dimensões e disposições

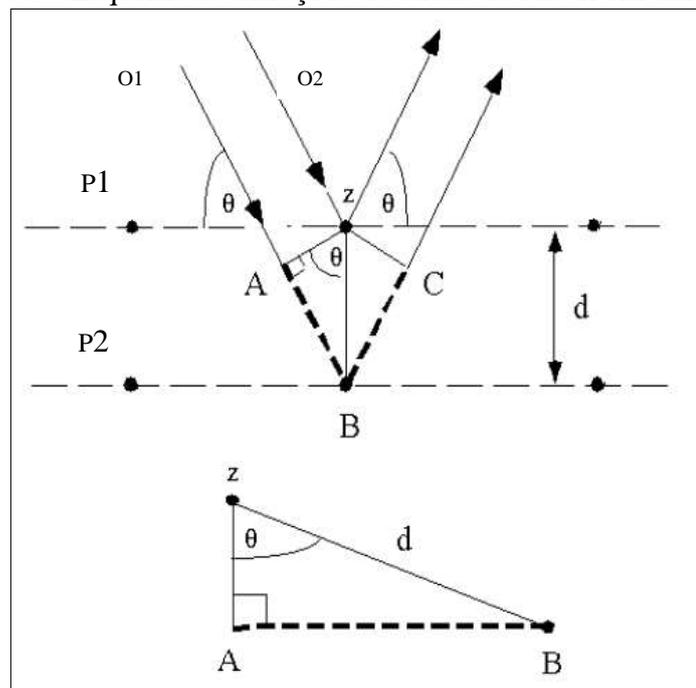
dos átomos dentro do cristal. Desta forma, a lei de Bragg, equação 1, é empregada para estudar a estrutura do material cristalino de interesse (ROESLER P, 2019).

$$n \lambda = 2 \operatorname{sen} \theta \quad (1)$$

em que  $n \lambda$  é a diferença de percurso entre as duas ondas e deve ser um número inteiro de comprimento de onda e  $\theta$  é o ângulo entre a onda e o plano. Segundo a lei de Bragg se um feixe de ondas em fase incide em um sólido e a diferença de percurso entre as ondas difratadas for um número inteiro de comprimento onda, haverá um aumento de intensidade, ocorrendo um ponto de máximo (ROESLER P, 2019).

A figura 8 esquematiza o processo de difração em um cristal, quando acontece o ponto máximo de intensidade.

Figura 8 - Esquema de difrações de ondas de raio-x em um cristal.



Fonte: LUKIN, 2019.

Seja P1 o plano 1 e P2 o plano 2, quando a onda O1 de raio x incide o plano P1, em um ângulo  $\theta$ , ela encontra um átomo e é refratada, também em um ângulo  $\theta$ . Quando a onda O2 incide o plano P1 ela passa através dele e é refratada por um átomo no plano P2 (LUKIN, 2019).

### 3.3 SECAGEM DE SOLUÇÕES E PASTAS

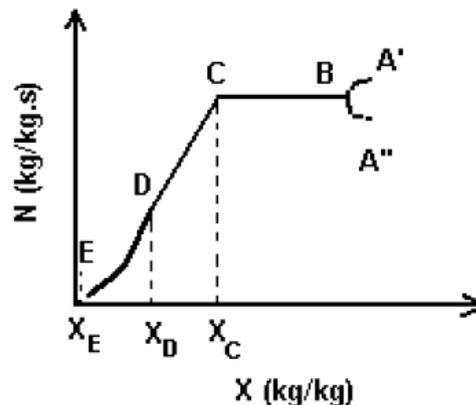
Para a comercialização algumas variedades de fertilizantes foliares é necessário submeter o material à operação de secagem, com o objetivo de simplificar o transporte da carga. Como pó pode ser reidratado, com a secagem o produto sólido teria uma maior concentração, menor peso e facilidade de transporte.

#### 3.3.1 O processo de secagem

Este procedimento se dá pela retirada total ou parcial de determinado solvente de uma solução, ela envolve um processo simultâneo de transferência de calor e massa. O solvente mais comum, o qual é retirado durante esse processo é a água. A secagem implica a remoção de 90 a 95% de água do material, normalmente exposto ao calor (CHRIST, 2006).

Na literatura o regime de secagem é dividido entre um período taxa constante e período de taxa decrescente, como ilustra a figura 9 (LARROSA, 2012).

Figura 9 - Curva da taxa de secagem em função da umidade do material. Onde: A – Período inicial; B-C – Período Constante; C-E – Período decrescente.



Fonte: STRUMILLO; KUDRA, 1986.

O período inicial, A-B, ocorre logo após o contato entre o material úmido e o meio secante, nesta etapa a temperatura do sólido entra em equilíbrio com o meio até alcançar um regime permanente. Os pontos A' e A'' indicam o teor de umidade inicial. Em A' o material está a uma temperatura abaixo da de equilíbrio e no ponto A'' o material está a uma temperatura acima da temperatura de equilíbrio (OLIVEIRA, 2006). No período de taxa constante de secagem, entre B-C, a superfície do material é mantida a uma umidade constante na qual a

secagem se assemelha evaporação de água pura, permanecendo na mesma faixa de temperatura e tornando a taxa uma linha horizontal (LARROSA, 2012).

Já o período de taxa decrescente, entre C-E, ocorre a movimentação da umidade interna do sólido podendo ser dividido em duas partes. A primeira, entre C-D podem ocorrer transportes por difusão de vapor ou de líquido, escoamento capilar entre outros. Na segunda parte, entre D-E, o mecanismo predominante é a difusão de vapor. No ponto E se atinge a umidade de equilíbrio entre o material de secagem o a umidade relativa do meio secante, cessando o processo (OLIVEIRA, 2006).

A secagem industrial é realizada por métodos de batelada ou processos contínuos. O tipo de equipamento a ser empregado e a temperatura irá depender do estado físico do material que será secado, ele pode ser líquido, solução, lama, pasta ou sólido (GOWARIKER *et al.* 2009).

### 3.3.2 Métodos de secagem

A melhor escolha entre os métodos de secagem existentes deve ser baseada na análise do tipo de matéria-prima, subprodutos e parâmetros do produto final (BARROS, 2018). Pastas, soluções ou suspensões são formas de misturas homogêneas nas quais uma porção de soluto está dissolvida em uma grande quantidade de solvente. A secagem destes materiais é caracterizada pela obtenção de pós ou grânulos para diferentes setores industriais, como o agrônômico e o alimentício (SCHAFFKA, 2017).

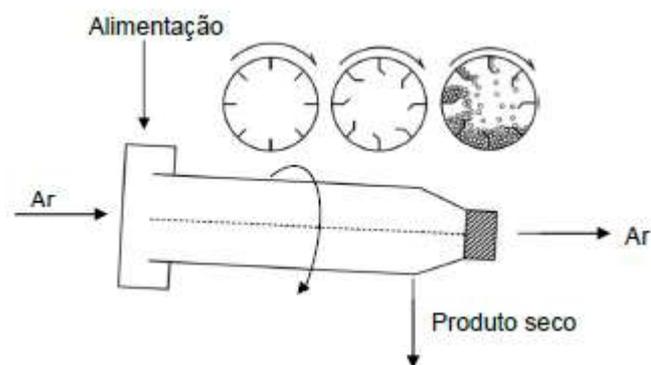
O grupo de secadores mais indicado para a secagem de pastas em geral são os secadores convectivos, conhecido por proporcionar movimentações simultâneas do ar e partículas durante a secagem (ROCHA, FREIRE, 2019). Nele existem os leitos móveis, como os secadores de leito fluidizado, leito de jorro, de transporte pneumático e secadores de tambor rotativos, que produzem uma intensa agitação nas partículas inseridas ao longo de sua estrutura (CHRIST, 2006). Os equipamentos mais empregados, assim como seu mecanismo de secagem, serão descritos a seguir.

- Secador de Tambor Rotativo: está entre os tipos mais comuns de secadores empregados na secagem de pastas, figura 10, especialmente o modelo de secagem direta no qual a corrente de ar quente entra com contato com o material úmido através do percurso do secador. No fluxo de ar quente em corrente, a pasta é aquecida mais rápido, diminuindo a perda de calor total, ao contrário do que acontece no fluxo em contracorrente (DAVID,

2002). Para a secagem de determinados tipos de pastas ou soluções, o emprego de partículas inertes é usual neste equipamento, sem elas a fluidodinâmica do secador ficaria comprometida.

O secador é composto por um cilindro horizontal com suspensores e recheado de partículas inertes, essas trabalham como suporte para a pasta a ser secada. O ar de secagem escoando entre as partículas transfere energia térmica para desidratar o material alimentado, com um filme seco sobre as superfícies dos inertes a rotação do cilindro gera o atrito e moem o pó. O próprio ar carrega o produto seco do interior do tambor até um separador de fases, que recupera o mesmo (SILVA, 2019).

Figura 10 – Secador tipo rotativo



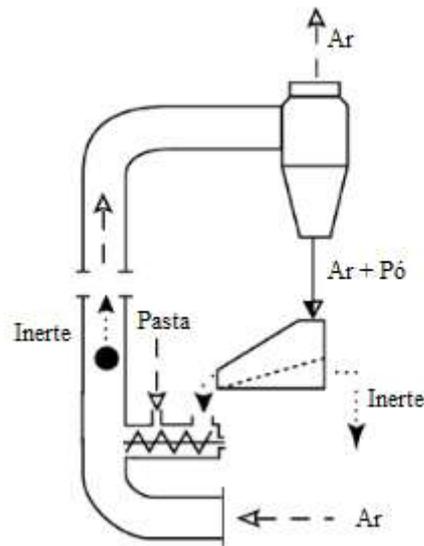
Fonte: ROCHA, FREIRE, 2019.

O uso de defletores no interior do cilindro melhora o cascadeamento do material particulado, promovendo a interação do ar de secagem entre a pasta e as partículas inertes (ROCHA, FREIRE, 2019).

- Secador Pneumático: este tipo de secador também é conhecido por *flash dryer*, secador de arraste ou secador rápido. Ele é composto por um tubo vertical onde a pasta e o gás de secagem e os inertes entram na parte inferior, figura 11. O gás quente em alta velocidade seca água presente nas partículas da pasta, arrastando os sólidos para cima até o ciclone, onde ocorre a separação dos sólidos secos e dos gases (DAVID, 2002; KUDRA, MUJUMDAR, 2009).

Este modelo de secador trabalha em altas velocidades e temperatura de gás de secagem, essa podendo atingir 600°C, o que promove uma secagem tão rápida que o sólido final não consegue atingir a temperatura de trabalho do ar (ROCHA, FREIRE, 2019).

Figura 11 – Secador tipo pneumático.

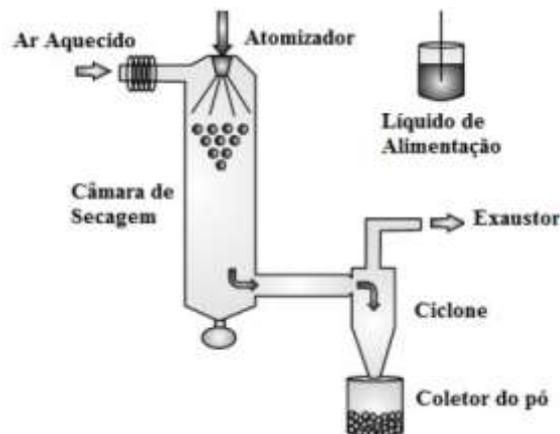


Fonte: Adaptado de KUDRA, MUJUMDAR, 2009.

Normalmente no processo de secagem existe a interferência tanto das condições externas quanto da estrutura interna do material úmido. No caso do secador pneumático, devido à sua rapidez de operação, o processo é controlado pelas condições externas, principalmente a taxa de transferência de calor do gás para as partículas (PAIXÃO, 1995).

- Secador *Spray Dryer*: também conhecido como atomizador, este equipamento é basicamente composto por uma câmara cônica-cilíndrica vertical com um bico atomizador instalado na parte superior, como pode ser visto na figura 12.

Figura 12 - Secador tipo *Spray Dryer*

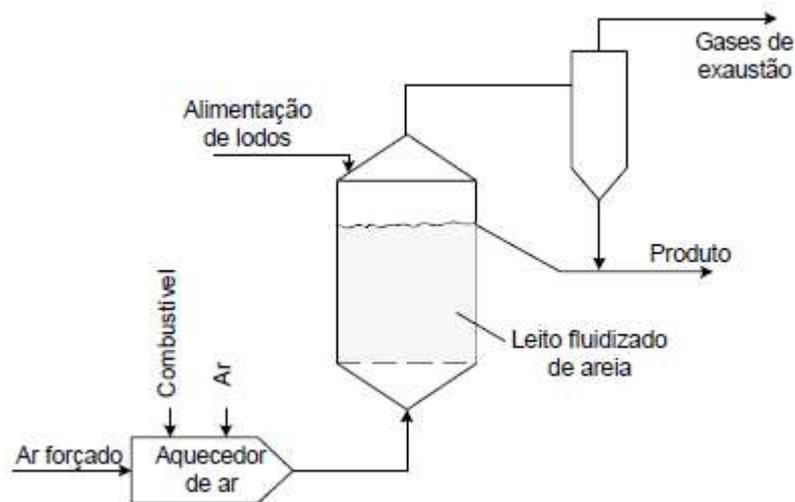


Fonte: ENGEL et. al, 2017.

As gotículas do líquido, pasta ou emulsão pulverizadas no topo do secador entram em contato direto com o ar quente em contracorrente da câmara de secagem, realizando a transferência de calor e umidade de forma rápida e eficaz (DAVID, 2002). Em seguida, os sólidos são levados para os ciclones a fim de separá-lo dos gases de secagem. O formato das partículas geradas normalmente é esférico e oco, tendo uma distribuição granulométrica parcialmente homogênea (ALBERTO, 2017).

- Secador Leito Fluidizado: Este modelo, figura 13, é amplamente empregado em secagem de pastas, é composto por uma câmara vertical estacionária na qual, em sua parte inferior, se aloja uma placa distribuidora de fluxo do fluido. Essa além de segurar o leito de partículas (muitas vezes inertes) difunde o fluido de secagem homogeneamente (ROCHA, FREIRE, 2019).

Figura 13 – Secador tipo leito fluidizado



Fonte: DAVID, 2002.

A fluidização é o processo no qual um material particulado, inserido dentro de uma câmara, admite um comportamento fluídico ao ser atravessado por um escoamento de fase fluida vertical e ascendente, sem que se sofra arraste. O fluxo de fluido ascendente adquire velocidade suficiente para suportar o peso das partículas e as atravessar (CHRIST, 2006).

No interior da câmara de secagem, o elevado nível de mistura e contato entre as partes sólidas e gasosas geram uma taxa de transferência de massa e calor, desta forma os sólidos secos são transportados pelo fluido de secagem ascendente até o ciclone, local onde ocorre a separação das fases sólidas e gasosas (DAVID, 2002).

Este tipo de leito é amplamente empregado em processos industriais, pois proporcionam mistura vigorosa entre a fase fluida e particulada, gerando altas taxas de transferência de calor e massa, de modo que provocam uniformidade de distribuições de temperatura e de concentração de fases no interior do aparato (CREMASCO, 2012). Propriedades que levam a uma ótima eficiência de secagem e regularidade na umidade do produto final (ROCHA, FREIRE, 2019).

Segundo Ustra (2005) o fator que mais influencia um leito fluidizado é o fluxo de fluido que ao ser inserido de maneira disseminada a alta velocidade, provoca a suspensão e o movimento das partículas, potencializando a exposição de suas superfícies. Sendo a velocidade o parâmetro mais importante no comportamento do leito, em seu valor mínimo ela caracteriza o início da fluidização.

- Secador de leito de jorro: Este modelo de operação foi desenvolvido inicialmente para a secagem de grãos por Mattur e Gishler em 1955, como alternativa ao leito fluidizado. A partir da década de 60 no Instituto de Tecnologia de Leningrad o leito de jorro tem sido adotado para a produção secagem de sólidos em pó finos. O Instituto apresentou ainda os primeiros estudos sobre a secagem de pastas e soluções associado ao uso de inertes (DANTAS, 2018).

Este secador é constituído por uma coluna tronco-cilíndrica preenchida por partículas sólidas, em sua parte inferior se encontra o orifício de entrada, no qual um jato de fluido é inserido. O jato composto por um fluido gasoso, normalmente o ar, permeia o leito de partículas formando um canal preferencial e a fonte (CHRIST, 2006). No próximo tópico as propriedades fluidodinâmicas, mecanismo de secagem e demais características deste secador serão melhor apresentadas.

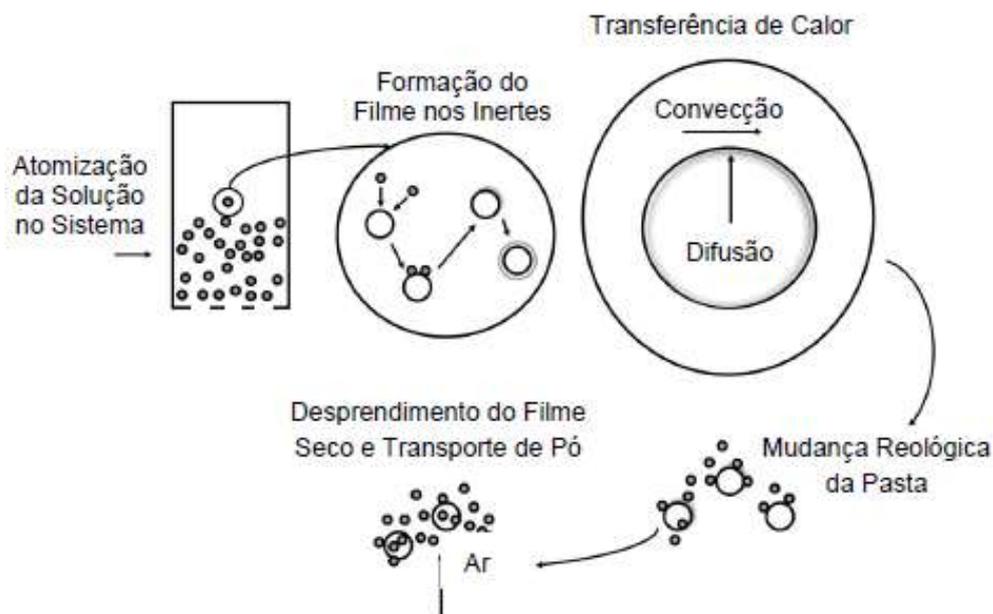
### 3.4 SECAGEM DE SOLUÇÕES E PASTAS EM LEITO DE JORRO

O processo de secagem é realizado considerando a remoção da umidade da solução ou pasta através da mudança da água presente na fase líquida do material a ser secado para a fase gasosa (ar de secagem). As partículas inertes empregadas no leito de jorro aumentam a área de troca térmica e conseqüentemente a região de contato entre as fases, tornando uma alternativa com maior taxa de evaporação de água e menor custo energético e do que se comparado ao *Spray Dryer* (MORAES FILHO, 2013; BARROS, 2018).

A alimentação da pasta acontece normalmente na parte superior do leito, como mostra a figura 14, podendo ser feita por meio de atomização ou gotejamento sobre o material inerte em movimento. As pequenas partículas da pasta se aderem à superfície do inerte molhando-o como um filme líquido, a partir das transferências de calor por condução no material inerte aquecido e por convecção do ar de secagem, a água presente na pasta evapora, formando uma fina película seca. Em razão dessa forma de solidificação com transferências de calor e massa simultâneas, acontecem modificações na reologia da película (BARROS, 2018; DANTAS, 2018).

À medida que se seca, a intensa movimentação no leito torna a película frágil e devido ao atrito do material inerte entre si e com a parede do cilindro o sólido seco se desprende da superfície do inerte, transformando a película em um pó fino (BARROS, 2018; LIMA, 1993).

Figura 14 - Mecanismo de secagem: secagem de suspensão a partir de material inerte



Fonte: SCHAFFKA, 2017.

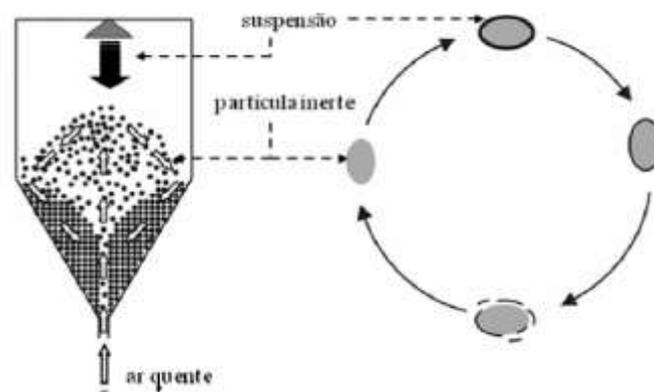
O pó gerado é carregado pela corrente do ar de secagem, seguindo o local de separação da fase sólida da gasosa, normalmente um ciclone. Como essa forma de secagem é propícia a formação de partículas muito pequenas, é possível que uma fração do sólido seco gerado seja levado pelo ar para fora do ciclone, no *overflow*. Se não houver nenhum meio filtrante nessa saída, essa massa de produto será perdida (SCHAFFKA, 2017).

Como a pasta é alimentada continuamente no secador, a formação da película, secagem, quebra e elutriação do pó acontecem simultaneamente, formando assim um ciclo de secagem, que pode ser observado na figura 15 (SCHAFFKA, 2017; PEREIRA, 2020).

Portanto o processo cíclico de secagem em leito de jorro pode ser resumido em quatro etapas (PEREIRA, 2020):

1. A alimentação da pasta;
2. Formação da película sobre o inerte;
3. Mudanças reológicas da pasta;
4. Desprendimento e coleta do produto final.

Figura 15 - Esquema da técnica do leito de jorro aplicada em materiais pastosos



Fonte: PEREIRA, 2020.

O tempo e a quantidade de estágios requeridos para o ciclo se completar depende das características reológicas da pasta, tal qual a viscosidade, atrito e friabilidade, molhabilidade e adesão, entre outros. Depende também, da taxa de circulação de sólidos (a massa proporcional de pasta e partículas inertes). Empiricamente a taxa de produção e coleta de produto desse ser sempre igual ou maior que a taxa de alimentação do leito, impedindo a formação de aglomerados e acúmulos de pasta no leito (PEREIRA, 2020; LIMA, 1993; BRAGA, 2014).

Atualmente existem poucos trabalhos que abordem a distribuição granulométrica do produto formado pela secagem em leito de jorro. Markowski (1992) afirma que as partículas formadas possuem geometria variada, geralmente na flocos irregulares e finos, e sem porosidade interna.

Em geral, como a secagem de pastas por leito de jorro com partículas inertes possui elevadas taxas de transferência de calor e massa, provoca a formação de partículas finas, sendo

o tempo de contato da suspensão/partícula menor do que em outros mecanismos de secagem, entregando um produto final com qualidade superior (SOARES, 2019).

### 3.4.1 Fluidodinâmica de um leito de Leito de Jorro

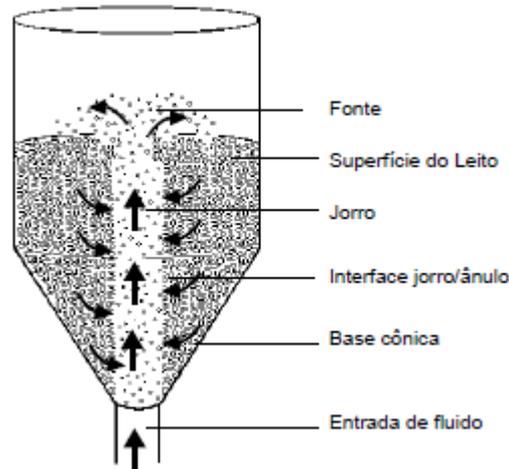
Segundo CREMASCO (2012), a técnica do leito de jorro promove a interação fluido-partícula para o emprego de partículas grandes, se comparado com a interação normal de fluidização. As principais características de um leito de jorro são a vigorosa mistura das partículas, elevadas taxas de circulação de partículas no leito, menor contato entre a fase fluida e particulada e elevadas taxas de transferência de calor e massa. Este tipo de técnica consegue ser aplicada em variadas operações, como secagem de pastas e cereais, recobrimento, granulação, combustão, aquecimento e resfriamento de sólidos e reações químicas.

A formação do leito se dá a partir da injeção do fluido em um leito de partículas. Na base da coluna está situado um orifício que dá abertura para a entrada da injeção, essa cria um canal preferencial de fluidização. A coluna pode ser em formato cônico ou cilíndrico de base tronco-cônico e é dentro desta que estão contidas as partículas (CREMASCO, 2012).

De início o fluido escoar a uma baixa vazão, formando um leito fixo, pois até este momento as partículas se encontram imóveis enquanto são percoladas pelo fluido. Quando o fluido atingir determinada vazão, será formada uma cavidade preferencial a partir do movimento ascendente de partículas. Esta cavidade possui uma porosidade maior do que o leito fixo, a partir do aumento da velocidade superficial do fluido, será formada uma fonte de partículas, a partir desta é possível que as partículas retornem para a região anular da coluna, estabelecendo um movimento cíclico apresentado na figura 16. As cinco regiões diferentes são definidas como (FERNANDES, 2005):

- Fonte: região de fonte de sólidos.
- Jorro: região onde acontece o transporte ascendente e diluído de partículas.
- Superfície do leito: região densa de partículas as quais começam a escoar em contracorrente à fase fluida.
- Interface jorro/ânulo: zona de interface fluido/partícula situada entre as regiões de jorro e anular.
- Base cônica: região de mistura intensa fluido/partícula localizada na base do leito.

Figura 16 – Regiões de um leito de jorro



Fonte: FERNANDES, 2005.

O ciclo das partículas dentro do leito acontece da seguinte forma, as partículas que estão na zona de interface jorro/ânulo adquirem velocidade das partículas no centro do jorro, por meio do atrito entre elas, acabam sendo carregadas para dentro do jorro até a fonte. Então, escoam em fluxo descendente até a base da coluna, próximo à injeção de fluxo do sistema e, assim, elas invertem o sentido e voltam para a região de jorro ou a interface jorro/ânulo (FERNANDES, 2005).

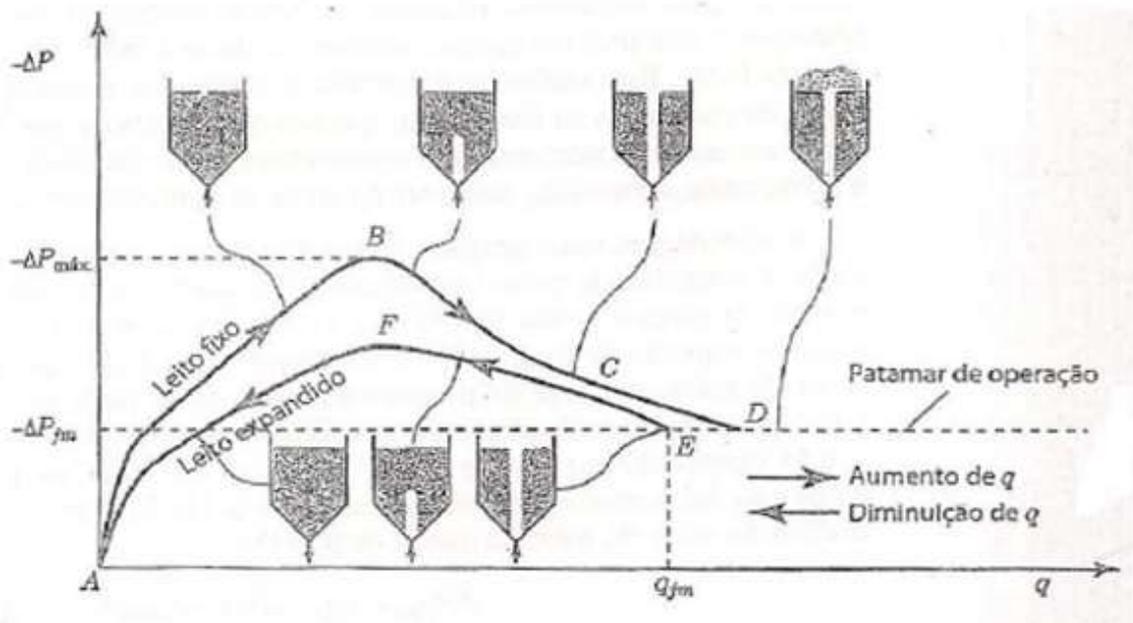
O contato do sistema fluido-partícula em leito de jorro apresenta uma curva característica, esta fornece as principais variáveis operacionais do leito: a queda de pressão e velocidade de jorro estável. Um fator pré determinante para a construção da curva, figura 17, é conhecer as características da partícula e do leito, pois a curva é um função do diâmetro da partícula e da altura do leito (FERNANDES, 2005).

O progresso do jorro com o aumento da velocidade superficial do fluido é observado pela curva contínua ABCD, o processo inverso, que indica a diminuição da velocidade é visto na curva DEFA (CREMASCO, 2012).

Como pode ser observado na figura 17, o ponto A é o início do processo, no qual é notório um comportamento de leito fixo, no qual o ar percola o leito sem provocar modificações, em seguida a queda de pressão cresce com o aumento da velocidade do fluido. No ponto B ocorre a queda de pressão máxima, onde as partículas descoladas são comprimidas entre si, formando um arco compacto que eleva a resistência ao escoamento do fluido. Em seguida o aumento da velocidade do fluido faz romper o jorro, causando uma diminuição na queda de pressão, ponto C (FERNANDES, 2005). Este ponto corresponde ao jorro incipiente,

no qual se encontra a instabilidade do jorro interno devido à oscilação na sua altura. No ponto C o jorro está próximo à superfície do leito, mas é instável em virtude da formação contínua de bolhas na região anular. Qualquer aumento na velocidade superficial do fluido fará com que a pressão caia até o ponto D.

Figura 17– Curva característica do leito de jorro



Fonte: CREMASCO, 2012

Em D é alcançada a queda de pressão de jorro constante, neste nível o jorro aflora para a superfície do leito. Neste ponto a queda de pressão permanece praticamente estável, apesar de pequenas variações na elevação da velocidade do fluido, que pode levar a um aumento da altura da fonte (CREMASCO, 2012).

No processo inverso, ao se reduzir a velocidade do fluido, se alcança o ponto E, onde a velocidade do fluido é mantida mínima para se manter o jorro, o que corresponde à situação de jorro mínimo e sua queda de pressão correspondente, este será o menor valor de velocidade para um jorro estável.

Ao se reduzir ainda mais a velocidade superficial do fluido se alcança o ponto F, que é o local com máxima queda de pressão, devido às interações fluido-partícula. Ao se reduzir ainda mais a velocidade a queda de pressão volta a diminuir, levando o leito a se comportar como um leito fixo (CREMASCO, 2012).

Após a passagem do material sólido pelo secador em leito de jorro, ele deve ser coletado por outro equipamento. Normalmente os sistemas de coletas acoplados a leitos de jorro são os ciclones, este equipamento será abordado no próximo tópico.

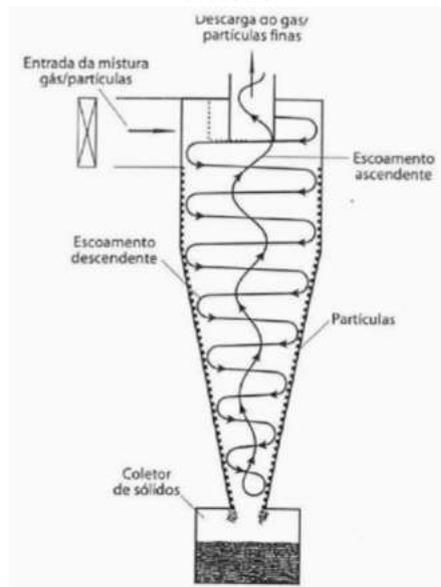
### 3.4.2 Equipamentos que compõem uma unidade experimental de secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes

#### 3.4.2.1 Ciclone

Apesar de não fazer parte dos tipos de secadores, o ciclone, apresentado na figura 18, é um equipamento acoplado em vários sistemas que contém leito fluidizado ou leito de jorro, pois é um coletor de partículas.

No aparato onde serão realizados os experimentos deste trabalho, as partículas secas saem dos leitos e seguem diretamente para um ciclone. Neste equipamento ocorre a separação das partículas sólidas que estão presentes em uma corrente gasosa. Normalmente a forma deste equipamento é uma construção cone-cilíndrica, eles são constituídos de uma entrada lateral e duas saídas orientadas no eixo central do aparato. Na base do equipamento está localizada uma saída que funciona como coletora de partículas sólidas, a outra saída na parte superior é destinada à descarga do fluido e da coleta de partículas finas (PERES, 2002).

Figura 18 – Desenho esquemático da circulação de fluido e partículas dentro de um ciclone.



Fonte: CREMASCO, 2012

O ciclone é classificado como um separador tipo centrífugo, devido à forma de como a corrente fluida contendo as partículas entram no aparelho e em virtude de sua fluidodinâmica.

Como pode ser visto na figura 18, a mistura de fluido com partículas adquire movimento em formato espiral já na entrada do equipamento, esse movimento é contínuo até a base do mesmo, no *underflow* (CREMASCO, 2012).

Em consequência da força centrífuga, proveniente do escoamento da fase fluida, as partículas se orientam na direção da parede do ciclone. Em seguida, sob a força da gravidade, atrito entre as paredes circulares do equipamento e força de arraste as partículas descem sentido o coletor de sólidos. Já o fluido sobre em movimento espiral, circundando o eixo central até a saída superior, chamada de *overflow*.

#### 3.4.2.2 Medidores De Pressão

A unidade experimental que contém o leito de jorro na Universidade do Triângulo Mineiro faz uso de um medidor de pressão (manômetro) em tubo U. A medição de pressão durante o experimento com o leito de jorro é de extrema importância, pois a partir destes resultados que serão obtidos os dados para se montar a curva característica do leito, e assim realizar os experimentos nas variáveis, como a vazão do fluido e queda de pressão, dentro das faixas de estabilização do leito, se evitando consumo desnecessário de energia e controle do procedimento.

Os medidores de pressão tubo em U são muito empregados neste tipo de unidade, devido à facilidade de montagem, operação e custo reduzido. A medição deste manômetro é indicada para baixas pressões e acontece através do balanço/equilíbrio de pressão na coluna de água apontada pelo instrumento. Porém em alguns momentos tem-se uma pequena dificuldade ao se trabalhar com este tipo de medidor, já que dependendo da pressão em que o leito se encontra, não é possível se medir com precisão essa variável, pois ocorrem inúmeras oscilações e vibrações no marcador de pressão.

Pensando nisso, existe a possibilidade de se instalar um controlador de pressão digital, que fornece com exatidão a queda de pressão no sistema. Este tipo de medidor contém um aferidor de pressão local, que transmite o valor medido para um circuito digital que transforma esse sinal em dados para o computador. Com este tipo de medidor se consegue não somente realizar a leitura da pressão com precisão, mas também registrar em formato gráfico os valores coletados pelo equipamento.

Na unidade experimental utilizada neste estudo será instalado um transmissor de pressão diferencial, que é um equipamento para medição de vazão, nível e estanqueidade. Para seu

funcionamento é preciso se verificar as baixas oscilações de pressão, através da análise de pressão unilateral e da pressão estática (THERMA, 2019).

Este equipamento vai muito além da medição de pressão diferencial, pressão relativa e absoluta. Através de um circuito elétrico com elevada precisão, o transmissor é capaz de gerar um sinal elétrico que alimenta outros equipamentos de controle, como indicadores de temperatura, controladores de potência, processos, entre outros (THERMA, 2019).

### 3.4.3 Variáveis que influenciam a micro granulação em leito de jorro com partículas inertes

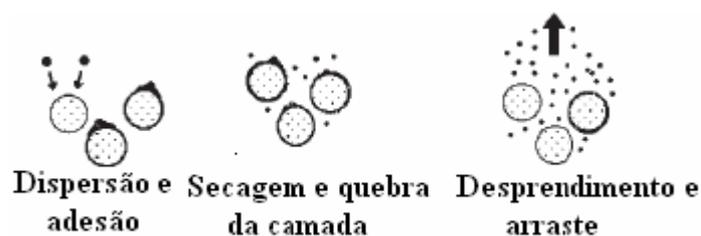
A seguir estão descritas as principais variáveis que influenciam a eficiência de secagem de pastas em um leito de jorro com inertes

#### 3.4.3.1 Partículas Inertes

A secagem em um equipamento de leito de jorro necessita com contato do fluido com as partículas que formarão o movimento de jorro. Em alguns casos, quando não se deseja secar grãos como partículas e sim pastas a serem inseridas dentro do leito, são empregadas partículas inertes (MARTINELLI, 2008).

Este material tem a habilidade de participar o processo, fazendo o movimento de jorro, mas de forma que não irá reagir com o fluido de secagem e nem com a pasta a ser secada. Em alguns estudos de secagem de pastas em leito de jorro, como FERNANDES, 2005, e DANTAS, 2018, ficou provado que a partícula não o reagiu com a pasta e o fluido, sendo apenas de veículo para que o material conseguisse ser secado. A figura 19 apresenta as etapas da secagem em leitos de jorro com partículas inertes.

Figura 19 - Etapas da secagem em leito com partículas inertes.



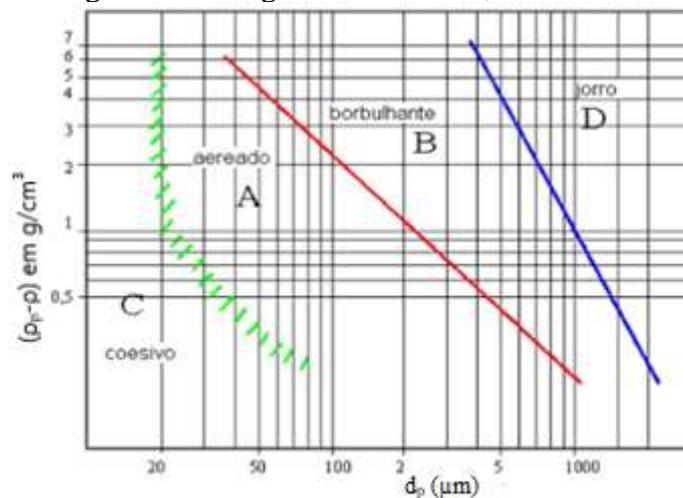
Fonte: MARTINELLI, 2008

As partículas inertes contribuem ainda para a transferência por condução, como fonte de calor para a pasta a ser secada, auxiliando também na recuperação do produto final (PEREIRA, 2020).

Uma forma de classificar das partículas segundo o tipo de fluidização que ela formará com o gás, se dá pela distribuição de Geldart, figura 20.

No diagrama as partículas são divididas em quatro grupos distintos: aerado, borbulhante, jorro e coesivo. Para se localizar as características da fluidização é necessário computar a diferença de densidade entre a partícula ( $\rho_p - \rho$ ) em  $\text{g/cm}^3$  e o diâmetro da partícula  $d_p$  em  $\mu\text{m}$ .

Figura 20 – Diagrama de Geldart, 1973.



Fonte: NASCIMENTO, 2014.

Segundo a classificação as principais propriedades de cada grupo de partículas são: (A) Partículas apresentam fluidização não borbulhante começando a velocidade de fluidização mínima seguida por fluidização borbulhante à medida que aumenta a velocidade do ar. (B) Partículas com fluidização borbulhante. (C) Partículas muito finas, com inaptidão para fluidizar. (D) Partículas grandes com capacidade para leitos de jorro (NASCIMENTO, 2014).

O material inerte empregado em leito de jorro deve ainda obedecer à outras características essenciais para o processo, como um ângulo de contato entre a suspensão que favoreça a secagem, temperatura de fusão acima da temperatura necessária para se secar a pasta, não apresentar reação com o produto a ser secado e apresentar rugosidade que favoreça o desprendimento do filme seco que o recobre.

### *3.4.3.2 Temperatura de trabalho*

Como visto por Barros (2018) a temperatura do ar de entrada não implica em grandes mudanças na queda de pressão e na velocidade do ar de operação, porém a mesma interfere de forma significativa no processo de secagem, principalmente quando o equipamento está próximo da sua capacidade máxima de produção.

A temperatura da pasta de alimentação foi objeto de estudo de Fernandes (2005), concluindo que não é uma variável significativa, pois como a vazão inserida no leito é muito menor que a vazão do ar secante, a temperatura não interfere na eficiência energética do leito.

Barros (2018) reportou por que existe uma temperatura mínima do ar na saída do sistema para as partículas não se aglomerem e que a partir de uma determinada vazão de alimentação, a temperatura do ar de saída era saturada, o que aumenta a umidade final do produto.

### *3.4.3.3 Vazão de alimentação da pasta ou solução*

A forma de alimentação da pasta ou solução pode acontecer na forma atomizada ou por gotejamento dentro do leito. Sua vazão possui forte interferência nas propriedades do produto final, como na umidade, uniformidade e tamanho de partícula formado (DANTAS, 2018).

Com o intuito de analisar o comportamento de um leito de jorro em função da variação da vazão, Barros (2018) concluiu que a variável possui um efeito com sinal negativo no processo, ou seja, o aumento da vazão ocasionou uma diminuição da efetividade de secagem, já que com a vazão se aumenta a quantidade pasta dentro do leito, contribuindo com a formação de pontes líquidas fortes e inibindo o processo de secagem.

### *3.4.3.4 Concentração inicial da pasta ou solução*

A concentração inicial de sólidos presentes na pasta ou solução de alimentação é outra variável muito abordada em secagem em leito de jorro. Larrosa (2012) estudou a secagem de pastas de vegetais em leito de jorro e teve como variável mais significativa a concentração de sólidos da pasta. O aumento da concentração da pasta de 5 para 10% levou ao aumento no teor de compostos fenólicos, na solubilidade proteica e uma menor alteração na coloração do produto final.

Barros e Freire (2019) secaram uma pasta de carbonato de cálcio com concentração de 5%, eles relatam que concentrações de 3% diminuem a queda de pressão do leito, enquanto a

concentração de 9% causa do aumento desta pressão, para o valor intermediário os dois comportamentos são observados.

Barros (2018) destaca que na literatura a concentração da pasta afeta comportamentos no leito de secagem, como o acúmulo de material dentro do leito associada a uma maior concentração, modificando as características do produto final e diminuindo a recuperação de pó pelo ciclone.

#### *3.4.3.5 Altura do atomizador*

A posição do atomizador dentro do leito de jorro pode interferir na fluidodinâmica do mesmo, em determinadas condições operacionais. Normalmente a aplicação é feita na parte superior do cilindro para se facilitara a aeração, troca térmica e regime fluidodinâmico mais estável, dificultando a aglomeração de partículas (BRAGA, 2014; BARROS, 2018).

Os maiores valores de recuperação de produto foram obtidos com atomização no topo do leito de jorro, sendo que a configuração com o atomizador na base do leito gerou uma taxa de acúmulo mais elevada. Sendo que o valor da recuperação com o atomizador no topo ficou entre 60-85% e para a atomização na base do leito, a recuperação caiu para a faixa de 25-65% (SOUZA, 2003).

#### *3.4.3.6 Pressão de atomização*

Silva (2016) estudou a fluidodinâmica de um leito de jorro preenchido de partículas inertes de PEBD, ele abordou interferência da pressão de atomização nas medidas de velocidade de jorro mínimo, sendo que esta modifica a estabilidade e movimento do leito de partículas e pode influenciar negativamente na secagem se não for bem definida. Na ausência da atomização as partículas de PEBC demonstraram uma maior resistência ao jorro, devido às interações interpartículas e forças de coesão, tendo uma maior velocidade de jorro mínimo. Com a atomização essa velocidade reduz, indicando a quebra da resistência interpartícula se estabelecendo o jorro mais facilmente. Para as condições aplicadas o autor adverte que pressões de atomização elevadas, acima de 15 psi (1,03 bar), o leito pode ser tornar empacotado, reprimindo o movimento de jorro das partículas levando a um aumento da velocidade de mínima fluidização.

Apesar de não terem observado um efeito significativo nos tamanhos dos grânulos, resposta do estudo, Borini, Andrade e Freitas (2008) relatam que a posição vertical do bico atomizador é um fator importante na granulação em leitos de jorro, em razão da interferência da dimensão da zona de pulverização, o gradiente de temperatura do leito e as forças de colisão líquido-sólido.

#### *3.4.3.7 Intermitência de alimentação*

A alimentação em um leito de jorro pode ser realizada de forma contínua ou em intervalos de tempo definidos, esses intervalos de alimentação e pausa formam o tempo de intermitência. Seu principal intuito é diminuir a umidade do sistema, reduzindo a aglomeração de partículas e aumentando a eficiência de secagem (BRAGA, ROCHA, 2013; DANTAS, 2018).

Foi apresentado por Trindade (2004) um estudo que mostra uma resposta significativa na melhora do rendimento de recuperação de pó de licor negro se trabalhando com do tempo de intermitência, visto para variadas faixas de temperatura do ar empregadas e quantidades de licor alimentadas.

#### *3.4.3.8 Quantidade de inerte*

A carga de inertes dentro do leito é outro fator a ser observado para o processo de secagem. Barros (2018) cita através de seu trabalho e de acordo com outros autores da literatura que o acréscimo da massa de inertes dentro do leito eleva a queda de pressão e a velocidade de jorro mínimo.

### 3.5 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA AO LEITO DE JORRO

Segundo Araújo e Duarte (2008) nos últimos tempos têm aumentado o número de pesquisa sobre a fluidodinâmica do leito de jorro. Cada vez mais pesquisadores têm interesse em aperfeiçoar a compreensão da dinâmica das partículas que ocorre dentro deste equipamento.

Através do melhoramento da capacidade de processamento e armazenamento dos computadores, a Fluidodinâmica Computacional ganhou um maior destaque entre os estudiosos, pois como requer uma carga computacional considerável, ela se tornou mais acessível à comunidade acadêmica (ARAÚJO; DUARTE, 2008)

A fluidodinâmica computacional ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta que utiliza conceitos das disciplinas de fenômenos de transporte, computação e matemática. A ciência dos fenômenos de transporte estuda os movimentos dos fluidos, o comportamento dos mesmos durante um escoamento e as influências que transferências de calor, massa e reações químicas podem trazer. Existem equacionamentos matemáticos que conseguem exprimir as características dos fluidos em movimento, a parte computacional consegue solucionar essas equações por meio de simulações numéricas, trazendo resultados mais rápidos e precisos (ZANUTTO, 2015).

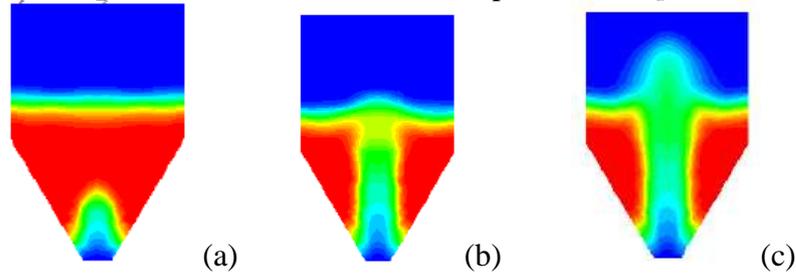
O emprego do CFD em um leito de jorro permite visualizar a distribuição de velocidade das partículas e do fluido, perfil de porosidade do leito e queda de pressão desde o instante que se inicia o movimento até o momento em que se estabiliza. Quando se utiliza a técnica de simulações em CFD com o intuito de verificar os resultados experimentalmente, podem-se compreender os fenômenos envolvidos no escoamento entre fluido e partícula de forma significativa, para se alcançar um melhoramento das condições de operação e até correção de falhas no equipamento (ARAÚJO; DUARTE, 2008).

Um modelo matemático deve ser instituído para se resolver as situações envolvidas no escoamento de fluidos, para as equações de conservação da quantidade de movimento, massa e energia, sendo que este modelo deve obedecer às condições de contorno e iniciais pré-estabelecidas (SHAMES; IRVING HERMAN, 1973).

O Modelo Euleriano Granular aborda a fase particulada como contínua e interpenetrante, gerando uma fase granular pseudo-fluida, a qual depende de algumas definições de propriedades, como a viscosidade bulk e cisalhante da fase granular e pressão da fase granular (SANTOS, 2008). Este modelo utiliza diversas equações constitutivas, adotando-se a Teoria Cinética Granular. É muito aplicado em sistemas multifásicos densos como suspensão de partículas, leitos fluidizados e leitos de jorro, por ser útil e computacionalmente eficaz (ARAÚJO SANTOS, 2017).

A figura 21 ilustra a simulação de três perfis de velocidade para um leito de jorro nas condições de (a) formação do canal de jorro, (b) jorro mínimo e (c) jorro estável encontrados nos estudos de Santos (2008).

Figura 21 – Perfis de velocidade para leito de jorro.



Fonte: Santos, 2008.

O quadro 1 apresenta as equações constitutivas unidas do conjunto das equações de balanço de massa e quantidade de movimento. Essas equações foram resolvidas se empregando a técnica de volumes finitos com o Algoritmo SIMPLE, o qual cria o vínculo velocidade-pressão (ARAÚJO e SANTOS, 2017).

Quadro 1 – Sistema de equações para o escoamento multifásico gás-sólido.

(1) Continuidade para a fase q:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (02)$$

(2) Conservação de Momento para a fase contínua g:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} + \vec{R}_{gs} + (\vec{F}_g + \vec{F}_{lift,g} + \vec{F}_{vm,g}) \quad (03)$$

(3) Conservação de Momento para a fase granular s (s=A, B):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \vec{R}_{sg} + (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{vm,s}) \quad (04)$$

(4) Conservação da Energia cinética para fase granular s (s=A, B)

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-p_s \overline{\overline{I}} + \overline{\overline{\tau}}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{ts} \quad (05)$$

(5) Relações constitutivas para escoamento gás-sólido:

a) Troca de energia entre as fases granular e gasosa:  $\phi_{gs} = -3K_{gs} \theta_s$  (06)

b) O tensor tensão de Reynolds (q = g, s):  $\overline{\overline{\tau}}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left( \lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \overline{\overline{I}}$  (07)

c) Viscosidade cisalhante da fase particulada s (s=s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub>):  $\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,cin} + \mu_{s,fr}$  (08)

Termo colisional (Lun *et al.* 1984):  $\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2}$  (09)

Termo cinético (Syamlal *et al.* 1993):  $\mu_{s,cin} = \frac{\alpha_s \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[ 1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right]$  (10)

d) Viscosidade bulk (Lun *et al.*, 1984):  $\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) (\theta_s / \pi)^{1/2}$  (11)

e) Função distribuição radial (Ogawa, 1980):  $g_{0,ss} = \left[ 1 - (\alpha_s / \alpha_{s,max})^{1/3} \right]^{-1}$  (12)

f) Pressão de sólidos da fase granular s:  $p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s$  (13)

g) Arraste entre fases gasosa e granular, Gidaspow *et al.* (1992):

$$\text{Para } \alpha_g > 0,8 \text{ (Wen e Yu, 1966)} \quad K_{sg} = \frac{3}{4} C_D (\alpha_s \alpha_g \rho_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g| / d_s) \alpha_g^{-2,65} \quad (14)$$

$$C_D = (24 / \alpha_g \text{Re}_s) \left[ 1 + 0,15 (\alpha_g \text{Re}_s)^{0,687} \right] \quad (15)$$

$$\text{Para } \alpha_g \leq 0,8 \text{ (Ergun, 1952):} \quad K_{sg} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_g) \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1,75 \frac{\rho_l \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \quad (16)$$

h) Dissipação de energia devido colisões partícula-partícula (Lun *et al.*, 1984):

$$\gamma_{\theta_m} = (12(1 - e_{ss}^2) g_{0,ss} / d_s \sqrt{\pi}) \rho_s \alpha_s^2 \alpha_s^2 \theta_s^{3/2} \quad (17)$$

i) Difusão de energia cinética (Gidaspow *et al.* 1992):

$$k_{\theta_s} = \frac{150 d_s \rho_s \alpha_s \sqrt{\theta_s \pi}}{3844 (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[ 1 + \frac{6}{5} \alpha_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2 \rho_s \alpha_s^2 d_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss} \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (18)$$

Fonte: Araújo e Santos, 2017.

### 3.6 ESTADO DA ARTE: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DA SECAGEM DE PASTAS E SOLUÇÕES EM LEITO DE JORRO COM INERTES E O USO DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O campo de pesquisa envolvendo leito de jorro tem crescimento contínuo desde 1960, com o surgimento da técnica em 1954 pelos pesquisadores Gishler e Mathur, os quais desenvolveram o equipamento com propósito de realizar secagem de grãos (OLIVEIRA; *et al.*, 2015). Devido à grande variabilidade de funções, este equipamento segue sendo empregado em um amplo campo de pesquisas. Com o intuito de se mapear os principais trabalhos deste tema foi realizado uma busca bibliométrica pelo banco de dados da *Web of Science*. Onde o assunto Spouted Bed (leito de jorro) foi pesquisado, como se gerou um volume muito grande de publicações, 2.344, o tema foi refinado se incluindo o termo Drying pastes (secagem de pastas). A tabela 1 apresenta os dez artigos mais citados.

Marreto, Freires e Freitas (2006) realizaram um estudo sobre a qualidade do produto advindo da secagem de pastas farmacêuticas em leito de jorro empregando corpos inertes. Eles testaram a secagem de pastas para duas plantas brasileiras, o urucum e o guaraná. As secagens em leito de jorro proporcionaram uma diversidade de condições operacionais que consentiram uma boa preservação dos princípios ativos e um teor de umidade adequado. O processo de secagem de urucum se apresentou competitivo em comparação com os métodos comerciais,

além de demonstrar que a recuperação de microcápsulas secas no leito de jorro trouxeram uma opção de medicamento com elevado nível de solubilidade.

Tabela 1 - Os 10 artigos mais citados pelos temas Spouted Bed e Drying pastes.

Título do artigo	Autores	Ano	Citações
Drying of pharmaceuticals: The applicability of spouted beds	Marreto, RN; Freire, JT; Freitas, LAP	2006	41
Drying of pastes in spouted beds of inert particles: Design criteria and modeling	Passos, ML; Masarani, G; Freire, JT; Mujumdar, AS	1997	41
Drying of pulps of tropical fruits in spouted bed: Effect of composition on dryer performance	Medeiros, MFD; Rocha, SCS; Alsina, OLS; Jeronimo, CEM; Medeiros, UKL; da Mata, ALML	2002	40
Drying of chitosan in a spouted bed: The influences of temperature and equipment geometry in powder quality	Dotto, GL; Souza, VC; Pinto, LAA	2011	38
Low temperature drying of pomace in spout and spout-fluid beds	Marmo, L	2007	32
Effects of operating conditions on the quality of mango pulp dried in a spout fluidized bed	da Cunha, RL; de la Cruz, AG; Menegalli, FC	2006	32
Glass transition control of the detachment of food pastes dried over glass plates	Collares, FP; Finzer, JRD; Kieckbusch, TG	2004	31
Phycocyanin content of <i>Spirulina platensis</i> dried in spouted bed and thin layer	Oliveira, EG; Rosa, GS; Moraes, MA; Pinto, LAA	2008	29
A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium	Freire, JT; Ferreira, MC; Freire, FB; Nascimento, BS	2012	27
Analysis of fluid dynamics behavior of conical spouted bed in presence of pastes	Bacelos, MS; Neto, PIS; Silveira, AM; Freire, JT	2005	27

Fonte: Autora, 2021.

Passos *et al.* (1997) abordaram a secagem de materiais pastilhados em leitos de jorro de partículas inertes. No trabalho foi estudado o desempenho de secagem de pastas em leitos de jorro em função das dimensões da coluna, escoamento do fluido, características e propriedades da pasta. Os autores apresentaram uma relação entre a energia mínima necessária do fluido para forma o jorro e a energia necessária para se manter o jorro. Quando essa relação é maior que 0,014, um leito de jorro alongado, preenchido de inertes e suspensão pulverizada no topo tem melhor performance na secagem. Já quando esta relação é maior que 0,014 para se atingir uma melhor capacidade de secagem por unidade de volume de inerte o indicado é se ter um leito de jorro raso com ângulos cônicos inferiores a 60.

Medeiros *et al.* (2002) realizaram um estudo sobre a influência da composição química da pasta a ser secada no leito de jorro, se elevando a concentração de açúcares, lipídios, fibras, amidos e pectina. Eles usaram a técnica de planejamento fatorial para se analisar o efeito dessas composições, mantendo as condições operacionais fixas, empregando um planejamento  $2^{5-1}$

com 16 experimentos e 3 réplicas no ponto central. A análise estatística mostrou que a concentração das fibras não foi uma variável significativa, enquanto as concentrações de açúcares e amido influenciam significativamente a dinâmica dos fluidos e junto com as concentrações de pectina e lipídios essas variáveis tem forte influência na eficiência no processo de geração do pó.

Dotto, Souza e Pinto (2011) apresentaram um artigo sobre a influência da temperatura (90, 100 e 110°C) e da geometria (retangular e cilíndrica) do leito de jorro na secagem da quitosana. Provinda de rejeitos de camarão, a pasta de quitosana foi seca no leito de jorro, sendo testadas diferentes temperaturas no ar de entrada e geometrias do leito. Em todos os casos o grau de desacetilação não foi comprometido, sendo obtido o teor de umidade comercial. O aumento da temperatura no leito levou à polimerização da quitosana (com crescimento das partículas e escurecimento do pó). A melhor condição encontrada foi na geometria retangular (fornecendo um pó mais fino com melhor recuperação) e com ar de secagem a 90°C, temperatura que não afetou a qualidade da quitosana.

Marmo (2007) abrangeu em sua pesquisa a secagem do resíduo sólido resultante da produção de azeite virgem, que é um meio termo entre uma pasta e um sólido particulado. Ele utilizou a secagem em dois equipamentos diferentes, o leito de jorro convencional e o leito de jorro fluidizado contendo um tubo draft. O leito de jorro convencional foi operado em bateladas, o que dificultou o processo de secagem, já que a umidade inicial do material se apresentou muito alta, tendendo a aglomerações dentro do leito, então foi abordada uma temperatura do ar de entrada ótima, para ajudar a acelerar a secagem sem comprometer a velocidade do ar. Já a secagem no leito de jorro fluidizado com tubo draft foi realizada em processo contínuo, o que demonstrou que para o regime de fluidização ideal, o ar fica saturado pela umidade, levando a altas taxas de ar de fluidização, assim o secador deve ser operado no regime de leito borbulhante.

Cunha, Cruz e Menegalli (2006) utilizaram um planejamento fatorial completo  $2^4$  com 3 réplicas no ponto central e 8 em pontos axiais, para se estudar a influência da temperatura, vazão de alimentação, jorro e velocidade anular do gás durante a secagem de polpa de manga em um leito de jorro. O processo foi realizado com vazão de pasta intervalada, já que a alta concentração de açúcar da fruta levava ao colapso da cama com alimentação contínua. Pela análise estatística foi verificado que a variável mais significativa no processo de secagem foi a temperatura. Temperaturas elevadas induziram a uma maior eficiência na produção de pó e na

retenção de carotenóides, bem como na diminuição do escurecimento do produto e do teor de umidade, proporcionando uma melhor secagem e qualidade do produto final.

Collares, Finzer e Kieckbusch (2004) realizaram um estudo sobre a transição vítrea do desprendimento de pastas alimentícias secas sobre placas de vidro. Secadores como o leito de jorro usam partículas sólidas em movimento como superfície de suporte para pastas a serem secadas. Foi utilizado uma câmara de secagem com um equipamento que possibilita a formação de um filme uniforme de uma pasta, observou-se que ao se reduzir a temperatura de transição vítrea do filme, mais seco o filme deve estar para que ocorra o descolamento. Assim, eles conseguiram relacionar o fenômeno de transição vítrea como um ponto de partida para os projetos de secadores ou mesmo nas formulações de pastas, visando a otimização do processo de secagem.

Oliveira *et al.* (2008) propuseram a secagem de *Spirulina Platensis* em um leito de jorro e em camada delgada a fim de se avaliar as características do produto final, teor de ficocianina e solubilidade em água. O leito de jorro de geometria convencional, demonstrou bom funcionamento, sem apresentar colapso durante a secagem experimental. Para ambas as técnicas os valores de 37% de solubilidade foram encontrados e os maiores teores de se destacaram no leito de jorro convencional e na camada delgada operando com 50°C, essa última, porém não atingiu os teores de umidade comercial, sendo seus resultados desconsiderados.

Freire *et al.* (2012) elaboraram um artigo de revisão sobre a secagem com partículas inertes, abrangendo estudos sobre leitos de jorro, fluidizado, matérias primas líquidas ou pastas. Um ponto em destaque foi a dificuldade de se trabalhar com secadores de diâmetro maior que 50cm, por ser uma dificuldade associada nas operações não somente de secagem, mas com o leito de jorro em geral. Destacaram também que a principal linha de pesquisa recente indica a compreensão de como a composição da pasta interfere no comportamento da secagem. A pasta interfere não só a dinâmica do leito, mas também os fenômenos de transferência de calor e massa.

Bacelos *et al.* (2015) realizaram uma análise do comportamento fluidodinâmico em um leito de jorro cônico na presença de pastas. Os materiais testados no artigo foram a pasta de ovo e a pasta de glicerol, onde se avaliou a velocidade mínima de jorro, altura da fonte, queda de pressão, concentração da pasta e teor de umidade do filme. Durante o estudo puderam observar que para o leito de jorro cônico, as pastas empregadas ao serem aspergidas conseguem

modificar as condições mínimas de jorro, formando pontes líquidas e quase sólidas móveis, para o glicerol e a pasta de ovo, respectivamente. Por fim apontam que com a adição de pastas a dinâmica dos fluidos do leito de jorro é alterada, dessa forma ao se projetar e modelar novos secadores, deve-se levar em consideração os efeitos no regime de jorro.

Ao se trabalhar com o sistema operacional de secagem de pastas em leito de jorro através de materiais inertes existe uma faixa de variáveis que devem ser estudadas a fim de se compreender a interferência de cada uma, tanto no processo como no resultado final do produto, porém a realização de testes casuais não consegue descrever a significância de cada variável. Por essa razão em muitos estudos é empregado o planejamento experimental, com essa metodologia é possível se avaliar quantitativamente a influência das variáveis de um sistema em um processo controlado (TACON, FREITAS, 2011).

Deste modo refinou-se ainda mais a busca, adicionando o termo “Experimental Design”, com o intuito de se selecionar os artigos de secagem de pastas em leito de jorro, os quais tivessem aplicado um planejamento experimental ao longo dos ensaios empíricos. Por conseguinte, foi obtido um total de 5 artigos, esses são listados na tabela 2 por ordem de citações.

Os dois primeiros artigos da lista, de Passos *et al.* e de Marmo, foram apresentados na seleção anterior, a qual destaca a secagem de pastas em leito de jorro.

Tabela 2 - Os artigos refinados temas Spouted Bed, Drying pastes e Experimental Design.

Título do artigo	Autores	Ano	Citações
Drying of pastes in spouted beds of inert particles: Design criteria and modeling	Passos, ML; Masarani, G; Freire, JT; Mujumdar, AS	1997	41
Low temperature drying of pomace in spout and spout-fluid beds	Marmo, L	2007	32
Drying of milk-blackberry pulp mixture in spouted bed	Braga, MB; Rocha, SCS	2013	9
Paste residence time in a spouted bed dryer. III: Effect of paste properties and quality interactions	Tacon, LA; Freitas, LAP	2007	9
Paste Residence Time in a Spouted Bed Dryer. IV: Effect of the Inert Particle Size Distribution	Tacon, LA; Freitas, LAP	2011	5

Fonte: Autora, 2021.

Braga e Rocha (2013) trouxeram uma análise da secagem de polpa de leite com amora em um leito de jorro, através do uso de esferas de poliestireno e polipropileno como material

inerte. Para se realizar o estudo, eles utilizaram um planejamento fatorial  $2^{3-1}$  realizando 11 experimentos com 3 repetições no ponto central. Durante o estudo foi comparado duas formas de alimentação da pasta, por gotejamento e por atomização. A secagem por gotejamento nas partículas de poliestireno proporcionou a melhor eficiência de produção, 60%, com um baixo teor de umidade (menor que 15%). De modo geral a alimentação por gotejamento foi a que exibiu resultados superiores, tanto na qualidade do produto final como na performance do processo.

Tacon e Freitas (2007) estudaram os efeitos das propriedades da pasta durante o tempo de residência na secagem em um leito de jorro preenchido de material inerte (esferas de vidro e de polietileno). Eles realizaram a pesquisa com auxílio de um planejamento experimental fatorial completo  $2^3$  com duas réplicas em pontos axiais, se variando três propriedades da pasta: teor de sólidos, tensão superficial e viscosidade. Através da análise de variância conseguiram determinar que o tempo de residência da secagem com esferas de vidro, dependiam das variáveis de teor de sólidos e da tensão superficial. Para a secagem com o polietileno, além das duas outras variáveis, a viscosidade também afetou significativamente o tempo de residência da pasta no secador.

Tacon e Freitas (2011) apresentaram novamente um estudo sobre o tempo de residência na secagem em um leito de jorro, porém nesse artigo o foco de investigação foi a distribuição do tamanho de partículas inertes. Eles realizaram um planejamento experimental fatorial completo  $2^3$  com duas réplicas em pontos axiais, sendo que as variáveis observadas foram o tamanho médio das partículas inertes, o tipo de distribuição de mistura das partículas inertes (Binomial ou Gaussina) e a forma de injeção da pasta no leito (por gotejamento ou atomização). Pela análise de variância os autores notaram que o efeito do tamanho médio das partículas inertes é muito significativo para o tempo de residência, e até então não tinha sido abordado. Foi observado que a distribuição e alimentação também interferem ao nível de 5% na resposta do tempo de residência do material. Os autores evidenciam que ao se modificar simultaneamente a distribuição de tamanho e o tamanho médio das partículas inertes, os tempos de residência de da pasta podem ser amortizados pela metade, assim atenuando as perdas devido à degradação.

## 4 MÉTODOS

### 4.1 TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DO FERTILIZANTE FOLIAR

Para analisar, por comparação, se houve modificações e melhorias causadas pelo processo de secagem, os testes de caracterização do fertilizante foliar estudado nesta pesquisa foram realizados em duas fases, no início dos testes, antes de ser submetido ao secador de leito de jorro, e após a secagem.

#### 4.1.1 Distribuição granulométrica

Inicialmente foi realizada uma análise granulométrica para se avaliar a distribuição do tamanho das partículas presentes no fertilizante. O método empregado foi a análise por peneiramento, com o emprego de 5 peneiras de diferentes tamanhos de abertura: 40, 45, 50, 100 e 270 mesh. As peneiras foram dispostas do maior tamanho para o menor e, em seguida, o pó foi despejado sobre a peneira de maior abertura, então, o peneirador mecânico foi fechado e acionado por 10 min.

Após a separação, a massa retida em cada peneira foi pesada em balança analítica e seus valores registrados. Esses dados foram tratados e passaram por análise de distribuição granulométrica segundo os modelos descritos na tabela 3.

Tabela 3 – Modelos de distribuição granulométrica.	
Modelo	Equação do modelo
RRB	$X = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{D}{D'} \right)^n \right]$
Sigmóide	$X = \frac{1}{1 + \left( \frac{k}{D} \right)^m}$
Log Normal	$y = 0,5 + 0,5 * \operatorname{erf} \left[ \frac{\ln \left( \frac{d}{\bar{d}_g} \right)}{\sqrt{2} * \ln(\sigma_g)} \right]$

Fonte: Cremasco, 2012.

Segundo Cremasco (2010), o diâmetro de Sauter indica o diâmetro da partícula na qual a relação de volume por superfície é a mesma para todas as partículas presentes em uma amostra. Ele é o diâmetro médio de partículas mais empregado em sistemas particulados. Pode ser calculado segundo a equação 19.

$$\bar{D} = \frac{1}{\sum \frac{\Delta x_i}{D}} \quad (19)$$

#### **4.1.2 Tempo de Solubilidade**

Para o teste de solubilidade deve-se dosar o fertilizante, e, para isso, era pesado 0,5 g de fertilizante na balança analítica. Então, com o auxílio de uma proveta de 25 mL, o volume completo com água destilada era medido e transferido para um béquer de 100 mL, posicionado sob um agitador mecânico. Por fim, adicionava a massa pesada do fertilizante no béquer, cronometrando-se o tempo necessário para a solubilização completa do produto (ALBERTO, 2017).

#### **4.1.3 Potencial hidrogeniônico (pH)**

Para o teste de pH calibrou-se o potenciômetro para medir o pH com as soluções-tampão de pH 4,0 e 7,0 e, em seguida, verificou-se este ajuste com uma dessas soluções. Depois, o eletrodo foi cuidadosamente inserido na solução da amostra e, aguardou-se a estabilização, e registrando a leitura.

#### **4.1.4 Análises de DRX**

As análises no difratômetro de raios X foram realizadas com o objetivo de se conhecer a natureza da estrutura do material antes e após o processo secagem no leito de jorro. Elas geraram gráficos dos picos de difração em função do ângulo de incidência da radiação no material.

#### **4.1.5 Umidade**

A determinação da umidade não é procedimentada de forma direcionada para fertilizantes foliares pelo MAPA, assim para o teste de umidade registrou-se o peso de uma placa petri sobre a balança semi-analítica, em seguida, retirou-se a tampa da placa e a balança foi tarada. Então, o fertilizante foi adicionado e o valor da massa anotado. Na sequência, a placa contendo o fertilizante foi levada, destampada, para a estufa por 1 h. Em seguida, tampou-se a placa petri antes de retirar a amostra da estufa. Depois anotou-se o valor do conjunto de placa petri + fertilizante seco. Por fim, calculou-se a porcentagem de umidade perdida do fertilizante.

Este teste foi empregado para analisar a umidade do produto coletado no final do processo de secagem do leito de jorro. Foram realizadas as análises para todas as amostras de

cada ensaio, que se diferenciaram pelos valores das variáveis manipuladas no processo. A melhor descrição destes ensaios será abordada na sessão 4.6.3, a qual elucida o planejamento experimental utilizado.

## 4.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA PARTÍCULA INERTE

Para se iniciar a experimentação de um leito de jorro com inertes é necessário saber primeiro as características da partícula inerte a ser empregada dentro do leito como fase sólida. As partículas de interesse deste estudo foram os *pellets* de polietileno de baixa densidade PEBD, material que foi selecionado devido a algumas características que possui. Como o polietileno é um material leve, requer uma menor quantidade energética para ser executar a fluidodinâmica necessária do equipamento, além de possuir uma superfície levemente porosa, que irá facilitar o desprendimento do pó seco que irá recobrir a partícula.

### 4.2.1 Caracterização física e morfológica dos sólidos inertes

A densidade das partículas inertes foi calculada pelo método picnométrico. De início, os picnômetros foram pesados e calibrados com água destilada, para se encontrar o volume real de cada vidraria. Com os picnômetros limpos e secos, a cada um foi adicionado 200 partículas de polietileno, e aferida sua massa. Com as partículas inseridas, o volume das vidrarias foi completado com água destilada e o seu peso aferido novamente. Para se realizar o cálculo da densidade aparente ( $\rho_p$ ) foi empregada a Equação 20. Por esse método também foi possível se obter o valor do volume do polietileno ( $V_p$ ), assim como o diâmetro volumétrico da partícula ( $d_V$ ), computando as Equações 21 e 22, respectivamente.

$$\rho_p = \frac{m_{pic+poli} - m_{pic}}{(m_{pic+água} + m_{pic+poli}) - (m_{pic} + m_{pic+poli+água})} \quad (20)$$

$$V_{poli} = \frac{(m_{pic+poli} - m_{pic})}{\rho_p} \cdot \frac{1}{200} \quad (21)$$

$$d_V = \left( \frac{6 \cdot V_{poli}}{\pi} \right)^{1/3} \quad (22)$$

sendo  $m_{pic}$  a massa do picnômetro,  $m_{pic+poli}$  a massa do picnômetro com as partículas,  $m_{pic+água}$  a massa do picnômetro com a água,  $m_{pic+poli+água}$  a massa do picnômetro com as partículas e a água destilada.

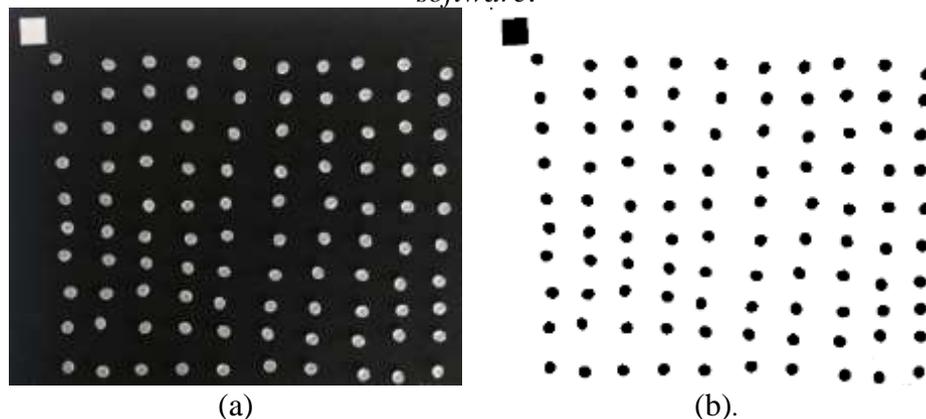
A porosidade de empacotamento é dada pela relação entre o volume de espaços vazios no empacotamento do material e o volume total ocupado pelo mesmo. Para se determinar a porosidade, foi preciso se adicionar partículas a um recipiente de volume conhecido e determinar a massa de partículas. A porosidade ( $\varepsilon$ ) é calculada pela Equação 23.

$$\varepsilon = 1 - \frac{m / \rho_p}{V_{total}} \quad (23)$$

onde  $m$  é a massa de partículas,  $\rho_p$  é a densidade aparente do material e  $V_{total}$  é o volume do recipiente.

Também foi necessário se descobrir algumas características morfológicas do material, tanto para os experimentos no leito, como para as simulações fluidodinâmicas. Para se obter estes dados foram calculados os fatores de forma das partículas como circularidade, alongamento e esfericidade, porosidade do leito. Através do *software* ImageJ®, é possível se realizar uma análise bidimensional das partículas. De início gera-se uma fotografia das partículas de polietileno, Figura 22 (a), as quais são tratadas pelo programa, Figura 22 (b), fornecendo dados sobre a área superficial, maior e menor diâmetro das partículas e perímetro.

Figura 22 – Imagens das partículas de polietileno (a) antes e (b) depois do tratamento do *software*.



Fonte: da autora, 2021.

Com os dados advindos do programa computacional foram calculados o alongamento, arredondamento e circularidade e a esfericidade da partícula, usando as Equações 24, 25 e 26, respectivamente.

$$Al = \frac{b}{a} \quad (24)$$

sendo  $a$  a menor dimensão da partícula e  $b$  a maior.

$$Ad = \frac{1}{C} = \frac{A_p 4\pi}{P^2} \quad (25)$$

em que  $Ad$  é o arredondamento,  $C$  a circularidade,  $A_p$  é a área projetada e  $P$  o perímetro.

$$\phi = \frac{2}{d_{PI}} * \left(\frac{A_p}{\pi}\right)^{1/2} \quad (26)$$

em que  $\phi$  é a esfericidade,  $d_{PI}$  o diâmetro de menor esfera circunscrita e  $A_p$  a área projetada da partícula.

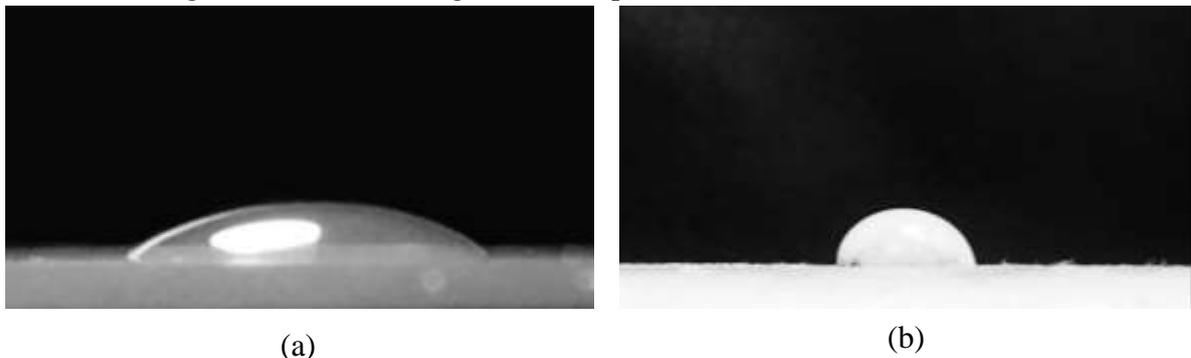
Em seguida foi analisada a classificação da partícula de polietileno segundo o diagrama de Geldart. Assim, calculou-se a diferença entre as densidades da partícula inerte  $\rho_p$  e do fluido de aquecimento do processo  $\rho$ , e conhecendo, também, o diâmetro da partícula  $d_p$  (em  $\mu\text{m}$ ), bastou averiguar no diagrama a região de fluidização que a partícula se encontra.

#### 4.2.2 Medida do ângulo de contato do sistema sólido-líquido

Para estimar se uma solução ou pasta irá molhar de forma eficiente a superfície de uma partícula, é preciso de contabilizar o ângulo de contato entre eles. Segundo a literatura, se um ângulo de contato é maior que  $90^\circ$  ele não recobre a superfície, mas se ele é menor que  $90^\circ$  o líquido tem a capacidade de molhar o sólido. A intensidade do ângulo varia de acordo com o tipo de superfície e o tipo de líquido que é gotejado sobre ela (NASCIMENTO, 2015).

Na Figura 23 tem-se o exemplo de duas superfícies distintas, sendo que em (a) tem-se uma gota de água sobre o vidro, e em (b) uma gota de água sobre o polietileno – PEBD. É possível notar como o ângulo de contato entre o vidro e a água é muito menor do que o ângulo entre o PEBD e a água, indicando que a água possui uma melhor molhabilidade sobre o vidro.

Figura 23 – Gotas de água sobre superfícies de (a) vidro e (b)PEBD.



Fonte: da autora, 2021.

Em estudos realizados por Donida (2004) e Rocha, Donida e Marques (2009) foi averiguado que em secadores de leito de jorro com emprego de inertes, ângulos de contato superiores a  $70^\circ$  não contribuem para o revestimento da partícula. Isto acontece, pois, as forças de adesão da película polimérica na superfície do sólido inerte não são fortes o suficiente, tendendo para a secagem e granulação, sendo o pó fino elutriado pelo processo.

A Figura 24 esquematiza essa diferença entre o ângulo de contato para a granulação de pastas e soluções e para o recobrimento.

Figura 24 – Ângulo de contato para granulação e recobrimento.



Fonte: da autora, 2021

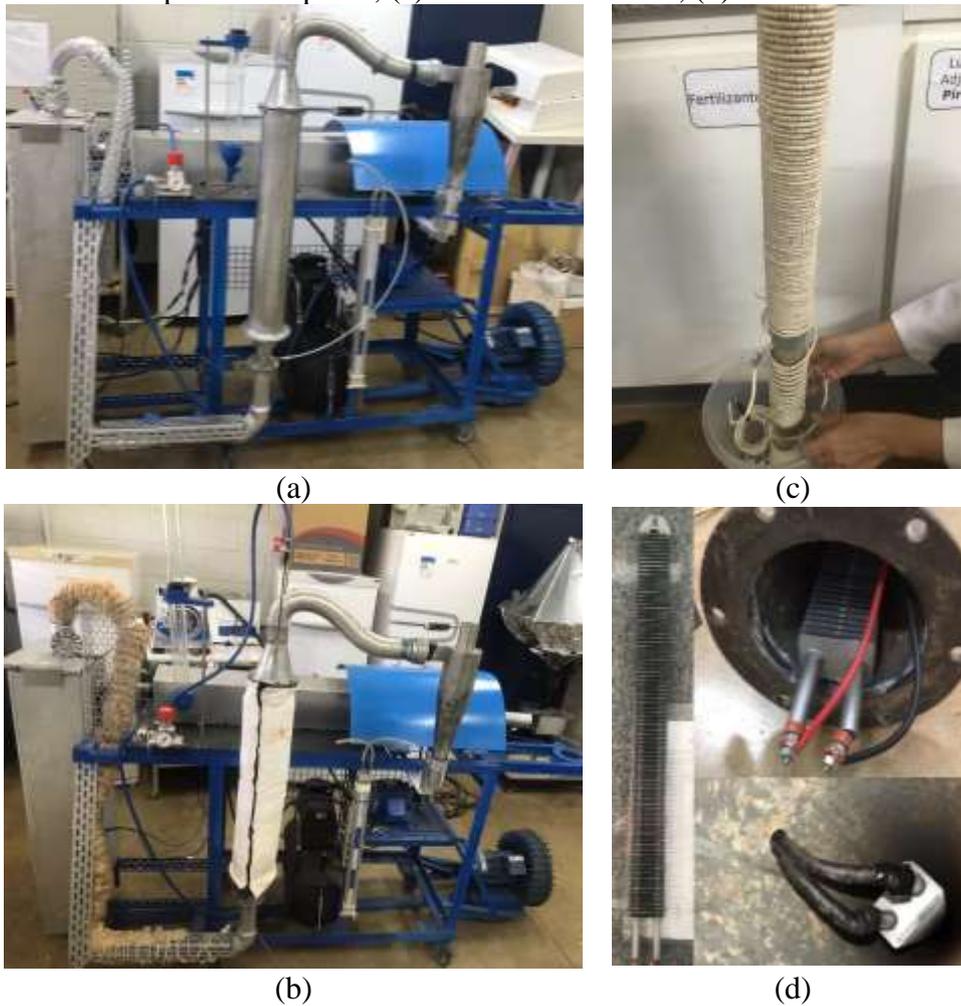
Para se verificar o ângulo de contato da suspensão de fertilizante foliar e a superfície de PEBD, foram tiradas 40 fotos de diferentes gotas da solução  $0,02 \text{ g/mL}$  (concentração recomendada pelo fabricante para uso na agricultura) sobre uma superfície lisa de PEBD. Em seguida, as fotos tiradas com um aparelho celular foram tratadas online em uma página da internet chamada de Transferidor Online (GINIFABI, 2021). Neste site é possível se adicionar qualquer tipo de fotografia e calcular ângulos sobre as imagens, como na Figura 22. Na sequência, uma média foi calculada para se encontrar o valor médio dos ângulos.

O mesmo procedimento foi realizado para se medir o ângulo de contato entre a água pura e a superfície de PEBD, a fim de verificar se a adição do fertilizante foliar interferiu no ângulo do sistema sólido-líquido estudado.

#### 4.3 UNIDADE EXPERIMENTAL

Na unidade experimental original de leito de jorro, que pode ser observada na Figura 25 (a), foi necessário se realizar alguns reparos para se iniciar os testes.

Figura 25 – (a) Unidade experimental com leito de jorro da UFTM antes dos reparos; (b) unidade depois dos reparos; (c) resistência anterior; (d) resistência atual.



Fonte: da autora, 2021.

Entre as melhorias efetuadas, pode-se destacar as seguintes:

- Adição dos sensores de pressão para instrumentação.
- Troca de mangueiras siliconadas para realizar a leitura de instrumentação.
- Troca da tubulação espiralada entre a saída do leito até a entrada do ciclone, por uma de parede interna lisa.
- Troca da resistência espiral revestida com miçangas de cerâmica, figura 25 (c), por uma resistência de superfície aletada, figura 25 (d), própria para ar.
- Adição de manta isolante na tubulação de transporte do fluido de secagem.
- Adição de manta isolante revestida sobre o cilindro do leito de jorro.
- Troca de afiação elétrica do sistema de aquecimento da unidade.
- Troca de disjuntores elétricos da unidade.
- Troca do termopar tipo k do controlador de temperatura da unidade.

- Perfuração do leito de Inox em três alturas diferentes, para inserir os sensores de temperatura.
- Troca da bomba de alimentação anterior por uma de menor vazão.
- Adição de filtro tipo manga para retenção de particulados no *overflow* do ciclone.

Após as melhorias serem realizadas a unidade experimental atual, figura 25 (b), esta pôde entrar em funcionamento. No quadro 2 estão discriminados os principais componentes da unidade experimental atual e na figura 26 pode-se observar sua representação.

Quadro 2 – Detalhamento dos componentes da unidade experimental.

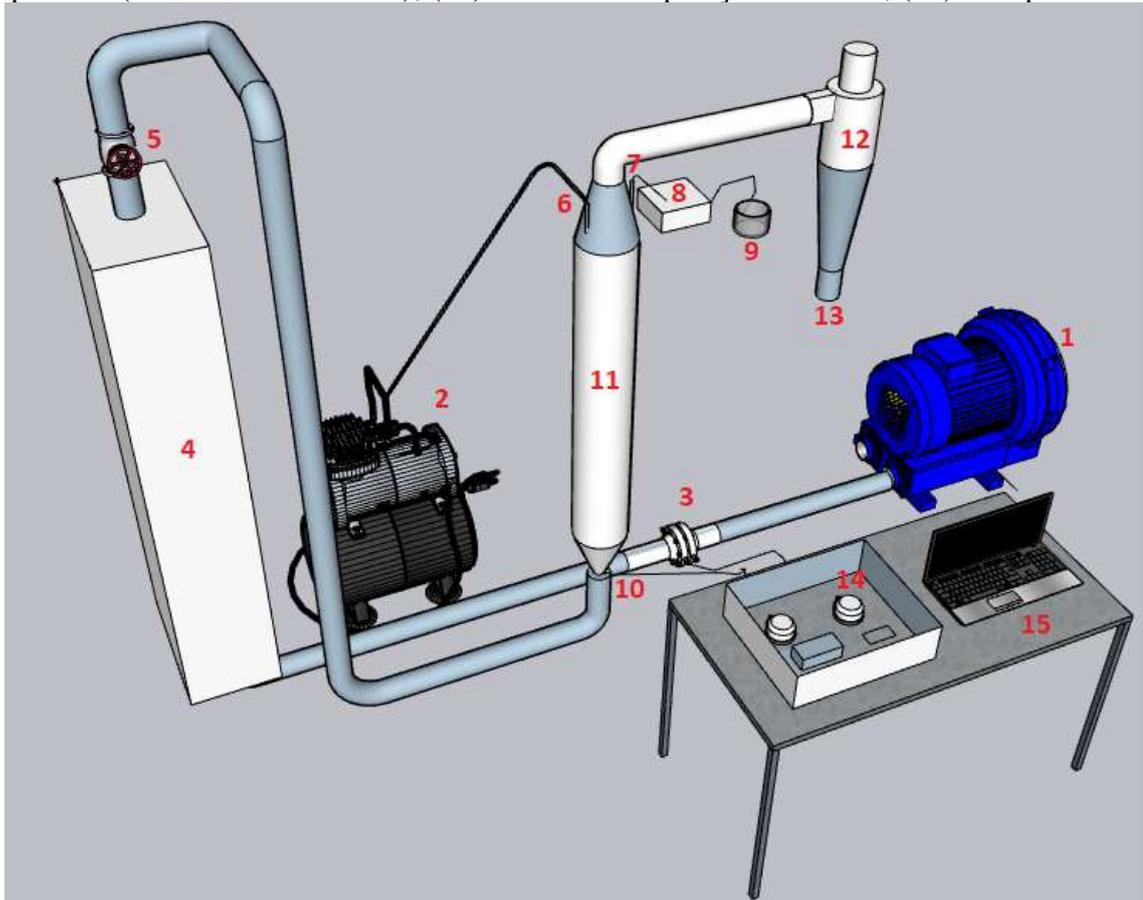
Componente	Modelo	Fabricante	Dados gerais
Soprador	CRE-04 Motor de indução- Gaiola	Aeromack (Motor Hércules)	Potência de 4,00 CV; trifásico; 220V; 3480rpm; 60Hz.
Placa de orifício	Diâmetro externo de 6,8 cm e interno de 3 cm	-	Calibrada durante este trabalho, utilizando a equação $Q=K*(\Delta P^n)$
Válvula da vazão do ar de secagem	Gaveta de 2 polegadas	Mipel	Atua sobre a vazão de ar proveniente do soprador.
Aquecedor	Resistência aletada	-	Potência de 4000 W
Controlador de Temperatura	INV-5822	Inova	Controla a temperatura da resistência através de um termopar tipo K
Leito de jorro	Convencional	Fabricado sob medida	Hc = 73 cm; Dc = 12 cm; Di = 2,0 cm; $\gamma = 40^\circ$ ; Aço inox.
Transdutor de pressão	Series MS Magnesense®	Dwyer Instruments	Faixa de medição de 1-10 psi, sinal de saída de 0-5 V e com alimentação de 17-36 V.
Fonte DC	Chaveada colméia estabilizada	-	Alimenta os transdutores de pressão. Tensão de saída 24V. Capacidade de corrente de saída 10A
Placa de aquisição de dados	DAQ - USB 6001	National Instruments	Converte sinais analógicos em digitais
Compressor	OL 102	Asten	0,75 CV; 220v; 60Hz. Utilizado para atomizar a solução dentro do leito após sua mistura.
Bomba de alimentação	Mini K-S10B	Kamoer	Bomba dosadora peristáltica. Tensão de entrada 24V.

Fonte: da autora, 2021.

O processo ocorreu da seguinte forma, com o acionamento do soprador, o ar soprado passava pela placa de orifício através de uma tubulação de ferro fundido. Próximo à placa de orifício existem duas saídas de ar, uma de cada lado da placa e, nesses pontos, se realizava a leitura da queda de pressão da placa através dos transdutores de pressão.

O ar seguia pela tubulação e encontrava o sistema de aquecimento da unidade, uma resistência de 4000 W aletada para ar. O ar aquecido escoava pela tubulação, passando pelo termopar tipo K, o qual transmitia a leitura de temperatura para o controlador (ele age sobre a resistência, para que a temperatura do ar esteja em torno do *set point* pré-estabelecido).

Figura 26 - Unidade experimental e seus principais componentes. Legenda: (1) Soprador de ar de secagem; (2) Compressor de ar de atomização; (3) Placa de orifício e medidor de vazão; (4) Sistema de aquecimento por resistência aletada; (5) Válvula gaveta para controle da vazão de ar de secagem; (6) Entrada do ar de atomização; (7) Entrada de alimentação da solução; (8) Bomba Peristáltica; (9) Béquer com a solução de fertilizante; (10) Medidor de queda de pressão do leito; (11) Leito de jorro; (12) Ciclone; (13) Ponto de coleta do produto (underflow do ciclone); (14) Sistema de aquisição de dados; (15) Computador.



Fonte: da autora, 2021.

Em seguida o ar aquecido atravessava o orifício de entrada do leito de jorro. Neste ponto estava localizado outro transdutor diferencial de pressão. Dentro do leito cônico-cilíndrico o ar

interagiu com as partículas inertes, fazendo a movimento típico da fluidodinâmica do sistema de leito de jorro. Ao longo do leito existem três pontos de medidas de temperaturas,  $T_0$ ,  $T_1$  e  $T_2$ , realizadas por termopares.

Sobre esse sistema a solução de fertilizante era pulverizada pelo bico atomizador de duplo fluido. O bico possuía duas entradas, em uma era conectada a bomba peristáltica, e na outra estava conectada a mangueira do compressor de ar que trabalhava à 1 bar.

O fertilizante secado pelo do leito passa pela tubulação de exaustão e era elutriado para o ciclone, onde ocorria a separação solido-fluido. No *overflow* do ciclone existia outro ponto de medição de temperatura por termopar. O produto final era coletado no *underflow* do ciclone.

### 4.3 INSTRUMENTAÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL

#### 4.3.1 Controle de temperatura

O sistema de medida de temperatura da unidade experimental era composto por um controlador Inova, o qual analisava o ar provindo da resistência por meio de um termopar tipo K inserido na tubulação. Este controlador operava sob determinados parâmetros de programação de processo, detalhados na tabela 31, no apêndice. Devido à perda térmica da tubulação para se trabalhar na temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ , desejada do centro do leito, o *set point* de operação do ar que deixa a resistência foi colocado à  $120^{\circ}\text{C}$ .

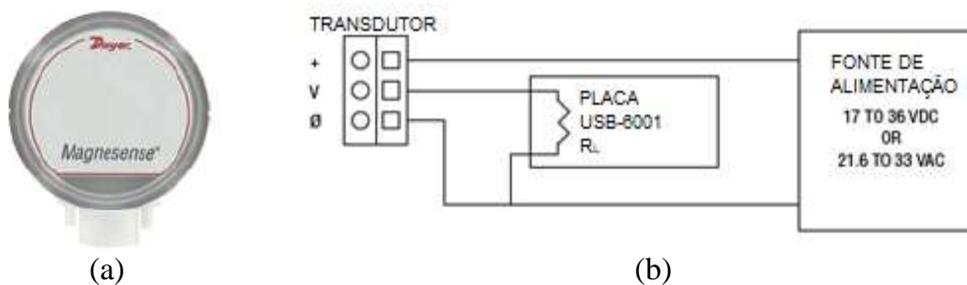
A leitura dos demais termopares empregados no sistema durante a operação de secagem foi realizada por meio do multímetro Minipa ET-1400, sendo que foi necessário furar o leito em três alturas diferentes para a inserção dos sensores (base, centro e topo). Os dados foram coletados e registrados manualmente.

#### 4.3.2 Transdutores de pressão

A implementação de um sistema de aquisição online de dados foi realizada por meio da instalação de transdutores de pressão na unidade experimental. Esses equipamentos enviam sinais analógicos para a placa de aquisição de dados, criando uma interface entre o processo e o *hardware*, na qual esse sinal é convertido para digital e encaminhados para um computador com o *software* instalado, Labview 2021 (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Assim, era possível se realizar o tratamento de dados e registrar informações do sistema (BARROS, 2018).

Foram instalados dois transdutores de pressão diferencial MS Magnesense<sup>®</sup> da marca Dwyer, figura 27 (a), um para se medir a vazão de alimentação do ar (transdutor 1) e outro para a queda de pressão do leito (transdutor 2). Para isso, montou-se o circuito entre a fonte de alimentação de 24V, os transdutores e a placa de aquisição de dados USB 6001 da National Instruments, conforme a figura 27 (b). As conexões feitas com o transmissor foram por meio de um bloco de terminais de três circuitos, duas conexões com a alimentação, nos seus sinais correspondentes (+) e (-), e uma conexão com a placa de aquisição de dados.

Figura 27 - (a) Transdutor de pressão Dwyer; (b) circuito

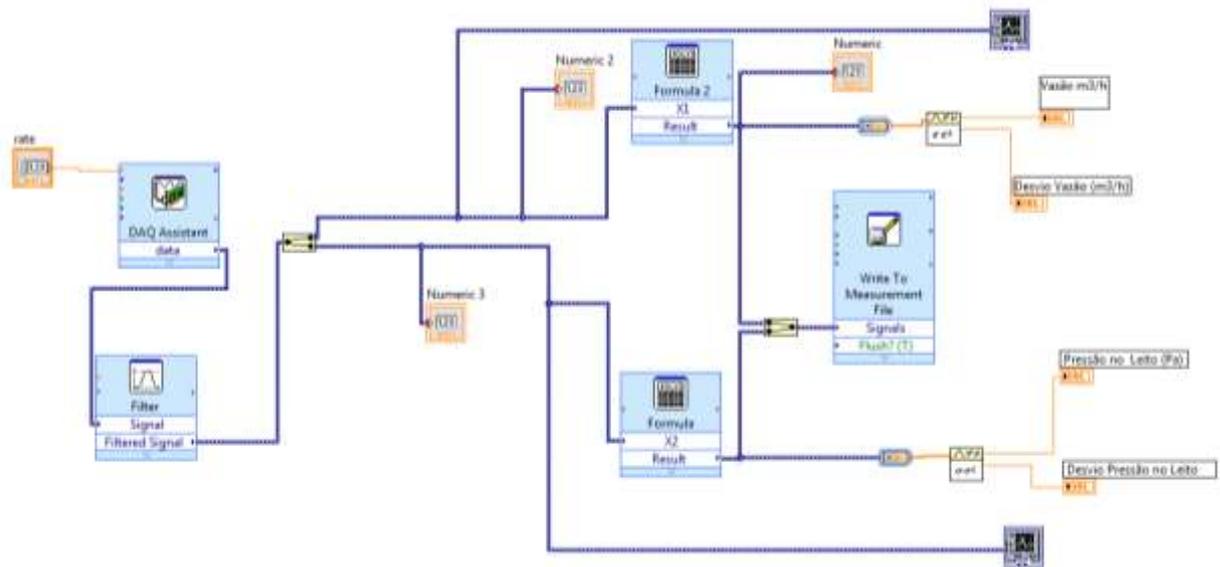


Fonte: Adaptado DWYER, 2021.

Para se realizar a leitura do sistema placa-transdutores foi construída uma VI (Virtual Instrument) usando o software LabView. A janela de diagrama de blocos, figura 28, contém as estruturas responsáveis por essa interpretação, como a porta de entrada de dados DAQ Assistant, seu filtro de sinais, as ferramentas de fórmulas (onde posteriormente foram inseridas as equações que transformam os sinais captados pelos transdutores em valores de vazão e pressão), os gráficos referentes à cada equação e o sistema de salvamento de dados, o qual salva automaticamente 2.000 dados por segundo para cada leitura feita pelo sistema.

Ao se conectar a placa com o *software* LabView, observou-se pelo Front Painel, figura 29 (a), um ruído de sinal elétrico na leitura. Pelo manual do transdutor Dwyer (2021), tem-se a informação de que as perdas resistivas na fiação causam erros na tensão fornecida à resistência da placa ( $R_L$ ). Para uma medida de 1% de precisão, aplicou-se a recomendação de manter a resistência em 0,1% do valor de  $R_L$ . Isso mantém o erro causado pelo fluxo de corrente abaixo de 0,1%. Logo, foram adicionadas duas resistências de 460 ohm em paralelo, o que resulta em um valor de 230 ohm de resistência em cada sensor, figura 29(b). Desta forma, se eliminou uma quantidade significativa de interferência nas medições. Na figura 29(c) pode-se visualizar como esse sistema de instrumentação ficou depois de pronto.

Figura 28 - VI feita no Labview.



Fonte: da autora, 2021.

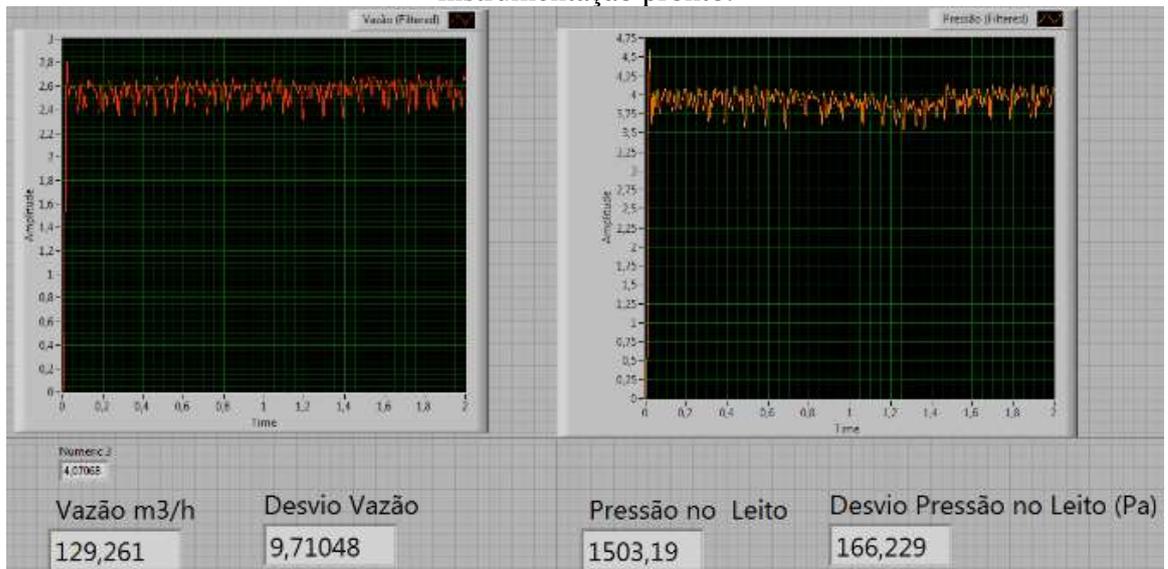
Para a calibração do transdutor 1 (leitura da vazão de ar de alimentação), foi utilizado o manômetro de tubo em U da unidade original. A medição da queda de pressão foi realizada na placa, pelo tubo em U, e o registro da voltagem do transdutor de pressão, em diferentes vazões, gerando uma curva de  $\Delta P$  em função de Voltagem. A equação polinomial de 2ª ordem desta curva foi inserida na ferramenta fórmula da VI.

A partir deste ponto se registrou os valores obtidos para a vazão no anemômetro e a queda de pressão captada pelo transdutor 1. Estes dados foram levados ao item de regressão não linear do programa Statística® junto com a equação 27, que relaciona a vazão de ar lida com a queda de pressão observada.

$$Q = K \cdot \Delta P^n \quad (27)$$

em que K e n são constantes. A equação gerada foi inserida na VI, transformando o sinal de voltagem em uma medida de vazão. Para o transdutor 2 (queda de pressão) o mesmo procedimento de construção da curva queda de pressão em função da vazão de ar foi seguido. Obtendo, então, um valor de pressão por meio do sinal de voltagem captado pelo instrumento de medida.

Figura 29 – (a) *Front Panel* da VI; (b) transdutor com as resistências; (c) sistema de instrumentação pronto.



(b)



(c)

Fonte: da autora, 2021.

#### 4.4 ESTUDO EXPERIMENTAL DA FLUIDODINÂMICA DO LEITO DE JORRO

Na literatura existem diversas correlações para prever os valores operacionais do leito de jorro, na tabela 4 estão descritas algumas destas correlações.

Através destas equações é possível realizar estudos a fim de prever o que as modificações nos valores das variáveis operacionais irão interferir no leito, como por exemplo, a mudança da carga de inertes pode interferir nas características do jorro, como a queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro mínimo e velocidade de jorro mínimo. Essas correlações empíricas empregam o número de Arquimedes ( $Ar$ ) e/ou número de Reynolds de

jorro mínimo como base de cálculo. Essas equações normalmente englobam a interferência dos fatores geométricos e propriedades das partículas inertes, fluido de secagem e condições operacionais do sistema (ALMEIDA, 2018).

Tabela 4 - Correlações empíricas no jorro mínimo e queda máxima de pressão no leito.

Referências	Correlações	Condições de contorno
Muklenov e Gorshtein (1965)	$(Re)_{jm} = 3,32 Ar^{0,33} \left(\frac{H_0}{D_0}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{0,55}$ (28)	$D_0=10,3-12,9$ mm; $H_0=3-15$ cm;
	$\frac{-\Delta P_{jm}}{H_0 \rho_p g} = 7,68 \left[\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]^{-0,2} (Re)_{jm}^{-0,2} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{-0,33}$ (29)	$\gamma=12-60^\circ$ ; $d_p=0,5-2,50$ mm; $\rho_p=1000-2360$ kg/m <sup>3</sup> ; $D_c=5$ cm.
Tsvik et al. (1967)	$(Re)_{jm} = 0,4 Ar^{0,52} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{1,24} \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{0,42}$ (30)	$D_0=2-4$ cm; $H_0=10-50$ cm; $H_0/D_0 = 1,6-8,7$ ; $\gamma=20-50^\circ$ ; $d_p=1,5-4,0$ mm; $\rho_p=1650-1700$ kg/m <sup>3</sup> .
Olazar et al. (1993)	$\frac{-\Delta P_{m\acute{a}x}}{H_0 \rho_p (1-\epsilon_0) g} = 1,2 \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{-0,11} (Re)_{jm}^{-0,06} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0,08}$ (31)	$D_0=3-6$ cm; $H_0=3,6-6,1$ cm;
	$\frac{-\Delta P_{jm}}{-\Delta P_{m\acute{a}x}} = 1 + 0,116 \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0,50} \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{-0,8} Ar^{0,0125}$ (32)	$\gamma=28-45^\circ$ ; $d_p=1-2,5$ mm; $\rho_p=240-3520$ kg/m <sup>3</sup> .
Pallai e Nemeth (1969)	$-\Delta P_{m\acute{a}x} = H_0 (\rho_p - \rho) (1-\epsilon) g$ (33)	$D_c = 10$ a $30$ cm.
	$\frac{-\Delta P_{jm}}{-\Delta P_{m\acute{a}x}} = 0,8 - 0,01 \frac{D_c}{D_0}$ (34)	
Sampaio (1978)	$-\Delta P_{jm} = \frac{2}{3} \rho_p g H_0$ (35)	$D_0=15$ cm; $H_0=3-15$ cm; $\gamma=60^\circ$ ; $d_p=4-6$ mm; $\rho_p=1100-1190$ kg/m <sup>3</sup> .
Saldarriaga et al. (2017)	$\frac{-\Delta P_{m\acute{a}x}}{H_0 \rho_p (1-\epsilon_0) g} = 1,20 \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{-0,11} (Re)_{jm}^{-0,06} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0,3}$ (36)	$0,83 < H_0/D_0 < 50$ ; $0,25 < \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right) < 0,41$ $50 < (Re)_{jm} < 4900$ .
Adimensional de Reynolds	$(Re)_{jm} = \frac{q_{jm} \rho d_p}{\mu}$ (37)	
Número de Arquimedes	$Ar = \frac{\rho d_p^3 (\rho_p - \rho)}{\mu^2}$ (38)	

Fonte: Almeida, 2018.

Com o intuito de se estudar o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro disponível, foram calculadas, através das correlações citadas da literatura, as medidas das principais variáveis operacionais do leito, como a queda de pressão máxima ( $\Delta P_{Max}$ ), a queda

de pressão de jorro mínimo ( $\Delta P_{mj}$ ) e a velocidade de jorro mínimo ( $U_{mj}$ ). Em seguida a fluidodinâmica do leito foi analisada experimentalmente através de curvas características de queda de pressão em função da vazão de ar para diferentes cargas de sólidos inertes. As massas de inerte testadas nesses experimentos foram de 0,2 kg, 0,3 kg, 0,4 kg, 0,5 kg, 1,0 kg e 1,5 kg. As curvas foram plotadas no programa Origin®, para análises gráficas das variáveis operacionais do leito estudadas.

#### 4.5 EXPERIMENTOS DE SECAGEM DO FERTILIZANTE FOLIAR NO LEITO DE JORRO

##### 4.5.1 Preparo da amostra

Antes de ser realizado o experimento de secagem, era necessário solubilizar o fertilizante foliar da seguinte forma. De início, se pesava em uma balança analítica a quantidade 2 gramas. Então, com o auxílio de uma proveta eram adicionados 100 mL de água destilada um béquer. O béquer era levado à um agitador magnético a 1000 rpm, onde era adicionado o fertilizante em pó. A solução era agitada até se tornar homogênea.

##### 4.5.2 Condições operacionais

Os experimentos realizados com a unidade já existente possuíram o intuito de se avaliar a possibilidade de uso atual e futuras adaptações, verificando se as geometrias do leito de jorro e do ciclone eram adequadas ao processo de secagem. Na figura 30 (a) tem-se um desenho representativo dos principais elementos do sistema de leito de jorro, assim como a discriminação das variáveis do processo.

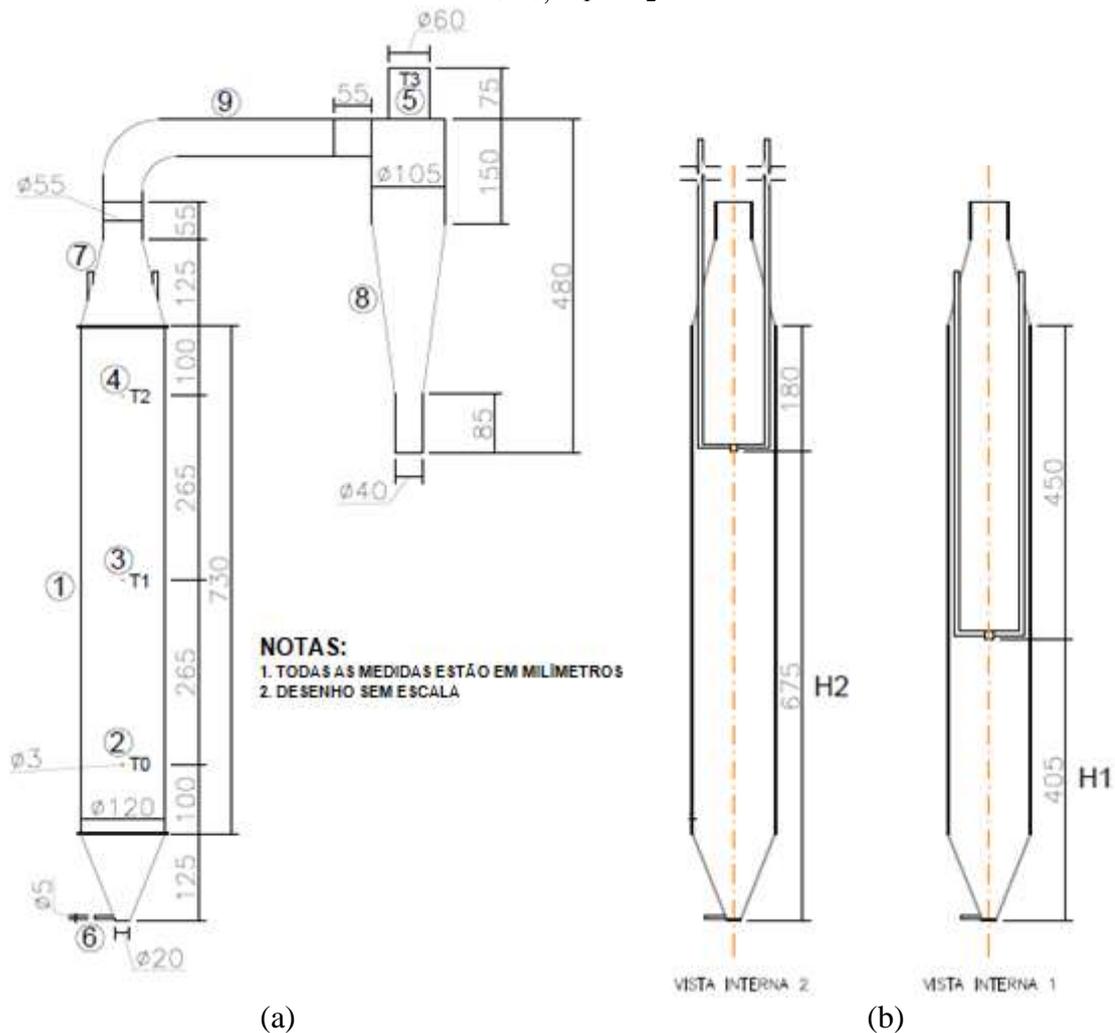
Para se definir as faixas de operação da unidade experimental foram necessários realizar testes preliminares, como análise da vazão da bomba e pressão do bico atomizador.

A definição da temperatura foi realizada a partir do sensoramento das temperaturas no leito, captando os valores nos pontos  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  (descritos na figura 30 (a)). O ponto de maior interesse foi o centro do leito,  $T_1$ , pois é a região onde existe a maior interação de fluido-partícula do sistema de secagem. Nesta posição, a temperatura inicial devia ser em torno de 100°C. Segundo Alberto (2017), o valor para a secagem desta solução deve ser no mínimo 100°C, devido ao calor necessário para evaporar a água, solvente desta solução. Com a operação

nesse nível de temperatura ainda é possível retirar água presente nos compostos cristalinos, modificando a morfologia do produto para amorfo, com a finalidade de aumentar sua solubilidade (SYAMAL, 2008). Porém, como o material inerte utilizado se deforma com o calor, temperaturas acima de 110°C não deviam ser empregadas dentro do leito.

Figura 30 – (a) Sistema de secagem. Legenda: (1) Leito de jorro; (2;3;4;5) Termopares tipo K; (6) Medidor de pressão do leito; (7) Alimentação da solução; (8) Ciclone (Lapple); (9) tubo de exaustão do leito para o ciclone.

(b) Vista interna do leito de jorro com o atomizador nas duas alturas empregadas durante os testes,  $H_1$  e  $H_2$ .



Fonte: da autora, 2021.

Entre as diferentes cargas de inertes testadas, foi analisada qual curva característica apresentava uma estabilidade maior para fluidodinâmica do jorro e, então, a massa pertencente à curva mais estável foi a escolhida. A vazão de alimentação de ar também foi eleita a partir da análise da curva característica, sendo que, uma vez registrado o valor de velocidade mínima de jorro, foi definido que o leito operaria em uma intensidade de 1,2 dessa medida.

Testes preliminares mostraram que o leito apresentava uma alta umidade relativa em seu interior quando era operado em alimentação de solução continuamente. Como visto por Dantas (2018) a intermitência na alimentação da solução é uma alternativa para esses casos, pois proporciona uma melhor fluidodinâmica para o sistema, diminuindo a umidade e aglomeração de partículas e, por consequência, melhorando a secagem.

Com a unidade experimental preparada e o sistema de aquisição de dados montado, o processo se iniciava com o acionamento do soprador. A seguir, regulava-se a vazão de alimentação de ar por meio de uma válvula gaveta. Depois, era ligada a resistência para que o ar aquecesse até a temperatura desejada, esse processo levava em média 50 min. Com o ar de secagem na temperatura de operação, o compressor (fornecimento do ar de atomização) era ligado e a pressão do atomizador acompanhada até a estabilização em 1 bar. Tendo o auxílio de um aplicativo chamado Interval Timer®, os tempos da intermitência eram registrados e um alarme era acionado a cada ciclo. Assim, com o sistema preparado, a alimentação da solução era iniciada. Logo em seguida, de acordo com o tempo de intermitência definido, era interrompida e depois retomada, sendo que esse ciclo se repetiu até que todo o volume de solução fosse utilizado. Os registros da instrumentação via Labview eram acompanhados a cada alimentação e intermitência, realizando uma ou duas leituras por etapa, em cada ciclo.

#### **4.5.3 Planejamento experimental**

O planejamento teve o intuito de estudar os efeitos de três variáveis do processo: o tempo de alimentação da solução ( $t_{al}$ ), o tempo de intermitência entre as alimentações ( $t_{int}$ ) e a altura do atomizador ( $H_a$ ) apresentadas na figura 30 (b), sobre as repostas: perfil de temperatura (sensoriamento por meio de termopares), vazão de ar e queda de pressão ao longo do teste (leituras por meio do sistema de instrumentação), rendimento e produtividade de pó.

Os ensaios experimentais foram delineados conforme um planejamento fatorial  $2^3$ , com três fatores e dois níveis cada. O nível mais baixo foi codificado como -1 (10 s de alimentação, 60 s de intermitência e 0,40 m de altura do atomizador com a base do leito) e o nível mais alto foi codificado como +1 (30 s de alimentação, 300 s de intermitência e 0,68 m de altura do atomizador com a base do leito). A tabela 4 traz a matriz desse delineamento experimental completa, que mostra os valores codificados e não codificados de cada fator. O ponto experimental que obteve melhor rendimento foi executado em duplicata e também é mostrado na tabela 5.

Tabela 5 - Planejamento experimental para os ensaios realizados.

Experimentos	$t_{al}$ [s] ( $x_1$ )	$t_{int}$ [s] ( $x_2$ )	$H_a$ [m] ( $x_3$ )
Teste 1	10 (-1)	60 (-1)	0,40 (-1)
Teste 2	30 (+1)	60 (-1)	0,40 (-1)
Teste 3	10 (-1)	300 (+1)	0,40 (-1)
Teste 4	30 (+1)	300 (+1)	0,40 (-1)
Teste 5	10 (-1)	60 (-1)	0,68 (+1)
Teste 6	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)
Teste 7	10 (-1)	300 (+1)	0,68 (+1)
Teste 8	30 (+1)	300 (+1)	0,68 (+1)
Teste 9*	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)

Fonte: da autora, 2021. \* Replicata do experimento 6.

Alguns autores como Tacon e Freitas (2007) e (2011) empregaram o planejamento fatorial em 2 níveis com 3 variáveis em leito de jorro em seus estudos e, em ambos os artigos eles obtiveram respostas conclusivas sobre as investigações propostas. O planejamento fatorial proporcionou a determinação das condições ótimas para medir o tempo médio de residência da solução dentro do leito, indicando que algumas condições operacionais podem afetar esse tempo e sua distribuição (TACON, FREITAS, 2011). Borini, Andrade e Freitas (2009) também empregaram planejamento experimental  $2^3$  com triplicatas no ponto central. Eles estudaram a pressão de ar de atomização, vazão de atomização e altura do bico de atomização.

Uma forma de determinar o rendimento e produtividade foi a realização de um balanço de massa no processo, determinando a massa seca retida em cada região do processo. Inicialmente, após o término de cada experimento, era coletada a massa de fertilizante recuperado no *underflow*, e, então, esta era pesada e levada a estufa para determinação da umidade do material seco. Assim, como a relação entre massa de fertilizante (em base seca), na alimentação do leito de jorro e no *underflow* do ciclone, era calculado o rendimento do processo.

Uma vez quantificado o rendimento, visando a identificar onde estavam ocorrendo as perdas que diminuía seu valor, foi analisada e quantificada a massa de fertilizante em cinco regiões do sistema de secagem: nas paredes do leito, na tubulação de saída entre o leito e o ciclone, nas paredes do ciclone, no filtro de manga localizado no *overflow* do ciclone e nas partículas inertes. Em cada ponto descrito foi necessário a lavagem com água para realizar a retirada completa do fertilizante incrustado. Como algumas regiões eram maiores, demandavam uma quantidade considerável de água para se captar o fertilizante, aproximadamente 1 L. As

soluções foram levadas à 105°C na estufa por 72h, garantindo que toda a umidade deixou as amostras.

Foi notado que uma quantidade de fertilizante não foi coletada nas frações mássicas estudadas, desta forma um balanço de massa foi realizado para se quantificar a perda no processo ( $m_S$ ), segundo a equação (39), em que  $m_{tf}$  é a massa total do fertilizante usado na solução de alimentação.

$$m_S = m_{tf} - m_{leito} - m_{tubulação} - m_{ciclone} - m_{filtro} - m_{partículas} - m_{recuperada} \quad (39)$$

A fração mássica retida em cada região foi calculada pela equação 40, em que  $m_{região}$  é a massa retida em cada região.

$$X_{região} = \frac{m_{região}}{m_{tf}} \quad (40)$$

O cálculo do rendimento  $\eta$  foi realizado pela equação 41, em que  $m_{recuperado}$  é a massa de fertilizante recuperado no *underflow* depois de seco.

$$\eta = \frac{m_{recuperado}}{m_{tf}} \quad (41)$$

A produtividade  $P$  foi calculada por meio da equação 42, em que  $t$  é o tempo total do experimento.

$$P = \frac{\eta}{t} \quad (42)$$

A análise de variância dos dados obtidos usando o módulo Experimental Design (DOE) do software *Statística*®. Este módulo além de fornecer a tabela ANOVA gera também uma superfície de resposta entre as variáveis analisadas, facilitando a compreensão dos resultados.

Para se levantar mais dados sobre produto final, foram aplicadas análises de caracterização do pó, como distribuição granulométrica, pH da solução e DRX.

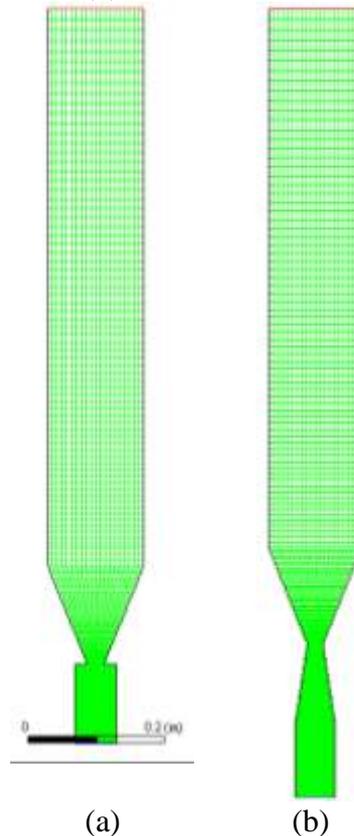
## 4.6 IDENTIFICAÇÃO DOS GARGALOS DO PROCESSO E SUGESTÕES DE MELHORIA NA UNIDADE EXPERIMENTAL

### 4.6.1 Simulação de Fluidodinâmica Computacional (CFD) do leito de jorro

Foram realizadas simulações computacionais, utilizando fluidodinâmica computacional (CFD), para avaliar a estabilidade do leito de jorro disponível e propor novas possíveis geometria de leito, adequadas ao processo. Para avaliar a configuração original (CO), e verificar os motivos da instabilidade do leito de jorro, uma malha computacional bidimensional com a

mesma geometria do equipamento foi criada, através do *software* Gambit®. A figura 31 (a) apresenta a malha do leito original, formada por 7400 elementos quadriláteros, em que se observa parte da tubulação que alimenta o leito, acoplado por meio de um flange.

Figura 31 - Malha desenhada para as simulações fluidodinâmicas: (a) CO com 7400 elementos; (b) CA com 10851 elementos.



Fonte: da autora, 2021.

A fim de eliminar a instabilidade do leito de jorro, foi proposta a adição de um novo trecho de tubulação, em forma de tronco de cone, que parte da dimensão da tubulação de alimentação, até a o diâmetro de entrada do leito de jorro. Essa será denominada configuração alternativa (CA). A malha da CA foi composta de cerca de 10851 elementos quadriláteros, como na figura 31 (b).

As simulações da dinâmica das partículas no leito de jorro foram realizadas no programa Fluent®, sendo que foi inserida a malha de discretização, bem como as condições de contorno referentes ao sistema. Foi utilizada abordagem Euler-Euler, de acordo com o TFM - *Two Fluid Model* (Modelo de Dois Fluidos).

O sistema de EDPs, composto pelas equações da continuidade e de transferência de quantidade de movimento para as fases fluida e granular, foi resolvido utilizando o Método de

Volumes Finitos. O Algoritmo SIMPLE foi empregado para estabelecer o acoplamento velocidade-pressão. As equações constitutivas descritas na Tabela foram utilizadas (Eq. 2 a 18). Foram simulados 5s de tempo real, observando uma tolerância de convergência de  $1. 10^{-3}$  (SANTOS, 2008).

Na tabela 6 são apresentadas as condições de contorno para simulações fluidodinâmicas de leito de jorro com abordagem Euler-Euler.

Tabela 6 – Condições de contorno das simulações.

Na entrada do leito	A injeção de ar na direção axial (eixo x); a velocidade de sólidos na entrada é nula.
Na saída do leito	Os gradientes axiais de velocidades para as duas fases são nulos e a pressão é atmosférica.
Simetria	No eixo de jorro (eixo x), os gradientes radiais de velocidade para as duas fases (eixos y e z) e para a temperatura granular são nulos.
Paredes	Na parede admite-se uma condição de não escorregamento, destacando a importância do refino próximo à parede.
Partículas	Porosidade inicial do leito de 0,39 Altura do leito estático de 0,225 m.

Fonte: Santos, 2008.

#### 4.6.2 Propostas de melhorias para a unidade experimental

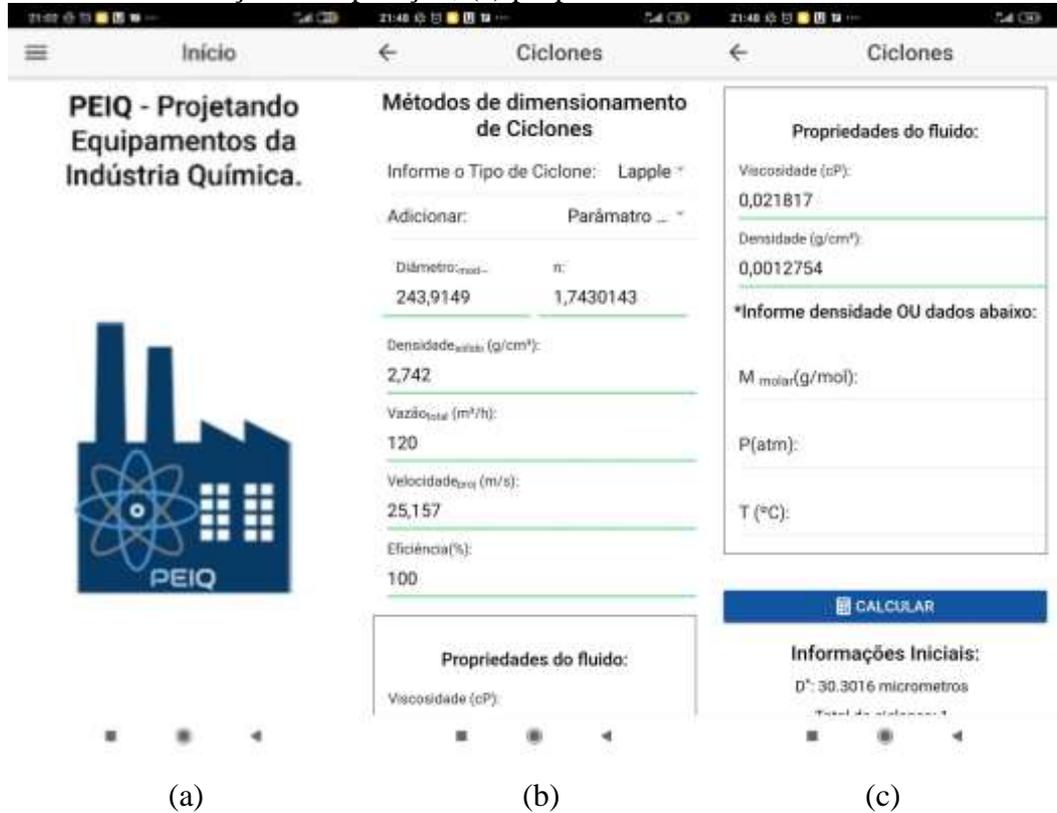
Ao longo do estudo foram identificados inúmeros gargalos durante o processo de secagem. A unidade experimental atual necessita de modificações estruturais da unidade experimental, tanto para o leito de jorro, quanto para os outros equipamentos que compõe na unidade.

As análises fluidodinâmicas computacionais realizadas revelaram que a geometria do próprio leito contribui para um movimento tendencioso das partículas, o que afeta o rendimento de secagem do leito.

Os resultados referentes à distribuição granulométrica das partículas recolhidas no *underflow* e coletadas no filtro apontaram que o ciclone deve ser redimensionado para que as perdas sejam minimizadas. O aplicativo para Android chamado PEIQ – Projetando Equipamentos da Indústria Química, projetado pela engenheira Giselle M. Lima, foi empregado para realizar o cálculo do novo ciclone. Este software é capaz de dimensionar o equipamento a partir da alimentação de dados como a distribuição granulométrica das partículas, propriedades

do fluido, vazão do ar e velocidade projetada. Na figura 32 pode-se visualizar a interface do programa, assim como os dados inseridos para calcular o novo ciclone.

Figura 32 - Interface do app PEIQ: (a) página inicial; (b) dados sobre as partículas a serem coletadas e condições de operação; (c) propriedades do fluido de trabalho.



Fonte: da autora, 2021.

A vazão de alimentação de solução no leito foi um dos obstáculos da unidade, pois ela se mostrou limitante em testes preliminares ao se trabalhar com uma massa menor de inertes, indicando que seria melhor administrar uma menor vazão, principalmente em experimentos contínuos.

A temperatura do sistema é outra condição operacional a ser analisada, enquanto algumas regiões sofrem com a perda de temperatura, como mostrados nos dados de temperatura de saída do ciclone, outras regiões sofrem com o aumento de temperatura sem a presença de um aquecedor acoplado, como é o caso do soprador, o qual chega a 70°C consumindo somente sua energia de trabalho.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão serão apresentados os resultados esperados para as etapas descritas nos materiais e métodos.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO FERTILIZANTE

Para se obter mais informações a respeito do fertilizante a densidade aparente do pó *in natura* foi calculada seguindo o método picnométrico, sendo empregado óleo de soja como fluido, o valor médio obtido foi de 2,7342 g/mL com desvio de 0,0219.

#### 5.1.1 Distribuição Granulométrica

A análise granulométrica do fertilizante *in natura* foi realizada pelo método de peneiramento, descrito no item 4.9.1. A tabela 7 apresenta os resultados da distribuição obtida.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica do fertilizante *In Natura*

Mesh da peneira	Abertura da malha [mm]	di (mm)	Quantidade de particulados	Fração Retida	Fração Passante X
35	0,500	0,5	0	0	1
40	0,420	0,460	0,0011	0,001	0,999
45	0,354	0,387	0,0035	0,002	0,998
50	0,297	0,326	0,0024	0,001	0,996
100	0,149	0,223	0,1467	0,079	0,917
270	0,053	0,101	1,5470	0,837	0,080
Fundo	0	0,027	0,1480	0,080	0,000

Fonte: da autora, 2021.

A tabela 8 apresenta a equação de três modelos de distribuição, como pode ser observado o melhor  $R^2$  obtido foi com o modelo Log Normal. A partir dele pode-se concluir que o valor para o  $D_{50}$  de 0,1505 mm, indicando que 50% das partículas são menores que este diâmetro.

A tabela 9 apresenta a distribuição granulométrica para o fertilizante granulado no leito de jorro. Nesta distribuição estão os dados encontrados pelo método de peneiramento previamente descrito. Foi adicionado à essa distribuição os valores coletados no filtro do *overflow* do ciclone, o qual é fabricado com uma tela de 200 mesh. Esta modificação teve o

intuito de se analisar as características granulométricas do pó produzido, inclusive a parte do produto que estava sendo perdida pelo ciclone.

Tabela 8 - Modelos de distribuição granulométrica para o Fertilizante *in natura*

Modelo	Equação do modelo	R <sup>2</sup>
RRB	$X = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{D}{0,1803} \right)^{4,286} \right]$	0,999983
Sigmóide	$X = \frac{1}{1 + \left( \frac{0,1505}{D} \right)^{6,133}}$	0,999979
Log Normal	$y = 0,5 + 0,5 * \operatorname{erf} \left[ \frac{\ln \left( \frac{d}{0,1505} \right)}{\sqrt{2} * \ln(1,328)} \right]$	0,999996

Fonte: da autora, 2021.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica do fertilizante granulado seco.

Mesh da peneira	Abertura da malha [mm]	Quantidade de particulados	Fração Retida	di (mm)	Fração Passante X
35	0,500	0	0,00	0,5	1
40	0,420	0,0011	0,00145	0,460	0,999
45	0,354	0,0639	0,08436	0,387	0,914
50	0,297	0,0631	0,08330	0,326	0,831
100	0,149	0,2795	0,36898	0,223	0,462
200*	0,074	0,1100	0,14521	0,112	0,317
270	0,053	0,1605	0,21188	0,064	0,105
Fundo	0	0,0794	0,10482	0,027	0,000

Fonte: da autora, 2021. \*malha do filtro localizado no *Overflow* do ciclone.

Na tabela 10 são apresentados os modelos de distribuição granulométrica para o fertilizante após o processo de secagem.

Tabela 10 - Modelos de distribuição granulométrica para o Fertilizante granulado seco.

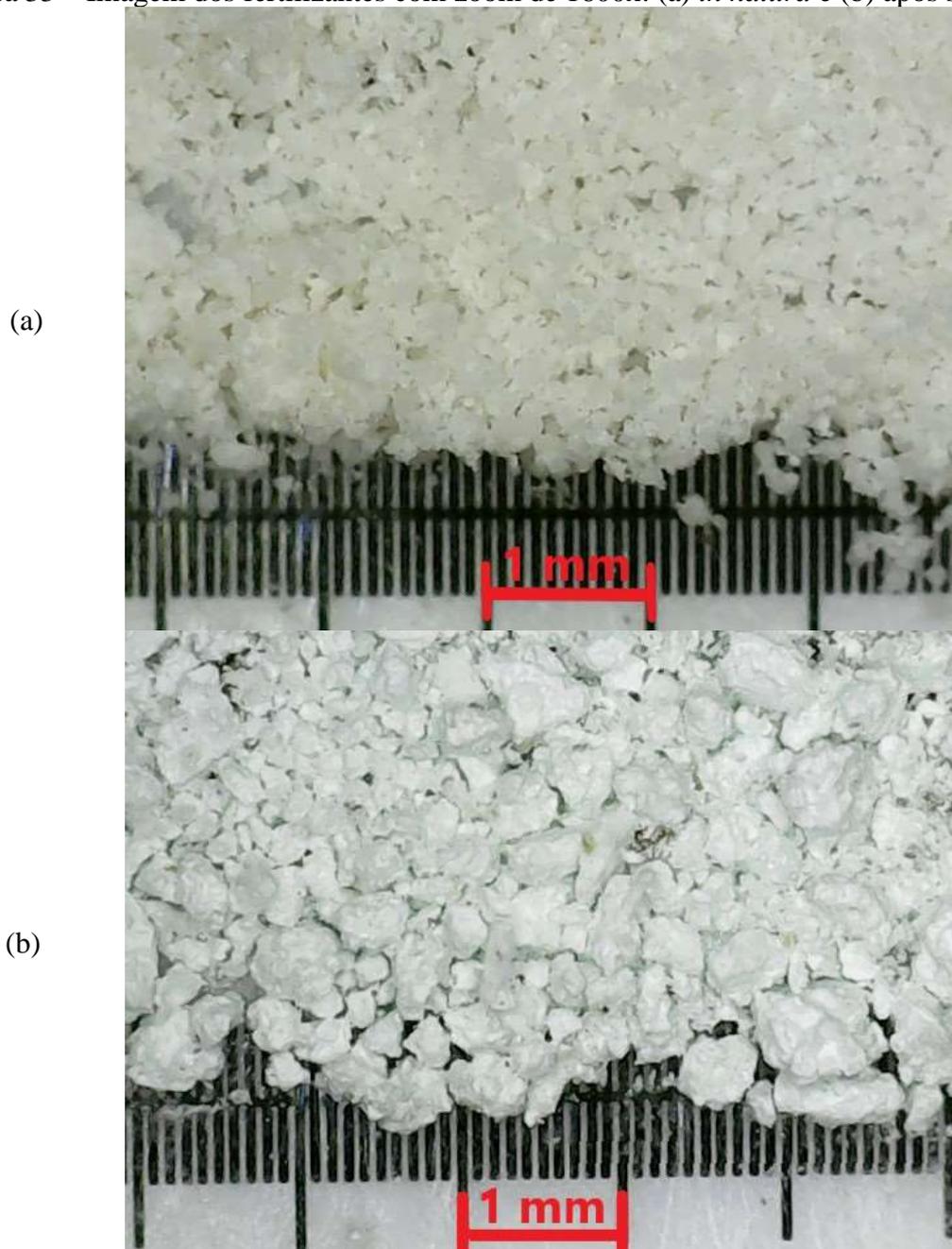
Modelo	Equação do modelo	R <sup>2</sup>
RRB	$X = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{D}{0,24} \right)^{1,74} \right]$	0,978
Sigmóide	$X = \frac{1}{1 + \left( \frac{0,18}{D} \right)^{2,48}}$	0,938
Log Normal	$y = 0,5 + 0,5 * \operatorname{erf} \left[ \frac{\ln \left( \frac{d}{0,18} \right)}{\sqrt{2} * \ln(1,97)} \right]$	0,943

Fonte: da autora, 2021.

Após a secagem, o melhor  $R^2$  se encontra no modelo RRB, sendo que o valor de  $n$  é maior do que 1, indicando que esta equação é válida para esta análise granulométrica. O parâmetro  $D'$  corresponde ao diâmetro médio das partículas tal que 63,2% da massa da amostra corresponde a partículas que  $k$ , ou seja, menor que 0,24 mm.

A figura 33 apresenta as imagens dos dois pós de fertilizante, *in natura* e após a secagem, com uma ampliação de 1600x, é possível se observar o aumento do tamanho das partículas, assim como o seu formato.

Figura 33 – Imagem dos fertilizantes com zoom de 1600x: (a) *in natura* e (b) após secagem.



Fonte: da autora, 2021.

O diâmetro médio de Sauter para os dois fertilizantes é apresentado na tabela 11. Nota-se que o diâmetro médio das partículas aumentou após o processo de secagem.

Tabela 11 – Diâmetro médio de Sauter

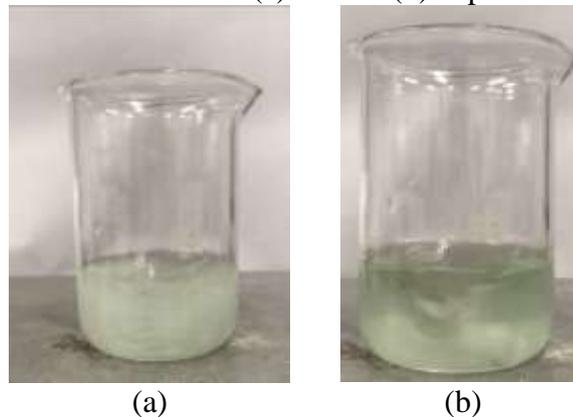
Fertilizante	D Sauter [mm]
<i>In natura</i>	0,086
Após secagem	0,093

Fonte: da autora, 2021.

### 5.1.2 Solubilidade

O teste de solubilidade foi realizado antes e depois do fertilizante passar pelo o processo de secagem. O tempo de solubilidade do fertilizante foi medido através da análise da coloração da solução durante sua solubilização em água, sob agitação. A princípio a solução se encontra turva, como pode ser visto na figura 34 (a), com o passar do tempo foi possível notar a formação do vórtice, pois a solução se tornou translúcida, o que permitiu a identificação do tempo de solubilização, na figura 34 (b).

Figura 34 - Fertilizante foliar (a) antes e (b) depois de solubilizado.



(a)

(b)

Fonte: da autora, 2021.

O tempo de solubilidade para os fertilizantes é apresentado na tabela 12. O fertilizante *in natura* apresentou um tempo de solubilização de 61 segundos, sendo que este valor caiu para 19 segundos depois do processo de secagem com leito de jorro e partículas inertes.

Tabela 12 – Tempo de solubilidade.

Fertilizante	Tempo [s]
<i>In natura</i>	61
Após secagem	19

Fonte: da autora, 2021.

Essa redução no tempo aponta para uma melhora de 69% na solubilidade do fertilizante foliar. Alberto (2017) realizou a secagem do mesmo fertilizante *in natura* empregado neste estudo, o método utilizado foi através do equipamento de *spray dryer*. A autora encontrou uma

solubilidade do produto após o tratamento de *spray dryer*, entre 11 e 31 segundos, faixa que coincide com a encontrada no produto final do leito de jorro.

### 5.1.3 pH

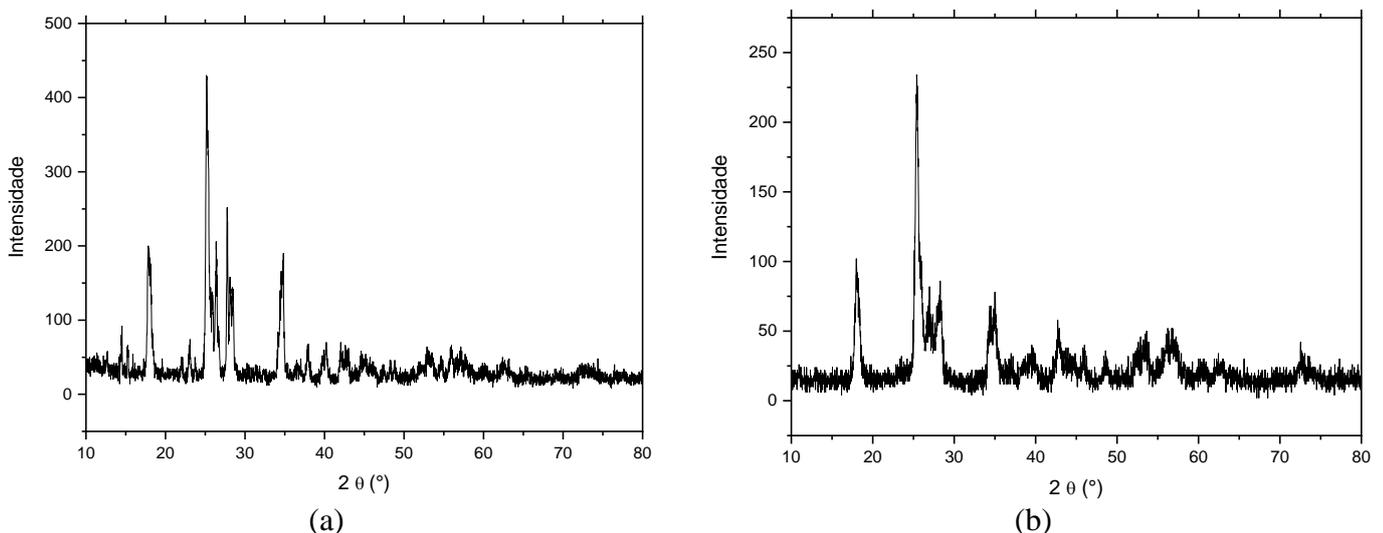
O potencial hidrogeniônico mede o grau de acidez da solução, a análise foi realizada a 25°C, e o valor para a solução com o fertilizante *in natura* foi de 3,14. Já para o fertilizante após a secagem o pH foi de 4,16, valor que está de acordo com a IN nº 61 do MAPA (2020), na qual diz que o pH de macronutrientes e micronutrientes com aplicação via foliar tem um limite de tolerância mínimo de 1,5 unidades para mais.

### 5.1.4 DRX

A análise de DRX foi realizada no Laboratório de Ciência dos Materiais da UFTM. Foram gerados dois gráficos, a figura 35 (a) apresenta o resultado para o fertilizante *in natura*, no qual pode ser observados 5 picos cristalinos, com intensidade de 200 à 400.

Já a figura 35 (b) apresenta o resultado para o fertilizante depois do processo de secagem, sendo que se percebe que os mesmos picos diminuíram a intensidade, variando de aproximadamente 75 à 275.

Figura 35 – Análises de DRX para os fertilizantes: (a) In natura; (b) após secagem.

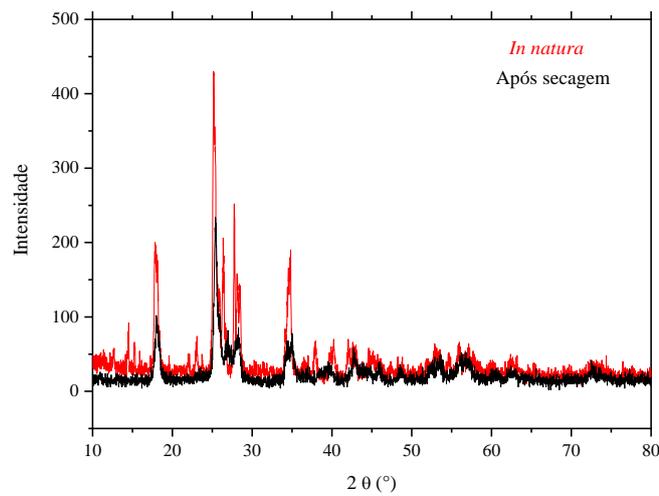


Fonte: Laboratório de Ciência dos Materiais da UFTM, 2021.

Segundo Ferreira et al. (2015) a fração cristalina é determinada pela razão da área dos picos e a soma das áreas correspondentes ao espalhamento amorfo e cristalino. A figura 36 traz a sobreposição da curva do fertilizante após a secagem sobre o fertilizante *in natura*, apontando

para menor nível de cristalinidade. Esta característica indicou que provavelmente o fertilizante aumentou a porcentagem de material amorfo depois do processo de secagem. Esta modificação pode estar relacionada também com o aumento da solubilidade, visto que materiais amorfos geralmente possuem a propriedade de solvatação muito maior do que materiais cristalinos. Souza (2015) realizou a secagem de uma solução de caju em leito de jorro, a análise de DRX realizada em seu produto final também indicou a formação de um pó com aspecto mais amorfo.

Figura 36 - Sobreposição das análises de DRX para os fertilizantes.



Fonte: Laboratório de Ciência dos materiais da UFTM, 2021.

## 5.2 SELEÇÃO DO SOLIDO INERTE E CARACTERIZAÇÃO DOS INERTES

O polietileno de baixa densidade (PEBD) foi a partícula inerte escolhida para este estudo. As caracterizações deste material são apresentadas neste tópico.

### 5.2.1 Caracterização física e morfológica dos inertes

As características físicas e morfológicas do polietileno são apresentadas na tabela 13. Valores próximos de densidade foram apresentados por Coutinho et al. (2003).

Como descrito na sessão 4.1.1 para se classificar a fluidização do polietileno com o ar a 100°C foi calculado a diferença densidades entre as duas fases, para o ar o valor de 0,00128 g/cm<sup>3</sup>. Quando observado no diagrama de Geldart, a partícula se encontra na região D, indicando ser grande o suficiente e com capacidade para jorro.

Tabela 13 – Características físicas e morfológicas do material inerte (PEBD) e do leito (de PEBD).

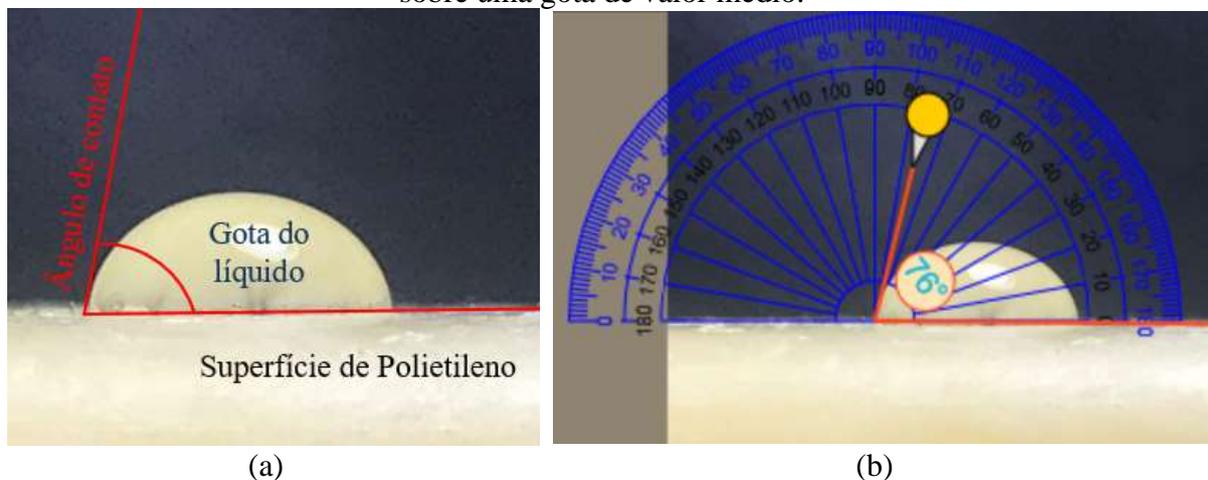
Característica	Valor médio $\pm$ desvio
Diâmetro de área projetada - $d_a$ (cm)	$0,4704 \pm 0,0111$
Diâmetro volumétrico - $d_v$ (cm)	$0,4105 \pm 0,0010$
Arredondamento - $A_d$	$0,9111 \pm 0,0184$
Circularidade - $C$	$1,0980 \pm 0,0233$
Alongamento - $A_l$	$1,1161 \pm 0,0343$
Esfericidade - $\phi$	$0,9469 \pm 0,0145$
Densidade aparente da partícula - $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$0,8994 \pm 0,0061$
Porosidade do leito - $\epsilon$	$0,3943 \pm 0,0007$

Fonte: da autora, 2021.

### 5.2.2 Medida do ângulo de contato do sistema sólido-líquido

O ângulo de contato da solução de fertilizante foliar com uma superfície de polietileno foi calculado através da metodologia apresentada no item 4.1.2. As imagens de 40 gotas foram tratadas e seus ângulos calculados, como mostra a figura 37.

Figura 37 - Medição do ângulo de contato: (a) esquema representativo e (b) medição realizada sobre uma gota de valor médio.



Fonte: da autora, 2021.

O valor médio do ângulo de contato foi calculado para a solução de fertilizante, assim como para a água pura, e estão apresentados na tabela 14. Como pode ser notado o valor médio do ângulo de contato para a água e para a solução são muito próximos, esse fato pode ser explicado pela concentração da solução, que é muito baixa.

Como o ângulo de contato da gota de solução com a superfície de PEBD é em média  $76,22^\circ$ , pode ser considerado que o líquido molha a superfície de PEBD pois é menor que  $90^\circ$ . Além disso, sendo maior que  $70^\circ$ , é considerado propício para a granulação por secagem em leito, como visto por Donida (2004). Esse fato foi observado também por Marques, Donida e

Rocha (2009), quando estudaram o efeito da energia superficial dos materiais sólidos inertes em secagem de leito de jorro, chegando à conclusão que materiais como o polietileno e poliestireno apresentam menores energias superficiais, favorecendo a secagem da suspensão em leito de jorro.

Tabela 14 - Resultados dos ângulos de contato entre as gotas de água e da solução de fertilizante com a superfície de PEBD.

Líquido	Ângulo de contato médio
Água	77,63°
Solução 0,02 g/mL	76,22°

Fonte: da autora, 2021.

Rosa (2010) também citou que materiais com um elevado ângulo de contato com a suspensão, como o PEBD, polipropileno e poliestireno, não proporcionam um alto nível de recobrimento, sucedendo a secagem da suspensão.

### 5.3 INSTRUMENTAÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL

#### 5.3.1 Transdutores de pressão

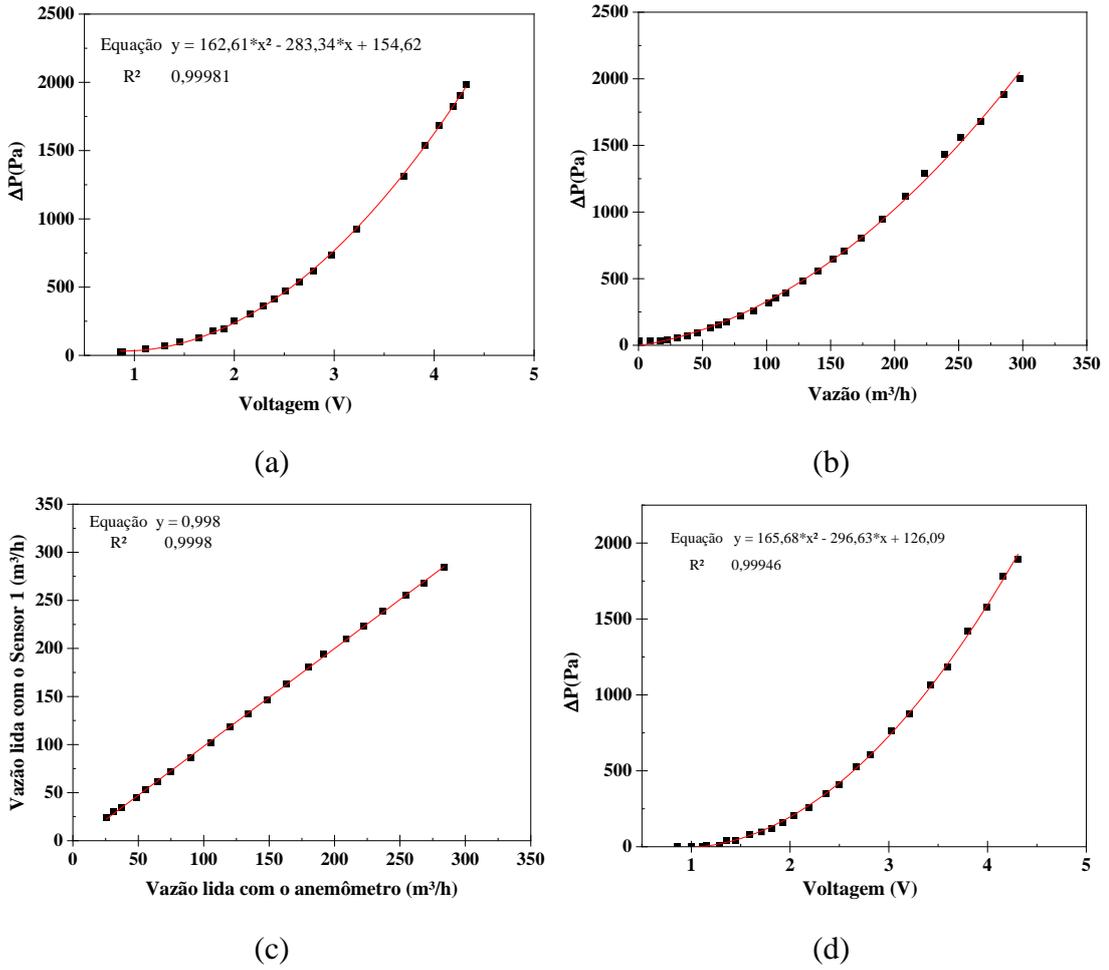
Para se calibrar o transdutor 1 (leitura da vazão de alimentação de ar) com a unidade experimental, primeiramente foi realizado uma leitura (pela interface no LabView) da queda de pressão da placa de orifício em função da voltagem captada pelo sensor. A curva de calibração ilustrada na figura 38 (a) gerou uma equação polinomial de 2º ordem. Esta equação, por sua vez foi inserida na VI do programa LabView e, em seguida, construiu-se uma curva da leitura da vazão no anemômetro em função da queda de pressão captada pelo transdutor 1, como mostra a figura 38 (b).

Os dados obtidos foram, então, inseridos no programa Estatística, sobre a opção de Advanced Linear / Nonlinear Models – Nonlinear Estimation, usando a equação 27 para relacionar a vazão de ar lida com a queda de pressão observada. Desta forma, foram gerados valores para as constantes K e n.

$$Q = 5,1437 \cdot \Delta P^{0,5382} \quad (44)$$

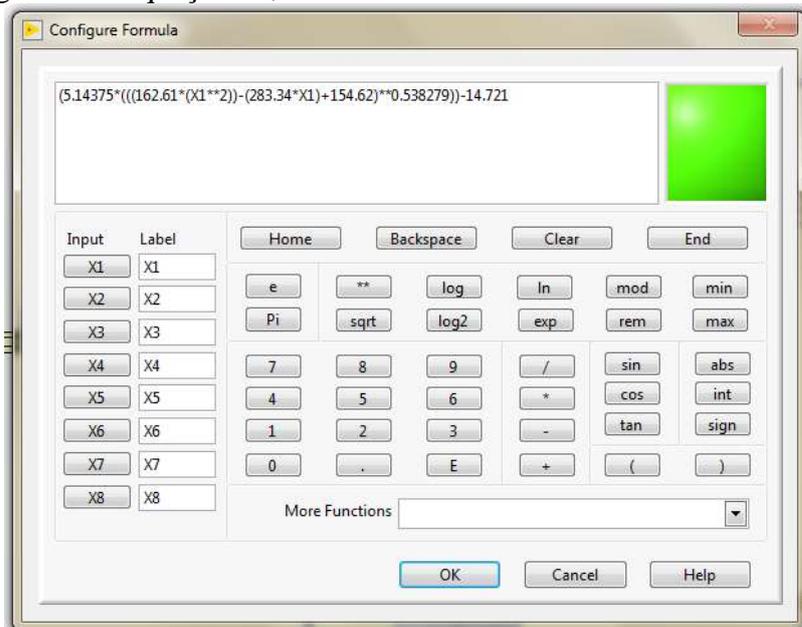
Então, estes valores foram inseridos na VI do Labview, obedecendo a equação 44, como pode ser observado na figura 39. Para validar a leitura do transdutor 1, foi realizada uma calibração entre as leituras de vazão captadas pelo transdutor e as leituras de vazão observadas no anemômetro. Pode ser observar na figura 38 (c) uma reta com inclinação 0,9998 e R<sup>2</sup> 0,9998, o que leva a acreditar que o ajuste foi bem aceito.

Figura 38 - Curvas de calibração dos transdutores.



Fonte: da autora, 2021.

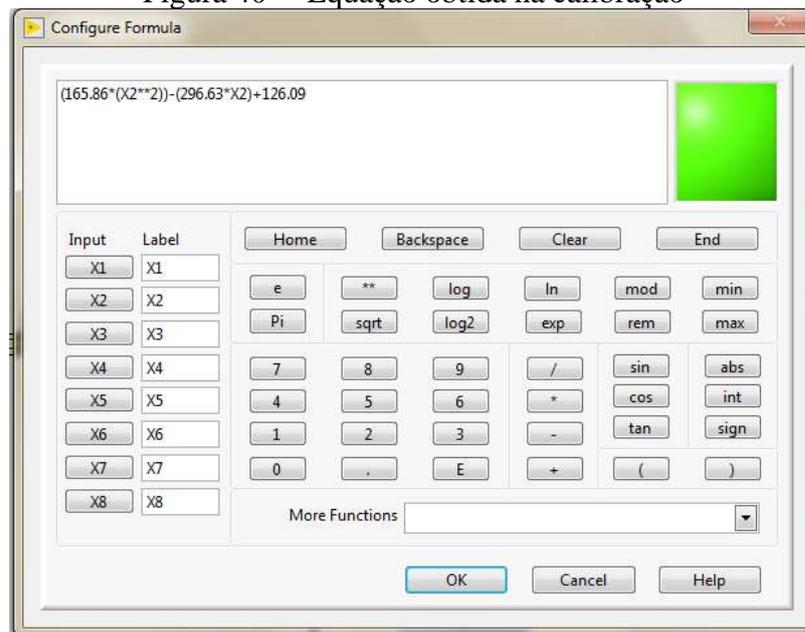
Figura 39 - Equação 44, com valores de K e n inseridos no Labview.



Fonte: da autora, 2021.

A calibração do transdutor 2 (queda de pressão no leito) com a unidade experimental foi mais simples de ser realizada, já que era necessário conhecer somente a relação da leitura da queda de pressão em função da voltagem captada pelo sensor. Para isso, foi construída uma curva de calibração, figura 38 (d), gerando uma equação a qual relaciona as duas variáveis citadas. Desta forma, a equação polinomial de 2º grau encontrada também foi inserida na interface do LabView, para a expressão de leitura do sensor 2, como mostra a figura 40.

Figura 40 – Equação obtida na calibração



Fonte: da autora, 2021.

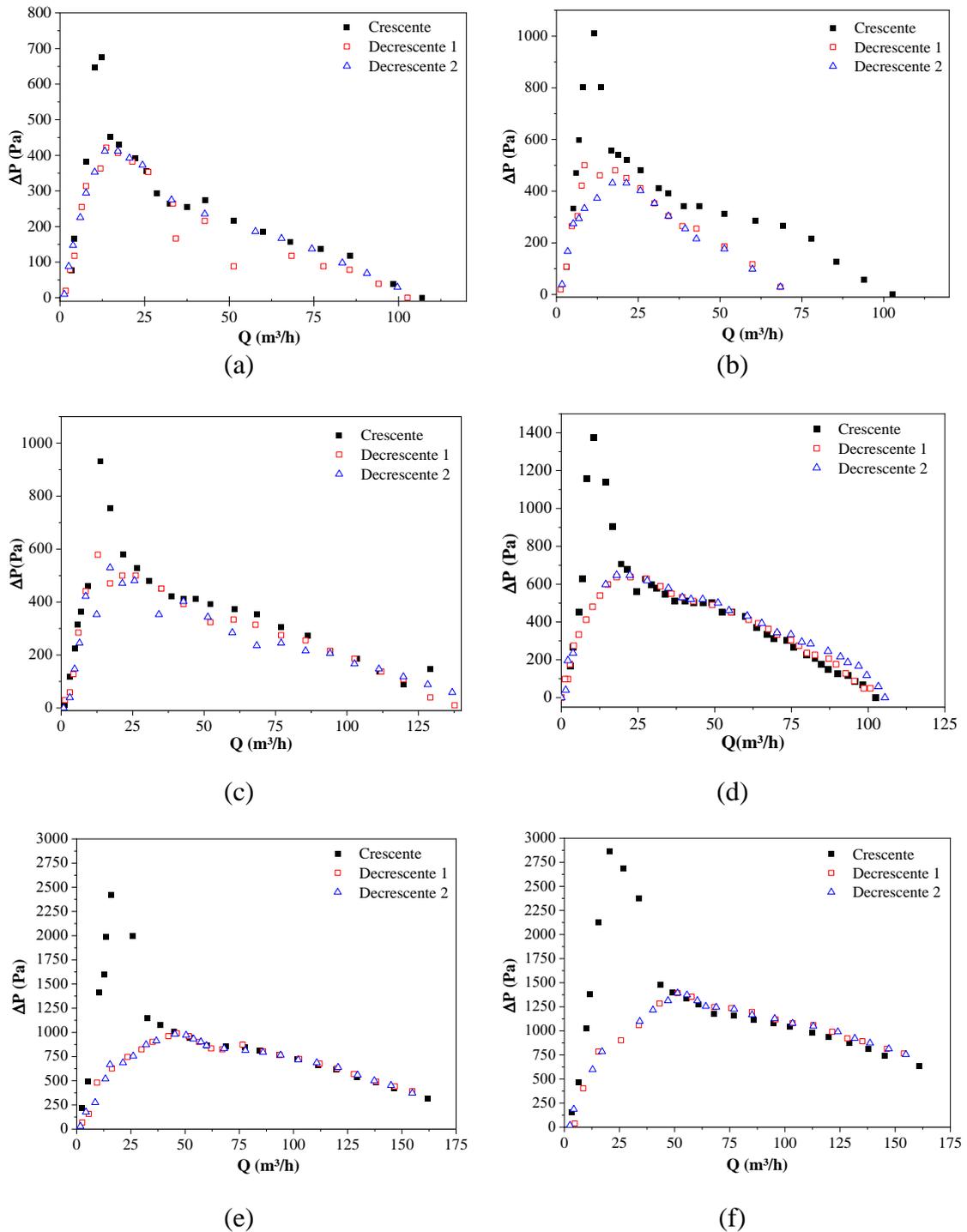
#### 5.4 ESTUDO EXPERIMENTAL DA FLUIDODINÂMICA DO LEITO DE JORRO

Na figura 41 estão apresentadas as curvas características da queda de pressão em função da vazão do ar de alimentação realizadas neste estudo. O intuito das mesmas foi conhecer a fluidodinâmica do leito para diferentes cargas de inerte.

É perceptível como a variação da carga de inertes influencia nas variáveis operacionais do leito. A queda de pressão máxima e a velocidade de jorro mínimo se elevam com o aumento da quantidade de inertes dentro do leito. Resultados análogos foram encontrados por Leu e Pan (2004), indicando que este comportamento é compreensível, já que o acréscimo da massa de inertes resulta em uma maior resistência ao escoamento de ar, acarretando, assim, na elevação da queda de pressão e da velocidade de jorro mínimo.

Na figura 41 (a), tem-se a curva para a carga de 200g, condição (quantidade) na qual percebe-se que curvas de vazão decrescente (as voltas) 1 e 2 não foram coincidentes com a curva de vazão crescente (ida), indicando uma instabilidade no leito. O mesmo fenômeno pode ser observado nas curvas de 300g (b), 400g (c) e 500g (d). Já com as cargas de 1 kg (e) e 1,5kg (f), as curvas características apresentaram uma excelente estabilidade.

Figura 41 – Curvas características do leito de jorro nas massas: (a) 200g, (b) 300g, (c) 400g, (d) 500g, (e) 1000g e (f) 1500g



Fonte: da autora, 2021.

Barcelos (2006) constatou que a elevação na altura do leito de partículas, a carga de inertes, pode aumentar a faixa de regime de jorro estável no leito. Isso se deve ao fato de que é necessária uma altura mínima de partículas para que o movimento cíclico de jorro seja alcançado. Bitti (2012) analisou estatisticamente a carga de inertes como variável para a taxa de evaporação de água em um leito de jorro, sendo que a autora observou que elevados valores dessa variável contribuíram para a ótima condição de operação do sistema.

Tendo como base esse contexto e analisando experimentalmente a estabilidade do leito nas diferentes cargas, a massa de 1kg foi escolhida como a quantidade empregada nos experimentos de secagem, pois além de proporcionar estabilidade ao jorro, possui uma área superficial considerável e iria demandar menos gasto energético para realizar as secagens do que a massa de 1,5 kg.

Na tabela 15 tem-se os valores das quedas de pressão máxima, de jorro mínimo e a velocidade de jorro mínimo observadas para as cargas de inertes.

Tabela 15 – Valores das quedas de pressão máxima e de jorro mínimo observadas.

Massa de partículas (g)	Área Superficial (cm <sup>2</sup> )	$-\Delta P_{\text{máx}}$ observada (Pa)	$-\Delta P_{\text{jm}}$ observada (Pa)	$U_{\text{jm}}$ observada (m/s)
200	1067,64	676,64	193	6,43
300	1601,46	1010,06	285	7,60
400	2135,29	931,61	387	8,18
500	2669,11	1372,89	485	8,77
1000	5338,22	2422,18	817	11,46
1500	8007,32	2863,42	1195	13,56

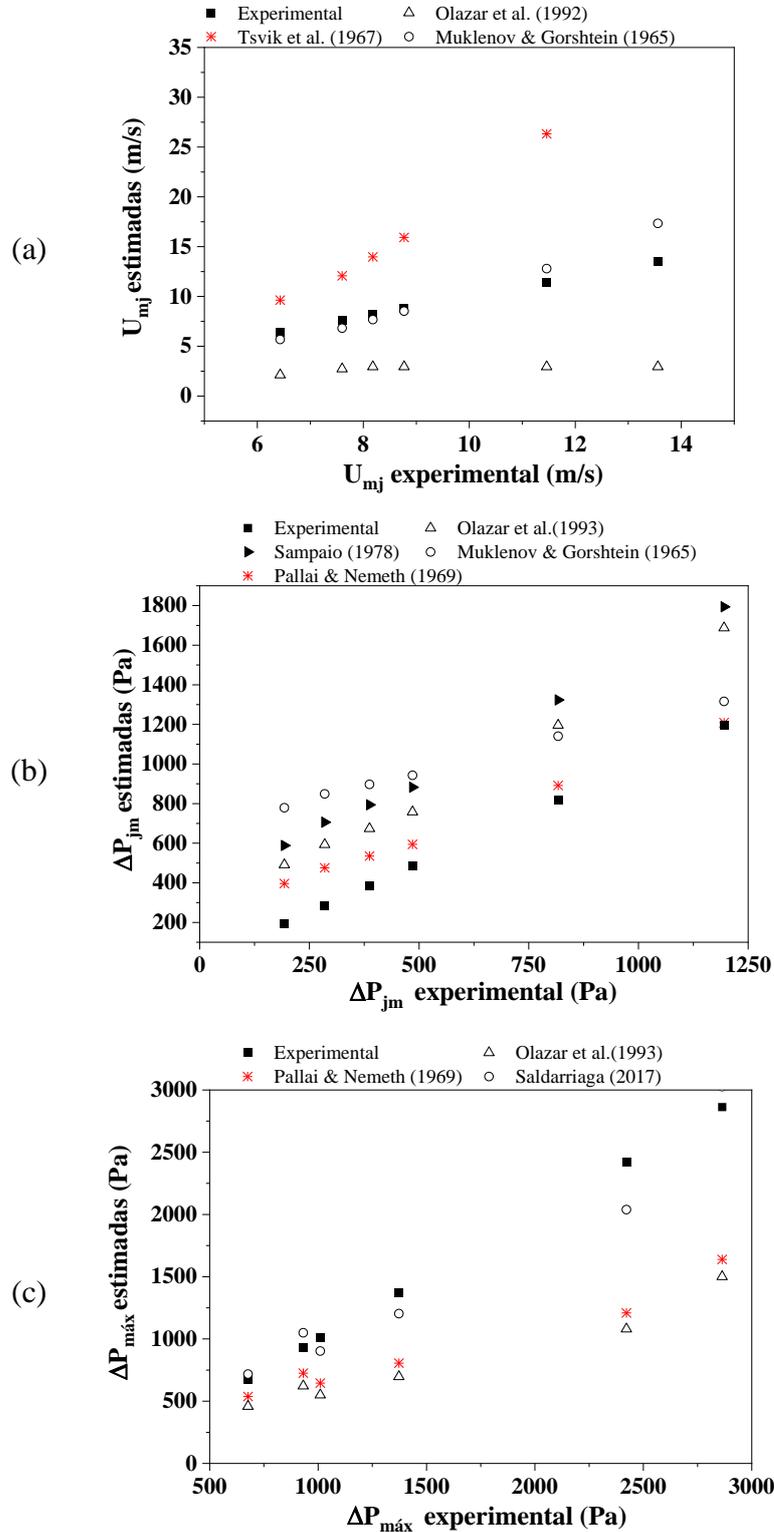
Fonte: da autora, 2021.

Para se realizar os cálculos das correlações, foi preciso se estabelecer as condições de operação e propriedades das partículas, estas informações estão detalhadas na tabela 32, em anexo. Os valores encontrados pelas correlações para as condições de velocidade de jorro mínimo, queda de pressão de jorro mínimo e queda de pressão máxima, são apresentados nas tabelas 33, 34 e 35, respectivamente, todas em anexo.

A figura 42 (a) demonstra a relação das velocidades de jorro mínimas previstas em função dos valores encontrados experimentalmente. Tem-se que a correlação que mais se aproximou dos valores observados foi a de Muklenov e Gorshtein (1965), esta predição leva em conta a razão de altura do leito estático pelo tamanho do diâmetro de entrada do leito ( $H_0/D_0$ ), sendo

que suas condições de contorno não apresentam limites para os valores resultantes dessa relação.

Figura 42 - Comparação entre os dados experimentais e os estimados pelas correlações para (a) velocidade de jorro mínimo; (b) queda de pressão de jorro mínimo e (c) queda de pressão máxima.



Fonte: da autora, 2021.

Já Tsvik et al. (1967) restringiram em suas condições de contorno os valores para  $H_0/D_0$ , tanto que os dois últimos pontos foram fora dos limites para esse fator, se distanciando dos pontos experimentais. Olazar et al. (1992) reduziram a faixa de altura para leito de jorro estático  $H_0$  válida para 3,6 a 6,1 cm, o que impactou na predição da velocidade de jorro mínimo para o equipamento deste estudo, já que os valores de  $H_0$  variam de 10 a 30,5 cm.

Na figura 42 (b) tem-se as comparações entre os valores de queda de pressão de jorro mínimo estimadas e experimental. Para essa condição, a correlação que mais se aproximou da experimental foi a Pallai Nemeth (1969), já que sua equação apresenta forte influência da geometria do jorro nos seus resultados, sendo que a única condição de contorno exigida por Pallai Nemeth é válida para o leito estudado ( $D_c$  entre 10 – 30 cm). A geometria do equipamento foge de grande parte das condições de contorno das demais correlações, explicando o maior desvio entre os valores preditos e observados.

A figura 42 (c) traz a comparação entre três correlações da literatura e os dados experimentais para a queda de pressão máxima do leito. A predição que melhor representou os dados experimentais foi a de Saldarriaga (2013), sendo que a geometria do leito usando neste trabalho obedece a duas condições de contorno desta correlação (o valor de  $Re_{jm}$  para 50 a 4900 e  $H_0/D_0$  entre 0,83 e 50), o que influenciou no menor desvio entre os dados experimentais.

A partir destes resultados é possível se relacionar melhor o equipamento em função do tipo de partícula adotada. Tendo base as correlações elegidas como mais próximas às condições observadas, é possível se predizer para a futuras alterações nas de cargas de inertes, quais valores de queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro mínimo e velocidade de jorro mínimo serão encontradas.

## 5.5 EXPERIMENTOS DE SECAGEM DO FERTILIZANTE FOLIAR NO LEITO DE JORRO

### 5.5.1 Definição das faixas de condições experimentais da unidade experimental

Através dos testes preliminares, algumas variáveis foram definidas como fixas para o processo de secagem. A bomba peristáltica empregada nos experimentos possui uma vazão

mínima de 19 mL/min e, com o intuito de administrar o menor fluxo possível de solução dentro do leito, esse valor foi tomado como fixo. Essa medida foi tomada considerando o embasamento literário, sendo que Barros (2018) observou que menores vazões de alimentação (10 mL/min) administradas em leito de jorro geraram maiores recuperações de produto e elutriação, devido a menor valor da umidade do pó.

Como o bico aplicador é de duplo fluido, o uso de um compressor de ar é imprescindível para atomizar a solução dentro do leito. Com o objetivo de se ter o menor gasto energético e atingir um valor mínimo para atomizar a solução, foi-se adotado a pressão de 1 bar. Pressão recomendada por Silva (2016) como dentro da faixa ideal para secagem de pastas ou soluções usando PEBD como sólido inerte.

A temperatura da resistência foi administrada pelo controlador à 120°C, desta forma considerando a perda de energia da tubulação, o ar chega à base do leito a aproximadamente 110°C e no centro do leito à 100°C. Satisfazendo assim duas condições limitantes do experimento, a temperatura máxima que as partículas resistem sem sofrer deformação e a temperatura favorável para realizar a secagem do fertilizante. Na tabela 16 são apresentados os valores adotados para as variáveis fixas do processo.

Como descrito na sessão 5.3, a partir das curvas características, verificou-se que a carga de inertes que obteve a melhor relação entre estabilidade do movimento de partículas e a menor quantidade de material necessária pra operar foi a massa de 1 kg.

Tabela 16 – Variáveis fixas do processo.

Variável Fixa	Valor
Vazão de alimentação da solução	19 mL/min
Pressão do bico atomizador	1 bar
Temperatura do ar de secagem	100° C
Vazão de alimentação de ar	120 m <sup>3</sup> /h
Carga de inertes	1 kg

Fonte: da autora, 2021.

### 5.5.2 Testes de Secagem da solução do fertilizante em leito de jorro com sólidos inertes

Os testes de secagem foram executados conforme descrito na sessão 4.8. Consistiram em oito testes seguindo o planejamento experimental 2<sup>3</sup> e uma réplica do experimento que obteve melhor resultado de rendimento. A seguir é apresentada uma análise estatística realizada

dos efeitos das três variáveis em todas as respostas obtidas, o nível de significância considerado foi de 10%.

A tabela 17 apresenta os valores encontrados para as respostas de umidade, rendimento e produtividade.

Tabela 177 - Matriz das variáveis independentes e das respostas para o rendimento, produtividade e umidade.

Exp.	Fatores			$\eta$ [g/g]	Fração	
	$t_{al}$ [s] (x1)	$t_I$ [s] (x2)	$H_A$ [m] (x3)		P [g/h]	U [%]
Teste 1	10 (-1)	60 (-1)	0,40 (-1)	0,089	0,293	9,06
Teste 2	30 (+1)	60 (-1)	0,40 (-1)	0,076	0,433	9,77
Teste 3	10 (-1)	300 (+1)	0,40 (-1)	0,029	0,025	8,93
Teste 4	30 (+1)	300 (+1)	0,40 (-1)	0,023	0,038	9,48
Teste 5	10 (-1)	60 (-1)	0,68 (+1)	0,182	0,566	20,56
Teste 6	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)	0,252	1,503	21,78
Teste 7	10 (-1)	300 (+1)	0,68 (+1)	0,066	0,048	20,25
Teste 8	30 (+1)	300 (+1)	0,68 (+1)	0,049	0,089	21,44
Teste 9*	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)	0,2663	1,591	20,53

Fonte: da autora, 2021. \*Réplica do teste 6

### 5.5.2.1 Umidade

Segundo Alberto (2017) não existe um valor máximo estipulado para a umidade de fertilizantes sólidos foliares. Conforme a legislação para fertilizantes organominerais de aplicação via solo, a máxima umidade admitida é de 30% (BRASIL, 2009), isso implica que todos os produtos obtidos no processo estariam dentro do permitido.

Os efeitos encontrados pela análise estatística sobre a umidade estão expostos na tabela 18, assim como a superfície de resposta na figura 43. Nota-se que todas as variáveis surtiram efeito na umidade do produto final.

Tabela 18 – Efeitos das variáveis sob a umidade.

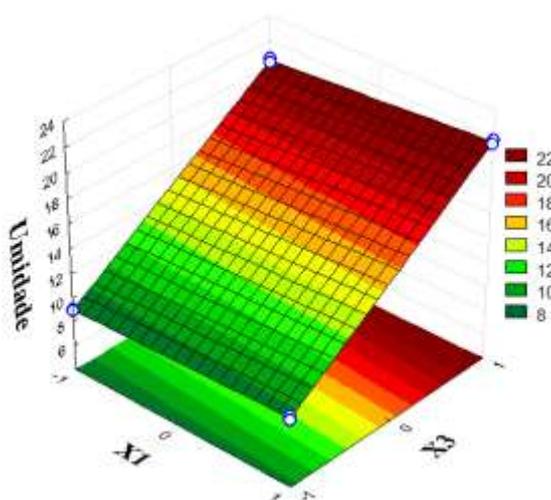
	Umidade (R <sup>2</sup> =0,999)			
	Efeito	Desvio	p-level	IC95%
média	15,159	0,023	0,000	15,084 15,233
x1	0,918	0,047	0,000	0,768 1,067
x2	-0,267	0,047	0,011	-0,417 -0,118
x3	11,698	0,047	0,000	11,548 11,847
x1x3	0,288	0,047	0,009	0,138 0,437

Fonte: da autora, 2021.

A variável x1 (tempo de alimentação), apresentou efeito com sinal positivo, sendo que quanto maior o seu valor, maior o volume de solução contendo 98% de água, acarretando em

uma maior umidade dentro do leito e no produto final. Dantas (2018) observou que para menores vazões de alimentação da solução, uma menor capacidade do secador é empregada, acarretando em uma melhor taxa de secagem. Além disso, ainda segundo o estudo de Dantas (2018), um menor volume de solução dentro do leito não teve grandes interferências na temperatura. Isso implica que para uma mesma temperatura de trabalho, quanto maior a quantidade de solução dentro do leito, maior será a umidade do produto final. Barros e Freire (2019) também observaram que uma menor vazão de alimentação implicou em uma menor umidade no equipamento, indicando que a capacidade máxima de secagem não teria sido atingida.

Figura 43 - Superfície de resposta do tempo de alimentação e altura do atomizador em função da umidade.



Fonte: da autora, 2021

A variável  $x_2$  (tempo de intermitência), teve efeito com sinal negativo, pois quanto menor o período de pausa entre as alimentações, menos tempo a solução tem para secar, aumentando a umidade do sistema.

Já a altura do atomizador,  $x_3$ , foi a variável que mais influenciou na umidade. O efeito foi positivo, apontando que a maior altura, 0,68m de distância com a base do leito, deixou a atomização distante das partículas inertes, diminuindo a interação entre a solução. Assim, o pó não aderiu na superfície nas partículas por tempo suficiente para realizar a secagem, sendo arrastado para o ciclone com maior umidade.

#### 5.5.2.2 *Rendimento e produtividade*

A tabela 19 traz os resultados obtidos pela regressão linear sob o rendimento e a produtividade. As variáveis que causaram o maior efeito sobre o rendimento foram o tempo de

intermitência seguido da altura do atomizador, como pode ser observado na superfície de resposta da figura 44.

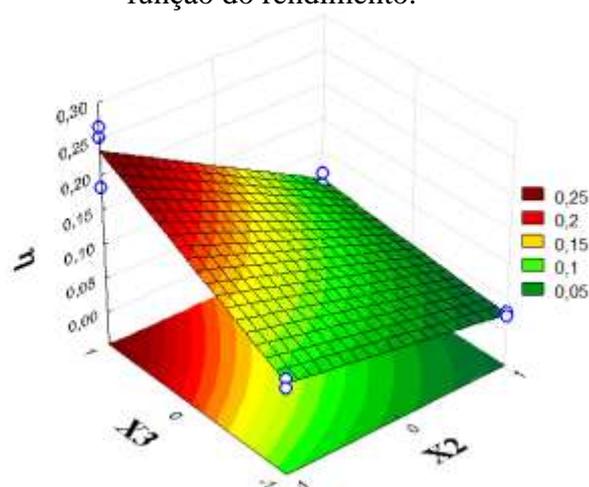
Tabela 19 – Efeitos das variáveis sob o rendimento e produtividade.

	Rendimento ( $R^2= 0,939$ )					Produtividade ( $R^2= 0,999$ )				
	Efeito	desvio	p-level	IC95%		Efeito	desvio	p-level	IC95%	
média	0,100	0,010	0,000	0,074	0,125	3,87E-04	7,33E-05	3,41E-02	7,11E-05	7,02E-04
x2	-0,116	0,020	0,002	-0,167	-0,065	-6,73E-04	1,47E-04	4,43E-02	-1,30E-03	-4,24E-05
x3	0,091	0,020	0,006	0,040	0,142	-	-	-	-	-
x2x3	-0,060	0,020	0,030	-0,111	-0,009	-	-	-	-	-

Fonte: da autora, 2021

Para o rendimento a variável do tempo de intermitência, apresentou um efeito com sinal negativo, indicando que experimentos com longos tempos de pausa entre as alimentações não aumentaram a taxa de secagem. O mesmo comportamento em relação ao tempo de intermitência foi relatado no estudo de Dantas (2018), no qual se observou uma pequena variação entre as taxas de secagem do tempo de alimentação e do período de parada, foi considerado que em virtude das altas taxas de transferência de calor em massa do secador, durante a alimentação uma grande porção da água presente na solução é evaporada, reduzindo as taxas de secagem no tempo de intermitência. Já a altura do atomizador teve efeito de sinal positivo, isto demonstra que entre as distâncias estudadas, a maior resultou em uma recuperação mais efetiva de produto.

Figura 44 – Superfície de resposta do tempo de intermitência e altura do atomizador em função do rendimento.



Fonte: da autora, 2021.

Os valores de rendimento variaram entre 2,3 – 8,9% para o atomizador na maior altura e 4,9 – 26,3% para o atomizador na menor altura, de modo geral, são considerados baixos para a secagem em leito de jorro, segundo Barros e Freire (2019), são satisfatórios valores de recuperação de pó acima de 40%. Baixos níveis de rendimento também foram registrados por

Machado et al. (2015) que avaliaram os efeitos das variáveis de operação na secagem da mistura de graviola e leite. O estudo destacou que quando a variável tempo de intermitência ocorre em períodos muito longos, o leito fica mais aquecido e tendendo para a formação de aglomerados. Deste modo, notaram que para tempos de intermitência longos ao invés de contribuir favoravelmente, podem prejudicar o desempenho do secador.

A produtividade é obtida pela razão entre o rendimento e o tempo total do experimento. Esta resposta sofreu efeito significativo de apenas uma variável, o tempo de intermitência. Como o maior valor de  $\eta$  foi encontrado no menor tempo de intermitência, A análise apontou um efeito com sinal negativo da variável, ou seja, em tempos de intermitência muito longos o leito não aumentava a taxa de secagem, reduzindo a produtividade.

### 5.5.2.3 Mapeamento das perdas de fertilizante durante a secagem

Neste tópico serão apresentadas as frações mássicas de fertilizante aderidas em cada região do sistema de secagem e que, por isso, não foram coletadas no *underflow* do ciclone, contribuindo para a redução do rendimento do processo. As frações foram calculadas como descrito na sessão 4.8.2 e, os valores encontrados podem ser visualizados na tabela 20.

Tabela 20 - Matriz das variáveis independentes e das respostas para as frações de perdas de produto.

Exp.	Fatores			Fração					
	$t_{al}$ [s] ( $x_1$ )	$t_I$ [s] ( $x_2$ )	$H_A$ [m] ( $x_3$ )	Nas partículas	Parede do leito	Parede do ciclone	Tubulação de exaustão	Filtro	<i>Overflow</i>
Teste 1	10 (-1)	60 (-1)	0,40 (-1)	0,435	0,120	0,125	0,075	0,061	0,095
Teste 2	30 (+1)	60 (-1)	0,40 (-1)	0,315	0,160	0,040	0,035	0,065	0,309
Teste 3	10 (-1)	300 (+1)	0,40 (-1)	0,505	0,115	0,080	0,050	0,042	0,179
Teste 4	30 (+1)	300 (+1)	0,40 (-1)	0,505	0,185	0,155	0,055	0,040	0,039
Teste 5	10 (-1)	60 (-1)	0,68 (+1)	0,075	0,315	0,135	0,115	0,044	0,134
Teste 6	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)	0,103	0,420	0,060	0,110	0,055	0,001
Teste 7	10 (-1)	300 (+1)	0,68 (+1)	0,090	0,430	0,220	0,080	0,020	0,094
Teste 8	30 (+1)	300 (+1)	0,68 (+1)	0,105	0,440	0,160	0,095	0,040	0,111

Fonte: da autora, 2021.

A fração mássica do fertilizante encontrado na superfície das partículas inertes teve influência de duas variáveis do processo, conforme a tabela 21. A variável de maior atuação foi a altura do atomizador, sendo esse efeito com sinal negativo, assim quanto menor a altura do atomizador com a base do leito, mais próxima a solução é pulverizada sobre as partículas,

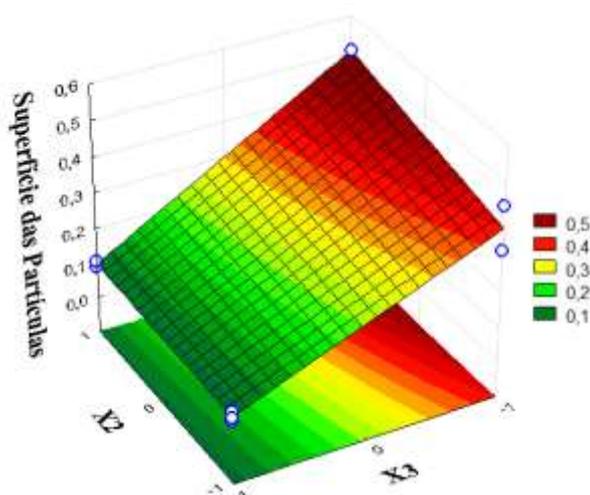
fazendo que parte do fertilizante ficasse aderido sua superfície. A interação de x2x3 pode ser visualizada pela superfície de resposta da figura 45.

Tabela 21– Efeito das variáveis sobre a fração mássica de fertilizante não coletado devido à adesão na superfície das partículas inertes.

Fração nas Partículas ( $R^2=0,974$ )					
	Efeito	Desvio	p-level	IC95%	
média	0,266	0,013	0,000	0,232	0,300
x2	0,070	0,027	0,046	0,002	0,138
x3	-0,348	0,027	0,000	-0,416	-0,279
x2x3	-0,060	0,027	0,073	-0,128	0,008

Fonte: da autora, 2021.

Figura 45 – Superfície de resposta dos efeitos sob a fração mássica de fertilizante não coletado devido à adesão na superfície das partículas inertes.



Fonte: da autora, 2021.

Os efeitos principais das variáveis x1, x2 e x3 sob as frações mássicas retidas na parede do leito e no filtro são demonstradas na tabela 22. Na figura 46 se mostra em diferentes vistas, a fração de fertilizante retido na parede do leito. Pela análise estatística verifica-se que o fator que mais influenciou a fração mássica do fertilizante total que foi perdido por adesão na parede do leito foi a altura do atomizador, sendo que o efeito com sinal positivo indica que a maior distância entre o atomizador e a base do leito causou um afastamento da solução aspergida com as partículas, diminuindo o contato sólido-líquido e fazendo que parte do fertilizante se depositasse na parede do leito, secando e se aderindo à região.

Rosa (2010) observou um comportamento parecido, em que alturas de atomização distantes da região de formação da fonte levam a perda da suspensão, pois o contato com o ar

quente seca a solução antes da mesma interagir com as partículas inertes. Isto faz com que a solução seja seca por elutriação e não pelo mecanismo de interesse deste trabalho, o leito de jorro com as partículas inertes.

Figura 46 – Imagem em diferentes posições do leito de frações mássicas retidas na parede.



Fonte: da autora, 2021.

O tempo de alimentação também surtiu efeito com sinal positivo, pois quando a esse tempo se eleva, um maior volume de solução atomizado se acumula sobre a parede do leito, fazendo com que nem todo o material tenha conseguido ser transferido para a superfície da partícula inerte a tempo, secando e se aderindo na região do leito. Da mesma forma o tempo de intermitência resultou em efeito com sinal positivo, ou seja, quanto maior o tempo de intermitência, mais fertilizante ficou aderido à parede, o que contribui para a redução do rendimento.

Como o ar quente transmite energia térmica para a parede do equipamento, era isolado termicamente na parte externa, quanto maior o tempo de contato do ar com o equipamento maior a temperatura em sua superfície. Uma suposição que pode ser adotada é que a secagem por condução da superfície do leito foi mais efetiva do que pela convecção do ar. Outra suposição é a de que o maior volume de solução no leito talvez signifique que a temperatura usada não foi o suficiente para secar e o material mais úmido, tendo sido menos arrastado pelo ar.

Machado et. al. (2015) também verificaram que os ensaios com baixos rendimentos, em longos tempos de intermitência, levaram a quantidades significativas de material retido a parede do leito e na superfície do equipamento.

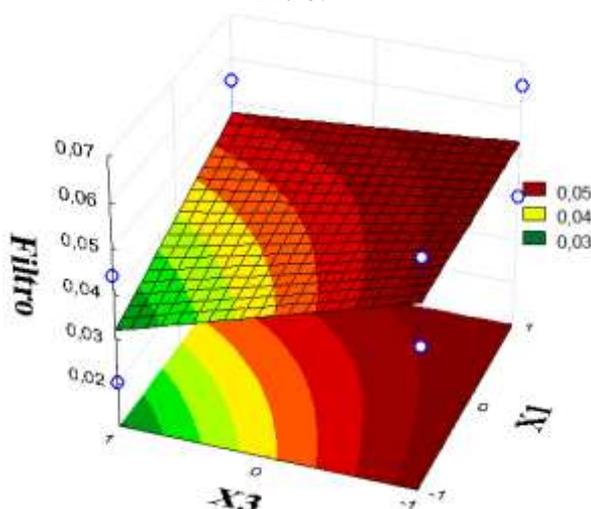
Tabela 22 – Efeito das variáveis de processo na fração mássica de fertilizante perdida na parede do leito e no filtro.

	Fração no Leito (R <sup>2</sup> =0,974)					Fração no Filtro (R <sup>2</sup> =0,977)				
	Efeito	Desvio	P-level	IC95%		Efeito	Desvio	P-level	IC95%	
média	0,273	0,010	0,000	0,248	0,298	0,046	0,001	0,000	0,042	0,049
x1	0,055	0,020	0,036	0,005	0,106	0,008	0,002	0,038	0,000	0,016
x2	0,040	0,020	0,098	-0,011	0,090	-0,021	0,002	0,003	-0,028	-0,013
x3	0,255	0,020	0,000	0,205	0,306	-0,012	0,002	0,013	-0,013	-0,005
x1x3	-	-	-	-	-	0,007	0,002	0,052	-0,020	0,015

Fonte: da autora, 2021.

Para a resposta fração mássica de fertilizante perdido no filtro localizado no *overflow* do ciclone, a variável de maior influência foi o tempo de intermitência. Essa possui efeito com sinal negativo sobre o filtro, indicando que uma maior intermitência forma partículas maiores, não sendo arrastadas para o filtro. A interação de x1x3 pode ser visualizada pela superfície de resposta da figura 47, a altura do atomizador também possui efeito de sinal negativo, ou seja, com uma maior distância entre o atomizador e a base do leito, existe a formação de partículas maiores e, então, a quantidade de pó retido no filtro é menor.

Figura 47 - Superfície de resposta dos efeitos sob a fração mássica de fertilizante retida no filtro.



Fonte: da autora, 2021.

As frações de fertilizante retidas nas demais regiões não sofreram efeito das variáveis. Para as paredes do ciclone e a tubulação de exaustão, somente a média surtiu efeito com sinal positivo, como mostrado na tabela 23. Para as frações mássicas calculadas para perdas pelo *overflow* do ciclone essa distribuição se demonstrou aleatória com o valor médio de 12%, indicando que um estudo de remodelação do ciclone da unidade se faz necessário, uma vez que

essa perda expressa uma quantidade significativa de pós ultrafinos. Vale ressaltar que as perdas de fertilizantes nessas regiões são importantes na queda do rendimento, elas somente não estão alterando com efeito das modificações das variáveis estudadas.

Tabela 23 – Efeitos das médias sobre a parede do ciclone e tubulação de exaustão.

	Média					R <sup>2</sup>
	Efeito	Desvio	p-level	IC95%		
Parede do Ciclone	0,121	0,013	0,011	0,067	0,175	0,916
Tubulação	0,073	0,010	0,019	0,029	0,117	0,722

Fonte: da autora, 2021.

### 5.5.3 Flutuações de Vazão de alimentação de ar e Queda de Pressão no leito

As medidas das vazões de alimentação de ar e queda de pressão do leito foram tomadas utilizando os transdutores de pressão instalados na unidade. Em todos os experimentos as medidas foram realizadas a cada tempo de alimentação e tempo de intermitência, gerando dados de vazão e queda de pressão ao longo do tempo.

A tabela 25 apresenta as curvas de flutuações para a queda de pressão do leito ao longo do tempo e a tabela 26 traz as curvas de flutuações para as vazões ao longo do tempo.

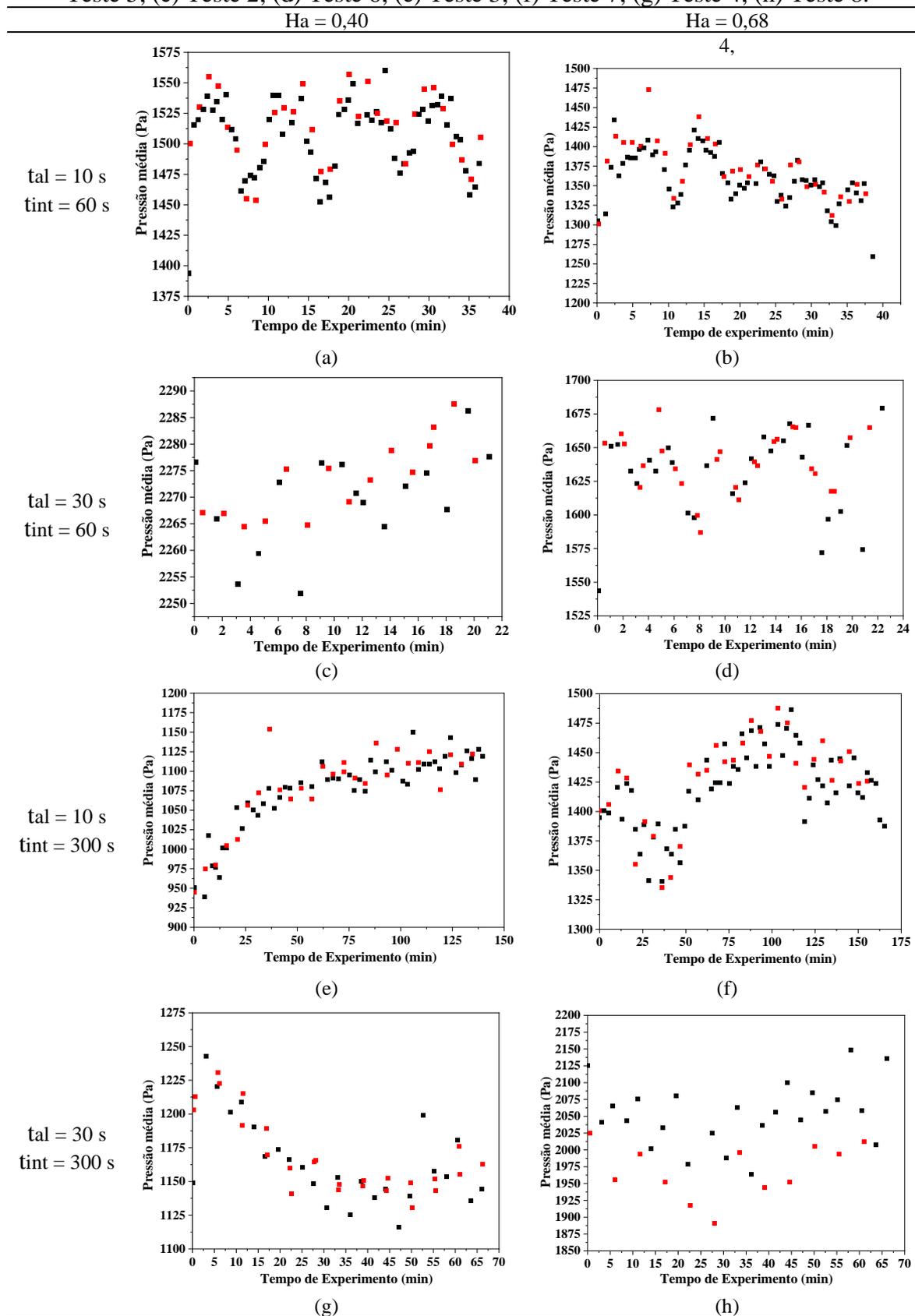
Em ambos os gráficos, de queda de pressão e vazão, os pontos vermelhos apontam que a leitura foi realizada durante a alimentação de solução no sistema, já os pontos pretos indicam que a leitura foi tomada durante o tempo de intermitência. Pode-se observar que a alimentação isolada não teve influência imediata sobre a queda de pressão ou a vazão, visto que as leituras estão dispersas em todos os experimentos. Para melhor avaliar os resultados, uma análise estatística foi realizada segundo a matriz da tabela 24.

Tabela 244 – Matriz das variáveis independentes e das respostas para as vazões de ar de entrada e quedas de pressão do leito médias.

Exp.	Fatores			Resultados		Desvio	
	t <sub>al</sub> [s] (x <sub>1</sub> )	t <sub>i</sub> [s] (x <sub>2</sub> )	H <sub>A</sub> [m] (x <sub>3</sub> )	Q <sub>médio</sub> [m <sup>3</sup> /h]	ΔP <sub>médio</sub> [Pa]	Q <sub>médio</sub>	ΔP <sub>médio</sub>
Teste 1	10 (-1)	60 (-1)	0,40 (-1)	122,71	1508,71	9,29	161,87
Teste 2	30 (+1)	60 (-1)	0,40 (-1)	114,16	2271,54	10,63	278,61
Teste 3	10 (-1)	300 (+1)	0,40 (-1)	110,53	1076,56	7,73	109,24
Teste 4	30 (+1)	300 (+1)	0,40 (-1)	116,26	1166,33	10,05	140,39
Teste 5	10 (-1)	60 (-1)	0,68 (+1)	113,90	1364,27	10,31	165,02
Teste 6	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)	119,96	1634,97	8,81	160,29
Teste 7	10 (-1)	300 (+1)	0,68 (+1)	120,18	1421,78	10,91	181,38
Teste 8	30 (+1)	300 (+1)	0,68 (+1)	112,79	2025,79	12,47	303,76

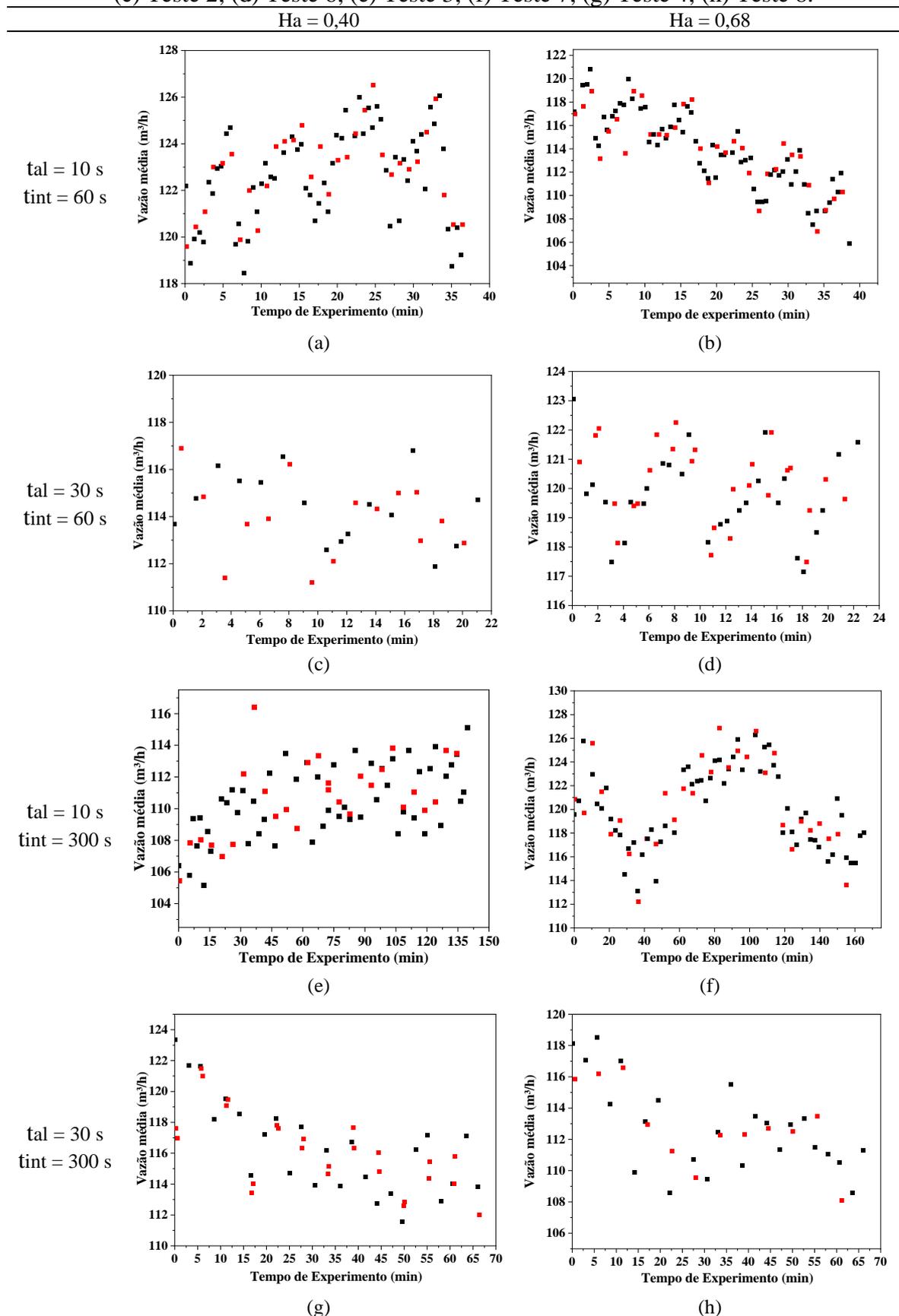
Fonte: da autora, 2021

Tabela 25 – Flutuação da Queda de pressão média durante o experimento: (a) Teste 1; (b) Teste 5; (c) Teste 2; (d) Teste 6; (e) Teste 3; (f) Teste 7; (g) Teste 4; (h) Teste 8.



Fonte: da autora, 2021.

Tabela 26 - Flutuação da Vazão de ar média durante o experimento: (a) Teste 1; (b) Teste 5; (c) Teste 2; (d) Teste 6; (e) Teste 3; (f) Teste 7; (g) Teste 4; (h) Teste 8.



Fonte: da autora, 2021

A tabela 27 apresenta os efeitos das variáveis sobre a vazão e a queda de pressão. Como pode ser observado nenhuma variável influenciou significativamente a vazão do ar de alimentação, somente a média foi considerada. Para a pressão, o tempo de alimentação foi o fator isolado mais impactante, sendo que, pode-se notar que um maior tempo de alimentação aumenta o valor da pressão dentro do leito, devido à maior interação entre fluido-partícula.

Outro efeito observado foi a interação entre o tempo de intermitência e a altura do atomizador, para maiores períodos de intermitência entre as alimentações associados à maior altura do atomizador ocasionou em um aumento da queda de pressão.

Tabela 27 – Efeitos das variáveis sob as vazões médias e queda de pressa.

	Vazão de ar de alimentação (R <sup>2</sup> =0,234)					Queda de pressão (R <sup>2</sup> =0,861)				
	Efeito	Desvio	P-level	IC95%		Efeito	Desvio	P-level	IC95%	
média	116,311	3,466	0,019	72,268	160,354	1558,744	71,485	0,000	1360,269	1757,219
x1	-	-	-	-	-	431,828	142,971	0,039	34,878	828,777
x2x3	-	-	-	-	-	496,423	142,971	0,025	99,473	893,372

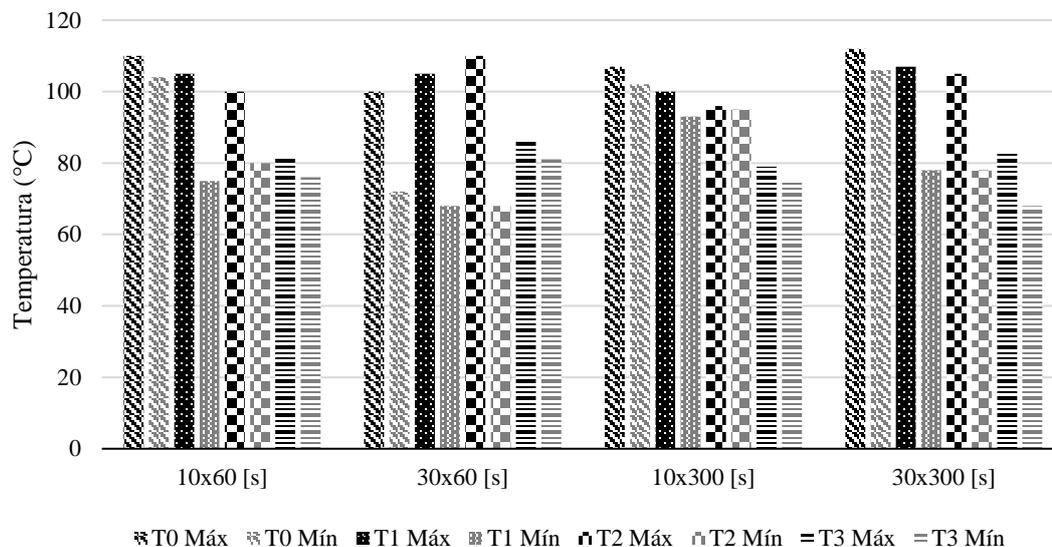
Fonte: da autora, 2021

Butzge et al. (2012) estudaram os sinais de flutuação de pressão durante o umedecimento de inertes em leito de jorro. Segundo os autores o elevado teor de umidade vindo da alimentação da solução causa problemas na estabilidade fluidodinâmica do leito, podendo gerar aglomerados de partículas que em condições extremas levam ao colapso do leito. Eles analisaram duas vazões de alimentação para a massa de 1 kg de inertes e destacaram que apesar do comportamento ser análogo para as duas condições, a menor vazão de atomização manteve a estabilidade do leito por mais tempo.

#### 5.5.4 Distribuição de temperatura na unidade experimental

A sensoriação da temperatura do sistema de secagem de leito de jorro foi realizada manualmente por meio de ter termopares. Os pontos observados foram a base do leito, T<sub>0</sub>, o centro do leito, T<sub>1</sub>, o topo do leito, T<sub>2</sub> e a temperatura no *overflow* do ciclone, T<sub>3</sub>. Os valores de temperaturas máxima e mínima encontrados foram inseridos na tabela 36, em apêndice. Esses dados podem ser visualizados graficamente nas figuras 48 e 49. Na parte inferior das figuras, temos na legenda, as variações entre os tempos de alimentação da solução (10 e 30 segundos) e o tempo de intermitência (1 e 5 minutos, ou seja, 60 e 300 segundos).

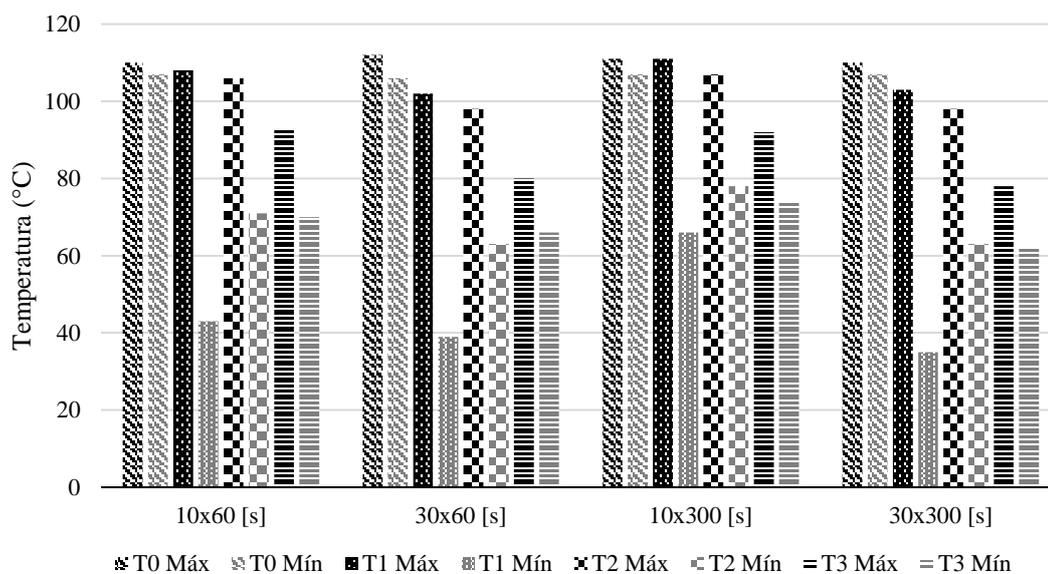
Figura 48 – Altura de atomização 0,40 m.



Fonte: da autora, 2021.

Durante os períodos de alimentação do fertilizante nos experimentos as temperaturas nos pontos observados decaíam até um valor mínimo de operação, logo após o término do período de alimentação (10 ou 30 s) as temperaturas retornavam ao ponto inicial. Para o ponto de medida na base do leito ocorreram poucas variações, devido à sua alta proximidade com a entrada de ar quente do sistema.

Figura 49 – Altura de atomização 0,68 m.



Fonte: da autora, 2021.

Foi notado que o tempo de alimentação maior ocasionava em uma elevada queda de temperatura, principalmente no centro do leito T<sub>1</sub>, quando comparado ao tempo de alimentação

menor no mesmo intervalo de intermitência. Porém a proximidade de T1 com a entrada de ar no leito fazia com que a temperatura de equilíbrio fosse rapidamente restaurada. Uma análise estatística foi realizada para estudar a influência das variáveis de operação nas temperaturas.

Para computar a análise, uma média considerando o tempo que a temperatura permaneceu entre os valores de máximo e mínimo foi realizada, a tabela 28 apresenta a matriz do delineamento.

Tabela 28 – Matriz das variáveis independentes e das temperaturas ao longo do secador.

Exp.	Fatores			Temperaturas			
	$t_{al}$ [s] ( $x_1$ )	$t_1$ [s] ( $x_2$ )	$H_A$ [m] ( $x_3$ )	T0 [°C]	T <sub>1</sub> [°C]	T <sub>2</sub> [°C]	T <sub>3</sub> [°C]
Teste 1	10 (-1)	60 (-1)	0,40 (-1)	109	101	97	81
Teste 2	30 (+1)	60 (-1)	0,40 (-1)	91	93	96	84
Teste 3	10 (-1)	300 (+1)	0,40 (-1)	107	100	96	79
Teste 4	30 (+1)	300 (+1)	0,40 (-1)	112	105	103	82
Teste 5	10 (-1)	60 (-1)	0,68 (+1)	110	99	101	90
Teste 6	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)	110	81	86	75
Teste 7	10 (-1)	300 (+1)	0,68 (+1)	111	110	106	91
Teste 8	30 (+1)	300 (+1)	0,68 (+1)	111	97	95	77

Fonte: da autora, 2021.

Pela análise é possível se concluir que a temperatura média nos pontos T<sub>0</sub> e T<sub>1</sub> não foi influenciada pelas variáveis, sofrendo efeito somente das médias, tabela 29.

Tabela 29 – Efeito das médias sob as temperaturas em T0 e T1.

Temperatura	Média					
	Efeito	Desvio	p-level	IC95%	R <sup>2</sup>	
T0	108	3,082	0,018	68	147	0,778
T1	98	1,005	0,007	85	111	0,984

Fonte: da autora, 2021.

A tabela 30 traz os efeitos das variáveis sob as temperaturas T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>. A temperatura no ponto T<sub>2</sub> sofreu forte influência das variáveis do tempo de intermitência, ele foi um fator de efeito com sinal positivo, quanto maior o seu valor mais tempo o leito tinha para recuperar a temperatura perdida durante a alimentação. A interação entre o tempo de alimentação e altura do atomizador influenciou negativamente a temperatura em T<sub>2</sub>, já que a maior altura do atomizador se encontra próxima ao ponto de leitura do sensor de T<sub>2</sub>, associada ao maior tempo

de alimentação faz com que a temperatura cai no topo do leito, esse comportamento pode ser observado na figura 50(a).

Tabela 30 – Efeito das variáveis sob as temperaturas em T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>.

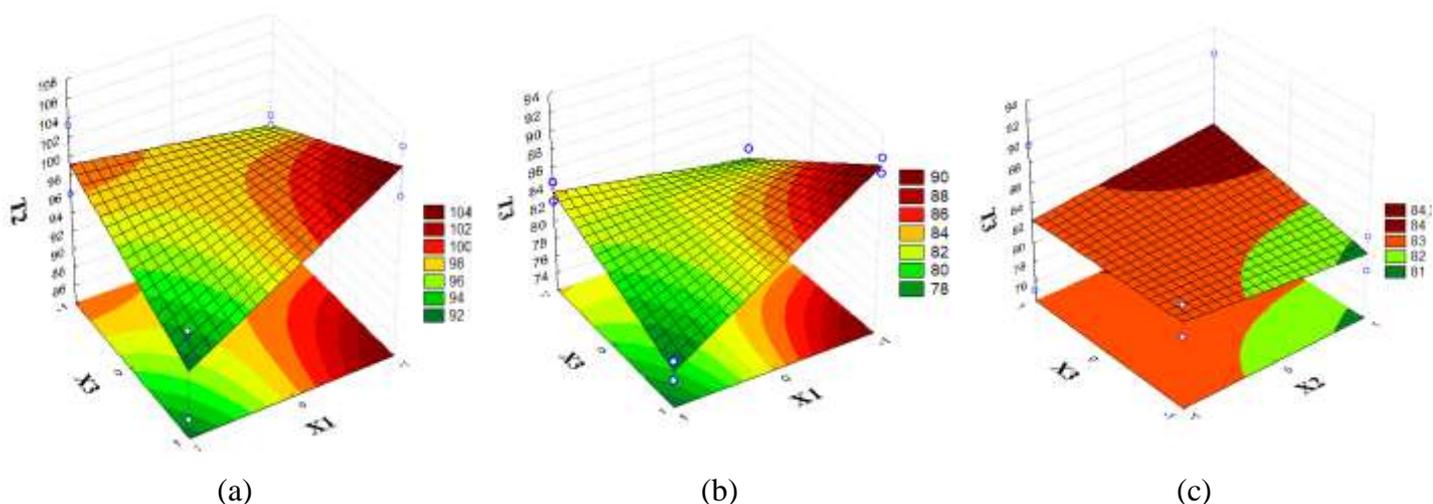
	T2 (R <sup>2</sup> =0,874)					T3 (R <sup>2</sup> =0,999)				
	Efeito	Desvio	P-level	IC95%		Efeito	Desvio	p-level	IC95%	
média	97,603	1,017	0,000	94,778	100,427	82,481	0,060	0,000	82,290	82,671
x1	-4,882	2,035	0,074	-10,532	0,767	-5,613	0,120	0,000	-5,994	-5,231
x2	5,134	2,035	0,065	-0,516	10,783	-	-	-	-	-
x3	-	-	-	-	-	1,660	0,120	0,001	1,279	2,042
x1x3	-7,954	2,035	0,017	-13,604	-2,305	-8,900	0,120	0,000	-9,281	-8,518
x2x3	-	-	-	-	-	2,041	0,120	0,000	1,660	2,422

Fonte: da autora, 2021.

Os efeitos que causaram impacto sobre a temperatura de saída de ar no *overflow* do ciclone, T<sub>3</sub>, foram o tempo de alimentação, a altura do atomizador. A interação x1x3 é o efeito mais significativo apresentado pela análise, esse comportamento pode ser observado na figura 50(b). O comportamento da interação x2x3 se encontra na figura 50(c).

Da mesma forma que analisada na temperatura do topo do leito, a interação entre a tempo de alimentação e altura do atomizador teve efeito de sinal negativo para a temperatura em T<sub>3</sub>, a proximidade da altura do atomizador com o ponto de medida da temperatura no *overflow* associada com o maior tempo de alimentação da solução 25°C, fez a temperatura decair. Já para o nível inferior de X3 o efeito da variação de X1 é o contrário, ou seja, o aumento do tempo de alimentação leva a uma tendência sutil de aumento de T<sub>3</sub>. Uma interação positiva é observada entre o tempo de intermitência e a altura do atomizador, se aumentando o tempo de intermitência e aumentando a altura do atomizador, encontramos temperaturas mais altas na saída do ciclone.

Figura 50 - Superfície de resposta para as temperaturas em T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>.



Fonte: da autora, 2021.

## 5.6 IDENTIFICAÇÃO DOS GARGALOS DO PROCESSO E SUGESTÕES DE MELHORIA NA UNIDADE EXPERIMENTAL

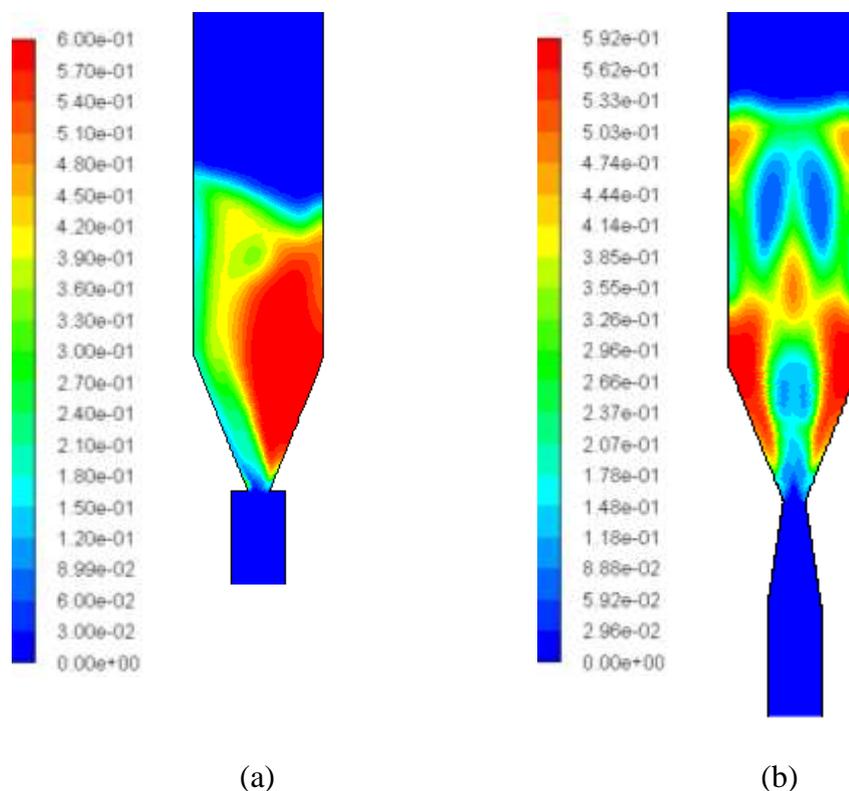
### 5.6.1 Análise de Fluidodinâmica Computacional do leito de jorro

Durante a confecção das curvas características e durante o processo de secagem foi observado que as partículas estavam realizando um movimento tendencioso de jorro para o lado esquerdo do leito, colidindo com a parede. Uma análise fluidodinâmica foi realizada com o intuito de buscar o fator responsável por essa dinâmica. A figura 51 (a) apresenta a simulação realizada com o leito de jorro na CO, que mostra o contorno de fração volumétrica de sólidos. Foi observado que a própria geometria do equipamento faz com que esse movimento ocorra, acredita-se que a curva acentuada da tubulação do ar de entrada ocasiona essa força direcional do ar para o lado esquerdo.

Um estudo realizado por Olazar et al. (1993) destacou que o diâmetro de entrada do ar em leito de jorro é o fator geométrico com maior influência para a fluidodinâmica do equipamento. Eles estudaram diferentes geometrias de entrada que melhorassem o fluxo de partículas inertes dentro do leito. A entrada de ar era inicialmente maior do que a do orifício de entrada do cone e quando partículas pequenas (menores que 6 mm de diâmetro) eram empregadas, o jato de ar projetava as partículas verticalmente, porém derivando da parede do cone e em movimento de rotação. A solução encontrada foi a inserção de um dispositivo de entrada com diâmetro ( $D_0$ ) menor do que o diâmetro de entrada do cone ( $D_1$ ), sendo que a relação  $D_0/D_1$  deve ser entre 0,5 e 0,83. Para o comprimento deste dispositivo verificou-se que a estabilidade era satisfatória quando o tamanho era igual ou superior a 5 vezes o diâmetro de entrada do cone ( $D_1$ ).

Com o intuito de se melhorar o rendimento de recuperação de produto, já que esse fator pode ter influenciado na fração mássica de fertilizante perdida na parede do leito, foi proposta uma mudança na geometria do equipamento, adicionando uma peça na tubulação do ar de entrada do leito de jorro. Desta forma, o fluxo de ar terá uma extensão maior após a curva para se redirecionar ao centro do leito, criando a estabilidade necessária para uma fluidodinâmica padrão, o que pode ser observado na figura 51 (b).

Figura 51 – Contornos de fração volumétrica de sólidos para (a) Leito de jorro originalmente instalado na unidade experimental; (b) Proposta de adição de um tronco de cone para diminuir a turbulência na entrada do leito.



Fonte: da autora, 2021.

## 5.6.2 Proposta de modificações no equipamento

### 5.6.2.1 Controle de temperatura

O controle de temperatura da resistência funciona conforme o esperado, não sendo necessário se realizar alguma troca. Porém, o sensoriamento das temperaturas ao longo da unidade poderia ser melhorado. Atualmente é realizado manualmente por meio de termopares e um multímetro, sendo realizada uma leitura por vez, sem que haja qualquer sistema de armazenamento de dados, impossibilitando a análise simultânea de vários pontos. Existem disponíveis no mercado termopares que possuem até quatro sensores, os quais realizam as medidas sincronizadas e possuem o sistema *data logger*, que registra a média, o maior e menor valor de temperatura durante o tempo de leitura. A figura 52 apresenta uma cotação deste modelo.

Figura 52 – Cotação de termopar com retenção de dados.



Fonte: Amazon, 2021.

Outra forma de se registrar as temperaturas seria acoplando transdutores de temperatura próprios para a conexão com o sistema de aquisição de dados que a unidade possui atualmente. Para isso, seria necessário a construção de uma VI para realizar a leitura utilizando o LabView. Este mecanismo pode armazenar os dados de temperatura ao longo de todo o experimento.

#### 5.6.2.2 Coleta de partículas no ciclone

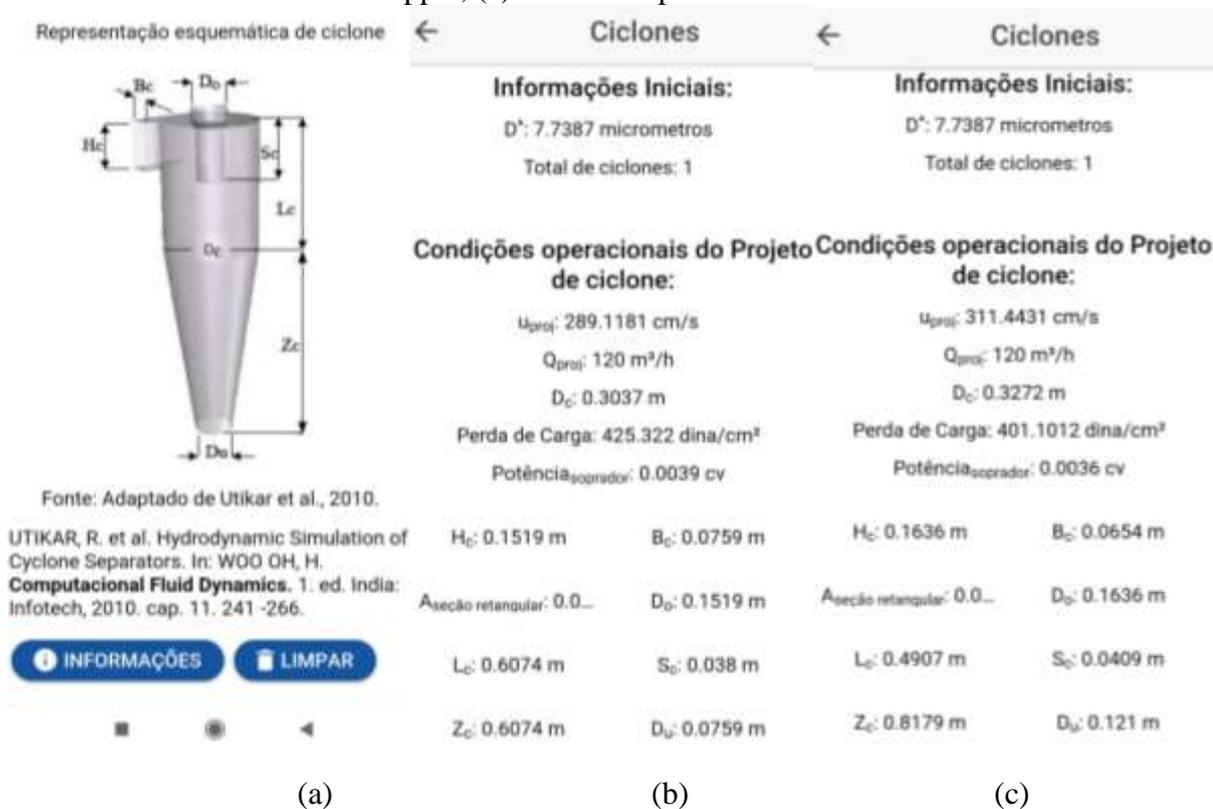
Como demonstrado anteriormente o ciclone atual da unidade não consegue capturar partículas como aquelas observadas na operação de secagem com o leito de jorro. Com o intuito de aprimorar essa coleta, o cálculo de um novo ciclone foi realizado através do app PEIQ. A figura 53 apresenta o *layout* do *app* com uma representação esquemática das medidas gerais de um ciclone (a) e os resultados dos cálculos. Foram estipuladas as mesmas características para o ciclone tipo Lapple (figura 53 b) e Stairmand (figura 53 c).

Para os dois ciclones o  $D^*$  seria de  $7,7 \mu\text{m}$ , com uma vazão de  $120 \text{ m}^3/\text{h}$ . Como as dimensões do ciclone Lapple são menores, pelo custo de construção, ele seria a geometria mais indicada.

Outro ponto a ser melhorado no ciclone seria a perda de temperatura do ar de saída. Como o ciclone é de aço inox, ele perde muita temperatura para o ambiente. Da mesma forma do leito, poderia ser fabricada uma jaqueta de material isolante, que recobrisse o corpo do ciclone, a qual fosse facilmente removível, pois o equipamento é higienizado ao final de cada

experimento. Outra solução seria revestir o ciclone com algum material isolante, como uma borracha ou resina.

Figura 53 – Layout do aplicativo PEIQ com (a) representação do ciclone; (b) resultados para Lapple; (c) resultados para Stairmand.



Fonte: Adaptado PEIQ, 2021.

### 5.6.2.3 Menores vazões de alimentação de solução

Em várias pesquisas de secagem de pastas e soluções em leito de jorro a utilização de pequenas vazões é comum. Butzge, Godoi e Rocha (2013) utilizaram vazões na faixa de 4 mL/min para a secagem de colágeno hidrolisado em leito de jorro. Santos (2016) encontrou 0,8 mL/min como vazão de alimentação ótima em seu sistema, gerando uma eficiência de recuperação de 58,27 %. Larrosa (2012) variou a alimentação entre 1,6 mL/min e 3,6 mL/min, encontrando melhores resultados de secagem para o menor valor.

Para se trabalhar com essas taxas de alimentação seria necessário se adquirir outro modelo de bomba peristáltica, já que a disponível para a unidade experimental possui uma vazão mínima de 19 g/mL.

A figura 51 apresenta a cotação de uma bomba peristáltica US Sólid, modelo M6-3L, que trabalha com a faixa de 0,21 até 3600 mL/min, com velocidade de 0,1 até 6.000 rpm

Figura 54 – Cotação de bomba peristáltica para baixas vazões.



Fonte: Aliexpress, 2021.

#### 5.6.2.4 Troca de material inerte

Em estudos anteriormente realizados por Alberto (2017) foi empregada a secagem do mesmo fertilizante, porém em secador tipo *spray dryer*. A autora encontrou a temperatura de 140°C como uma das condições ótimas de operação. Como as partículas inertes de PEBD possuem um ponto de fusão acima de 110°C, a condição descrita por Alberto (2017) não pode ser empregada.

A troca das partículas por um material com maior ponto de fusão possibilitaria a manipulação da variável temperatura, como o polipropileno, cuja temperatura de fusão é 160°C.

#### 5.6.2.5 Estudo da altura do atomizador

Como visto anteriormente, a alta proximidade do atomizador com as partículas fez com que a fração mássica retida na superfície dos inertes aumentasse, revelando que nesta região uma altura mais elevada deve ser empregada.

Pela análise realizada sobre a umidade do produto final, a maior altura do atomizador ocasiona uma frágil interação entre a solução/pó e a partícula inerte, sendo o produto arrastado para o ciclone ainda com umidade, o que ressalta que a distância entre eles deve ser menor do que a utilizada.

Desta forma um estudo sobre a altura ótica do atomizador é necessária. Este valor irá depender da altura da fonte de jorro, implicando na carga de partículas e vazão do ar de entrada, da pressão do atomizador assim como das características de atomização da solução

## 6 CONCLUSÃO

A partir das discussões apresentadas neste trabalho e com base nos resultados obtidos pode-se concluir que a unidade experimental para secagem de soluções em leito de jorro com sólidos inertes está em funcionamento, os problemas operacionais ocorridos durante os experimentos de secagem foram corrigidos e possíveis melhorias estruturais foram mapeadas, com o intuito de alcançar futuras eficiências com maior nível de recuperação de produto.

A caracterização do PEBD como sólido inerte o classificou como adequado para o processo de granulação por secagem em leito de jorro, uma vez que o ângulo de contato entre o material e a solução ficou dentro da faixa estipulada na literatura, de 70° a 90°.

A instrumentação da unidade foi realizada por meio de um sistema de aquisição de dados acoplados a transdutores de pressão. Os equipamentos foram calibrados para registrar eletronicamente informações, sendo possível se realizar medidas das flutuações de queda de pressão do leito e vazão de ar de entrada. Os parâmetros de programação do controlador de temperatura foram regulados para as condições operacionais exigidas, assim como o sensoriamento pelo leito e ciclone, não havendo empecilhos durante os experimentos.

Através das curvas características foi possível se eleger a melhor carga de inerte para o processo dentre as massas escolhidas. A quantidade de 1 quilo foi escolhida por apresentar a melhor estabilidade fluidodinâmica para as geometrias do leito de jorro utilizado. As correlações preditas na literatura se aproximaram dos valores observados quando as faixas de geometria e operação estavam dentro das condições de contorno estipuladas.

As variáveis fixas do processo foram definidas conforme a literatura e limitações do equipamento, a vazão da solução de alimentação foi estabelecida como a mínima possível, a pressão do atomizador recomendada para a secagem de soluções com PEBD e a vazão do ar de alimentação como 1,2 da velocidade de jorro mínimo.

Foi realizado um balanço de massa entre as regiões ao longo do equipamento para mapear as frações de fertilizantes perdida, esses dados foram analisados estatisticamente e as variáveis estudadas (altura do atomizador, tempo de intermitência e tempo de alimentação) apresentaram efeitos significativos sob as regiões de parede do leito, filtro no *overflow* e superfície dos inertes. A altura do atomizador foi a variável que influenciou todas as regiões, porém o tempo de intermitência teve maior efeito sobre as frações aderidas no filtro e parede do leito.

As principais respostas dos experimentos foram a umidade, o rendimento e a produtividade, a análise estatística mostrou que a umidade sofreu efeito de todas as variáveis, sendo a maior influência a altura do atomizador, seguida da intermitência e depois o tempo de alimentação. A umidade dos produtos finais ficou entre 9 e 20%, o que são valores aceitáveis para a legislação de fertilizantes organominerais.

Os valores de rendimento e produtividade na melhor condição, 26,6% e 1,59 g/h respectivamente, são considerados baixos em comparação com a literatura para secagem em leito de jorro, porém valores ainda menores já foram encontrados em trabalhos sobre secagem de soluções de vegetais. A análise estatística mostrou que o tempo de intermitência influencia nas duas respostas, seguido da altura do atomizador para o rendimento.

O estudo das flutuações do leito apontou que a queda de pressão aumenta com o tempo de alimentação da solução no leito, devido à maior interação entre fluido-partícula, e a interação entre um maior tempo de intermitência e altura do atomizador levou a um aumento da queda de pressão.

O sensoriamento da temperatura ao longo do equipamento foi outro fator abordado, pode-se concluir que apesar da expressiva queda de temperatura no centro do leito durante os períodos de alimentação terem sido observados, essa diminuição não apresentou influência significativa da variável em sua média, pois como o local é próximo da entrada de ar quente do sistema, a temperatura era rapidamente restaurada. Porém consequências significativas foram encontradas nas temperaturas de topo do leito e *overflow* do ciclone, em ambas o tempo de alimentação teve efeito com sinal negativo, indicando que quanto maior o tempo de alimentação, menor a temperatura nos locais. A interação desta variável com a altura do atomizador também foi importante, já que um tempo maior de alimentação associado com a maior altura do atomizador (o qual ficava mais próximo dos sensores) fez com que a temperatura também decaísse.

As caracterizações comparativas entre o fertilizante *In Natura* e após o processo de secagem trouxe resultados animadores para o trabalho. A intenção de impor esse processo de secagem sobre o fertilizante teve o objetivo de modificar o seu arranjo estrutural, deixando-o mais amorfo e conseqüentemente aumentando sua solubilidade. Por certo esse fato ocorreu, já que a distribuição granulométrica do fertilizante mudou, tendo um aumento de 7,5% em seu diâmetro médio de Sauter. Pelas análises de DRX podemos observar uma diminuição da cristalinidade

do fertilizante, deixando-o mais amorfo e o teste de solubilidade realizado observou um aumento de 69% desta característica no pó após a secagem.

A análise fluidodinâmica computacional realizada conseguiu identificar a causa do movimento tendencioso das partículas para o lado esquerdo da parede do leito. Foi proposta uma modificação na tubulação do ar de entrada para trabalhos futuros, essa mudança redireciona o fluxo do ar para o centro do leito, fazendo com que as partículas trabalhem no movimento tradicional do leito de jorro.

Foi observado que uma parcela significativa do pó gerado estava sendo elutriada para fora do ciclone, por essa razão se adicionou um filtro de manga com malha de 200 mesh no bocal do *overflow*, desta forma pode se contabilizar a quantidade das partículas que estavam sendo perdidas. Através da distribuição granulométrica do pó secado foi possível se projetar um novo ciclone que atenda os requisitos para a coleta desse material de menor dimensão.

Outras propostas de melhorias também foram citadas, como a adição de um monitoramento de temperatura com *data logger* ou a instalação sensores que fazer conexão com o sistema de aquisição de dados, criando um melhor acompanhamento da temperatura ao longo do equipamento. A troca da bomba atual, que possui uma vazão mínima de alimentação muito alta para o processo de leito de jorro, por uma de menor vazão. E a proposta de se estudar a melhor altura do bico de atomização, já que como visto pelas análises estatística uma variável de forte influência em praticamente todas as respostas.

## REFERÊNCIAS

ADEODATO, M. G. **Análise da fluidodinâmica de leito de jorro durante o recobrimento de partículas**. 2003. 179 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

ALBERTO, L. **Granulação de fertilizante foliar por spray dryer, na perspectiva de projeção em escala industrial**. 2017. Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Uberaba/MG, Brasil. 2017.

ALIEXPRESS. **Bomba peristáltica industrial sólida: 0.211 - 3600 ml/min. 0.211 - 3600 ml/min**. 2021. Disponível em:  
[https://pt.aliexpress.com/item/32810144920.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.43c042d4CborQI&algo\\_pvid=bd40bb8b-6cb4-4edc-8ca6-1575de1ef9e9&aem\\_p4p\\_detail=20211115131711499184938851810083154675&algo\\_exp\\_iid=bd40bb8b-6cb4-4edc-8ca6-1575de1ef9e9-3&pdp\\_ext\\_f=%7B%22sku\\_id%22%3A%2266313053318%22%7D](https://pt.aliexpress.com/item/32810144920.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.43c042d4CborQI&algo_pvid=bd40bb8b-6cb4-4edc-8ca6-1575de1ef9e9&aem_p4p_detail=20211115131711499184938851810083154675&algo_exp_iid=bd40bb8b-6cb4-4edc-8ca6-1575de1ef9e9-3&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2266313053318%22%7D). Acesso em: 18 out. 2021.

ALMEIDA, H. **Métodos para o Incremento da Solubilidade de Substâncias , Activas Pouco Solúveis**, Trabalho de projeto, Universidade de Lisboa, Mestrado em Farmacotecnia Avançada, Lisboa, Portugal

ALMEIDA, N. P.. **Fluidodinâmica da mistura de bagaço de malte e areia em leito de jorro cônico**. 2018. 32 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2018.

AMAZON. **Tomshin Termômetro digital tipo K de 4 canais Sensor termopar -50~1350 ° C / -58~2462 ° F: função de retenção de dados. Função de retenção de dados**. 2021. Disponível em: [https://www.amazon.com.br/Tomshin-Term%C3%B4metro-termopar-50-1350-58-2462/dp/B09F9X2VXZ/ref=asc\\_df\\_B09F9X2VXZ/?tag=googleshopp00-20&linkCode=df0&hvadid=379748352448&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=2320627279448190119&hvpone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmld=&hvlocint=&hvlocphy=1001589&hvtargid=pla-1437952256051&psc=1](https://www.amazon.com.br/Tomshin-Term%C3%B4metro-termopar-50-1350-58-2462/dp/B09F9X2VXZ/ref=asc_df_B09F9X2VXZ/?tag=googleshopp00-20&linkCode=df0&hvadid=379748352448&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=2320627279448190119&hvpone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmld=&hvlocint=&hvlocphy=1001589&hvtargid=pla-1437952256051&psc=1). Acesso em: 15 nov. 2021.

ARAÚJO D.S.; DUARTE, C. R. **Avaliação Da Influência De Malhas Computacionais Na Previsão Da Condição De Jorro Mínimo Em Leito De Jorro**. VIII Encontro interno XII Seminário de iniciação científica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberlândia,

2008.

ARAÚJO, B. S. A.; SANTOS, K.G.. CFD Simulation of Different Flow Regimes of the Spout Fluidized Bed with Draft Plates. **Materials Science Forum**, [S.L.], v. 899, p. 89-94, jul.

2017. Trans Tech Publications, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.899.89>.

Bacelos, MS; Neto, PIS; Silveira, AM; Freire, JT. Analysis of fluid dynamics behavior of conical spouted bed in presence of pastes . **Drying Technology**, v. 23, p. 427-453, 2005.

BARCELOS, M.S. **Análise do comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro com misturas de tamanho de partículas**. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

BARROS, J. P. A. A. **Acúmulo, elutriação e recuperação do produto na secagem de pasta em leito de jorro**. 2018. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

BARROS, J. P. A. A.; FREIRE, J. T.. Análise do balanço de massa e da distribuição das partículas do pó na secagem de pasta em leito de jorro. In: COTIAN., Luís Fernando Paulista (ed.). **Engenharias, Ciência e Tecnologia**. Ponta Grossa: Atena, 2019. Cap. 1. p. 1-17.

BIO SUL (org.). **Por que usar fertilizante foliar?** 2020. Disponível em: <https://www.biosul.com/noticia/por-que-usar-fertilizante-foliar->. Acesso em: 15 out. 2021.

BITTI, M.T. **Avaliação das condições operacionais na taxa de evaporação de água em leito de jorro**. Dissertação de mestrado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

BORGES, H. As dez empresas que controlam o mercado mundial de fertilizantes. **O Globo**, 2019. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/sociedade/as-dez-empresas-que-controlam-mercado-mundial-de-fertilizantes-23040071>. Acesso em: 15/07/2019

BORGES, L. P., BÉTTEGA R. **Simulação do comportamento hidrodinâmico de um leito de jorro: comparação entre método dos elementos discretos (dem) e modelo de dois fluidos (TFM)**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos/SP. Brasil.

BORINI, G. B.; ANDRADE, T. C.; FREITAS, L. A. P. **Hot melt granulation of coarse BR FÉRTIL. A história do fertilizante**. 2017. Disponível em:<http://brfertil.com.br/historia-do-fertilizante/>. Acesso em: 21/06/2019

BRAGA, M. B.. **Obtenção de mistura leite-amora preta em pó por secagem em leito de jorro**. 2014. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

Braga, MB; Rocha, SCS. Drying of milk-blackberry pulp mixture in spouted bed. **Canadian Journal Of Chemical Engineering**, v. 91, p. 1786-1792, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa MAPA nº 25, de 23 de julho de 2009. **Diário Oficial da União**: Brasília, 2009.

BRASQUÍMICA. **O que são fertilizantes foliares?** 2017. Disponível em: <http://brasquimica.ind.br/o-que-sao-fertilizantes-foliares>. Acesso em: 13/07/2019

BUTZGE, J. J.; GODOI, F. C.; ROCHA, S. C. S.. Secagem De Colágeno Hidrolisado Em Leito De Jorro: Estudo Da Eficiência Do Processo. In: Congresso Brasileiro De Sistemas Particulados, 36., 2013, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: Enemp, 2013. p. 1-11.

BUTZGE, J. J.; SILVA, C. A. M. da; COSTA, R. G.; TARANTO, O. P.. Estudo dos sinais de flutuação de pressão durante o umedecimento de inertes em leito de jorro. In: Congresso Brasileiro De Engenharia Química, 19., 2012, Búzios. **Anais [...]**. Búzios: Cobec 2012, 2012. p. 1-11.

CARAM R, **Estrutura e propriedade dos materiais** – Análise da estrutura cristalina, Unicamp. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~caram/analise.pdf>. Acesso 25/07/2019

CHRIST, D. **Secagem de clara de ovo em leito de jorro fluidizado bidimensional**. Tese apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP, Brasil. 2006.

Collares, FP; Finzer, JRD; Kieckbusch, TG. Glass transition control of the detachment of food pastes dried over glass plates. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 261-267. 2004.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; MARIA, L. C. Santa. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 13, p. 1-13, 2003. Pallai Nemeth (1969),

CREMASCO, M. A. (2012) **Operações Unitárias em sistemas particulados e fluido-mecânicos**. Blucher.

CULTURA MIX. **Fertilizantes Foliares**. 2021. Disponível em: <https://flores.culturamix.com/dicas/fertilizantes-foliares>. Acesso em: 15 out. 2021.

da Cunha, RL; de la Cruz, AG; Menegalli, FC. Effects of operating conditions on the quality of mango pulp dried in a spout fluidized bed. **Drying Technology**, v. 24, p.423-432, 2006.

DANTAS, T.N.P. **Influência das propriedades físicas de graviola e aditivos na secagem em leito de jorro com alimentação intermitente**. Tese de Doutorado, UFRN, Pós-Graduação em Engenharia Química-PPGEQ. Natal/RN, Brasil. 2018.

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodo de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio**. 2002. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

DELBET, P. - *L'Agriculture et La Santé, Editeur, LA VIE CLAIRE*, 1946

DESENVOLCIMENTO RURAL, **Fertilizantes Granulado ou Líquido: Prós e Contras na Agricultura**. Disponível em: <<https://desenvolvimentorural.com/fertilizantes-granulado-ou-liquido/>>. Acesso em: 14 jul. 2019.

DIAS, V. P.; FERNANDES, E. **Fertilizantes: uma visão global sintética**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 24, p. 97-138, set. 2006.

DONIDA, M. W. **Análise das influências das características do sólido e da suspensão no processo de recobrimento em leito de jorro**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004. Tese (Doutorado).

Dotto, Guilherme L.; Souza, Vanderlei C.; Pinto, Luiz A. A. Drying of chitosan in a spouted bed: The influences of temperature and equipment geometry in powder quality. **Lwt-Food Science and Technology**, v. 44, p. 1786-1792, 2011.

ENGEL, B. ; BACCAR, N. M.; MARQUARDT, L.; ROHLFES, A. L. B.. Emprego de Spray Dryer na indústria de alimentos: uma breve revisão. **Revista Jovens Pesquisadores**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 02, 6 jul. 2017. APESC - Associação Pro-Ensino em Santa Cruz do Sul. <http://dx.doi.org/10.17058/rjp.v7i2.9824>.

FAGERIA, N. K. *et al.* Foliar fertilization of crop plants. **Journal of plant nutrition**, v. 32, n. 6, p. 1044-1064, 2009.

FERNANDES, C. **Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leito de jorro**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade de São Carlos. São Carlos/SP. Brasil.2005.

FERNÁNDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. **Adubação Foliar: fundamentos científicos e técnicas de campo**. São Paulo: Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal, 2015. 150 p.

Freire, JT; Ferreira, MC; Freire, FB; Nascimento, BS. A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium. **Drying Technology**, v. 30, p.330-341, 2012.

GINIFAB. **Transferidor Online**. 2021. Disponível em: [https://www.ginifab.com/feeds/angle\\_measurement/online\\_protractor.pt.php](https://www.ginifab.com/feeds/angle_measurement/online_protractor.pt.php). Acesso em: 24 out. 2021

GOWARIKER, V. ; KRISHNAMURTHY, V.N. DHANORKAR, M. PARANJAPE, K. **The Fertilizer Encyclopedia**. Canada. 2009.

INSTRUCAMP. **Transmissores de pressão Dwyer**. Disponível em: <<http://www.instrucamp.com.br/index.php?src=produtos&categoria=124>>. Acesso em: 24 ago. 2019.

KESSLER, M. **Fluidodinâmica computacional: o que é**. Disponível em< <http://www.esss.com.br/blog/2016/06/fluidodinamica-computacional-o-que-e/>>Acessado dia 15/06/2019.

KUDRA, T.; MUJUM AR, A. S. **Special Drying Technologies**. 2a edição, CR Pr ss -Taylor & Francis Group, Boca Raton - EUA, 2009 [https / doi.org / 10.1201/9781420073898](https://doi.org/10.1201/9781420073898)

LARROSA, A. P. Q. **Secagem de pasta de vegetais: análise da operação em leito de jorro e caracterização do produto final**. 2012. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Alimentos, Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, 2012.

LEU, L; PAN, R. S. Pressure Fluctuations in Jet Spouted Beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 82, p. 1044-1047, 2004.

LIMA, C. A. P.. **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro: estudos do desempenho de um jorro tradicional**. 1993. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1993.

LUKIN K, **Lei de Bragg e Difração**, Instituto de Física da UFRGS. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis01101/home.html>. Acesso em: 25/06/2019.

MACHADO, I. P.; DELMIRO, T. M.; MACHADO, A.K.T.; MEDEIROS, M. F. D. Secagem em leito de jorro da mistura graviola e leite. Avaliação dos efeitos das variáveis de operação

sobre parâmetros de produção, taxa de secagem e eficiência térmica. CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 15, São Carlos: ENEMP, 2015. p. 1-10.

MARKOWSKI, A. S. Drying Characteristics in a Jet spouted Bed Dryer, **Can. J. Chem. Eng.**, v. 70, n. 5, p. 938, 1992.

Marmo, L. Low temperature drying of pomace in spout and spout-fluid beds. **Journal Of Food Engineering**, v. 79, p. 1179-1190. 2007.

Marreto, RN; Freire, JT; Freitas, LAP. Drying of pharmaceuticals: The applicability of spouted beds. **Drying Technology**, v. 24, p.327-338, 2006.

MARTINELLI, L. **Construção e desenvolvimento de um secador de leite pulso-fluidizado para secagem de pastas e polpa**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto/ SP, Brasil, 2008.

MATIOLI, Thaís Fagundes. **Adubação foliar é uma prática que funciona?** 2019. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/adubacao-foliar/>. Acesso em: 15 out. 2021.

Medeiros, MFD; Rocha, SCS; Alsina, OLS; Jeronimo, CEM; Medeiros, UKL; da Mata, ALML Drying of pulps of tropical fruits in spouted bed: Effect of composition on dryer performance. **Drying Technology**, v. 20, p. 855-881, 2002.

Ministério Da Agricultura, Pecuária E Abastecimento. **Nº 61**: Instrução Normativa Nº 61, DE 8 DE JULHO DE 2020. 134 ed. Diário Oficial da União, 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/instrucao-normativa-n-61-de-8-de-julho-de-2020-266802148>. Acesso em: 14 nov. 2021.

MITRE, J. F. **Introdução à Fluidodinâmica Computacional**. Niterói, RJ, 2018. 108 slides. Disponível em: <http://www.professores.uff.br/mitre/wp-content/uploads/sites/146/2017/09/CFD.pdf>. Acesso em: 13/08/2019

MOCELLIN, R. S. P.. **PRINCÍPIOS DA ADUBAÇÃO FOLIAR**: coletânea de dados e revisão bibliográfica. Canoas: Omega Fertilizantes, 2004. 83 p.

MORAES FILHO, F. C.. **Avaliação da aplicação de modelos para secagem de pastas e suspensões em leito de jorro com alimentação contínua**. 2013. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

MULTI TECNICA. **Fertilizantes: Conheça um pouco da sua história.** 2018. Disponível em: <http://blog.multitecnica.com.br/historia-dos-fertilizantes>. Acesso em: 21/06/2019

NARIMATSU, C. P.. **Contribuições ao estudo da secagem em um leito pneumático vertical.** 2004. 284 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

NASCIMENTO, A.E.G. - **Estudo da molhabilidade de superfícies de parafina e aço inoxidável por soluções de tensoativos não iônicos.** Tese de Doutorado, UFRN, Programa de Pós- graduação em Engenharia Química, Natal/RN, Brasil 2015.

NASCIMENTO, L. D.. **Caracterização, análise fluidodinâmica e secagem de sementes de painço em leito de jorro.** 2014. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

NIELSSON, F. T. **Manual of Fertilizer Processing.** Estados Unidos: [s.n.].

NUNES, J. L. S. **Nutrientes.** 2016. Disponível em:[https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/nutrientes\\_361443.html](https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/nutrientes_361443.html). Acesso em: 22/06/2019.

OLAZAR, M.; JOSE, M.J. San; AGUAYO, A. T.; ARANDES, J. M.; BILBAO, J.. Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Bilbao, v. 31, n. 7, p. 1784-1792, 4 mar. 1992.

OLIVEIRA, A. C. F.; FERRETO, H. F. R.; PARRA, D. F.; LUGÃO, A. B.. Estudo Comparativo De Dois Métodos De Análise De Cristalinidade, Raios-X E Dsc, Usando O Polietileno Linear De Baixa Densidade (Pebdl) Injetado,. In: Congresso Brasileiro De Polímeros, 13., 2015, Natal. **Anais [...]** . Natal: CBPol, 2015. p. 1-5.

OLIVEIRA, E. G.. **Secagem de Spirulina platensis:** análises das técnicas de leito de jorro e camada delgada. 2006. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Alimentos, Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, 2006.

Oliveira, EG; Rosa, GS; Moraes, MA; Pinto, LAA. Phycocyanin content of Spirulina platensis dried in spouted bed and thin layer. **Journal of Food Process Engineering**, v. 31, p. 34-50. 2008

OMOTTA, 2015. **Vidro, líquido ou sólido?** Disponível em: <<https://omottablog.wordpress.com/2016/11/05/vidro-liquido-ou-solido-por-fisicool/>>.

Acesso em: 6/08/2019.

PAIXÃO, A. E. A.. **Modelagem do transporte pneumático vertical em fase diluída: aplicações em transferências de calor e secagem**. 1995. 275 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Engenharia Química, Engenharia de Processos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

Passos, ML; Masarani, G; Freire, JT; Mujumdar, AS. Drying of pastes in spouted beds of inert particles: Design criteria and modelling. **Drying Technology**, v. 15, p.605-624, 1997.

PEREIRA, T. S.. **Estudo da secagem de polpa de juá (ziziphus joazeiro) em leito de jorro e sua aplicação em barras de cereais**. 2020. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

PERES, A. DE P. **Técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) aplicadas a escoamentos em ciclones**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2002.

**Pharmaceutical Powders in a Spouted Bed**. Powder Technology, Lausanne, v. 189, p. 520-529. **Estrutura dos Sólidos – Introdução à Ciência dos Materiais para a Engenharia – 2005**. Disponível em: [http://sites.poli.usp.br/d/pmt2100/Aula02\\_2005%201p.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pmt2100/Aula02_2005%201p.pdf). Acesso em: 18/07/2019

PPGEQ, S. **Laboratório de Leito de Jorro**. Disponível em: <http://www.ppgeq.feq.ufu.br/laboratorios-de-pesquisa/laboratorio-de-leito-de-jorro>. Acesso em: 25/07/2019

REETZ, H. F. **Fertilizantes e seu Uso Eficiente**. Tradução: Alfredo Scheid Lopes. Paris, França, Maio 2016.

REZENDE, Álvaro Vilela de. **Adubação da soja em áreas de Cerrado: micronutrientes**. Planaltina: Embrapa, 2004. 27 p.

ROCHA, S. C. S.; DONIDA, M. W.; MARQUES, A. M. M.. Liquid-particle surface properties on spouted bed coating and drying performance. **The Canadian Journal Of Chemical Engineering**, [S.L.], v. 87, n. 5, p. 695-703, 22 set. 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/cjce.20208>.

ROCHA, T. A. F.; FREIRE, J. T.. Secagem da borra de café. In: FREIRE, José Teixeira; ALBINI, Geisa. **Tópicos especiais em sistemas particulados**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2019. Cap. 6. p. 145-169.

ROESLER P. H., **Lei de Bragg para cristalografia**. Disponível em:

[https://www.youtube.com/watch?v=OInxR2Gu\\_sI](https://www.youtube.com/watch?v=OInxR2Gu_sI). Acesso em: 25/07/2019

ROSA, G. S.. **Recobrimento de uréia em leite de jorro para minimizar as perdas de nitrogênio por volatilização**. 2010. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

RURAL PECUÁRIA. **Nutrição mais eficiente através da adubação foliar**. 2021.

Disponível em: <https://ruralpecuaria.com.br/tecnologia-e-manejo/agricultura/nutricao-mais-eficiente-atraves-da-adubacao-foliar.html>. Acesso em: 15 out. 2021.

SANTOS, K. G. **Estudo da fluidodinâmica do leite de jorro por CFD com malhas tridimensionais**. 2008. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SANTOS, R. F. **Fertilizantes foliares: Quando, como e porque utilizar**: fertilizantes foliares: veja se realmente compensa a aplicação, entenda o que são, como funcionam, quando aplicar e mais! Fertilizantes foliares: veja se realmente compensa a aplicação, entenda o que são, como funcionam, quando aplicar e mais. 2020. Disponível em:

<https://www.agrotecnico.com.br/fertilizantes-foliares/>. Acesso em: 15 out. 2021.

SCHAFFKA, F. T. S.. **Análise fluidodinâmica e térmica do processo de secagem de suspensão diluída em leite fluidizado**. 2017. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SEVERINO, F. J. **Agricultura no século 21**. 2001. Disponível em:

[https://www.agrolink.com.br/colunistas/a-agricultura-do-seculo-21\\_383433.html](https://www.agrolink.com.br/colunistas/a-agricultura-do-seculo-21_383433.html). Acesso em: 25/08/2019

SHAMES, I. H. (1973) **Fluidodinâmica computacional e suas aplicações**. Disponível em <http://br.monografias.com/trabalhos/fluidodinamica/fluidodinamica.shtml>. Acessado em: 20/08/2019.

SILVA, A. G. P. **Análise experimental da secagem do corante hidrossolúvel de urucum (Bixa orellana L.) Em leite de jorro**. 2016. 103 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016

- SILVA, M.F.F. **Agricultura Biológica: Estratégia Sustentável de Promoção da Saúde Pública**. Dissertação de Mestrado em Agricultura Biológica, Politécnico de Coimbra, Escola Superior Agrária de Coimbra (ESAC), Coimbra, Portugal, 2018.
- SILVA, N. C.. **Uso de metodologias alternativas na secagem de diferentes materiais visando a preservação de compostos bioativos**. 2019. 209 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- SOARES, S. C. M. D.. **Secagem das polpas de acerola (*Malpighia emarginata* DC) e goiaba (*Psidium guajava* L.) Em leito de jorro: efeitos da adição do leite e da proteína do leite no desempenho do processo e caracterização do produto em pó**. 2019. 112 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.
- SOUSA, S. L.. **Aplicação Do Processo De Secagem Em Leito De Jorro Para Obtenção De Suco De Caju Em Pó**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- SOUZA, C. R. F. **Estudo comparativo da produção de extrato seco de *Bauhinia forficata* Link pelos processos *spray-dryer* e leito de jorro**. 2003. 280p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, USP, Ribeirão Preto – SP, 2003.
- STRUMILLO, C. Z.; KUDRA, T. (1986). *Drying: Principles, Applications and Design*. In Hughes, R. Topics in Chemical Engineering. v.3, UK: Gordon and Breach Science Publisher.
- SYAMAL, A. **Living Science Chemistry** – Class 10. 2 ed. Ratna Sagar. 2008.
- Tacon, LA; Freitas, LAP. Paste residence time in a spouted bed dryer. III: Effect of paste properties and quality interactions. **Drying Technology**, v. 25, p. 841-852, 2007.
- Tacon, LA; Freitas, LAP. Paste Residence Time in a Spouted Bed Dryer. IV: Effect of the Inert Particle Size Distribution. **Drying Technology**, v. 29, p. 1662-1672, 2011.
- THERMA. **Transmissor de pressão diferencial**. Disponível em:  
<<https://www.therma.com.br/transmissor-pressao-diferencial>>. Acesso em: 15 ago. 2019.
- TRINDADE, A. L. G. **Nova técnica de concentração do licor negro para produção do combustível sólido**. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Escola de Engenharia da UFMG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- UNIDO, U. N. I. D. O.; IFDC, I. F. D. C. **Fertilizer Manual**. 2. ed. Holanda: [s.n.].

USTRA, L.A.R. **Secagem de grãos de arroz em leito fluidizado**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Programa de Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial, Pelotas/ RS, Brasil, 2005.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKRA. W. *An introduction to computational fluid dynamics* (2ed.), 2007.

VERTALT. **Adubação: aplicação de adubo foliar ou granulado**. Disponível em: <<https://www.vertalt.com.br/adubacao-aplicacao-de-adubo-foliar-ou-granulado/>>. Acesso em: 19 jul. 2019.

ZANUTTO, C. P. **Aplicação De Técnicas De Fluidodinâmica Computacional ( Cfd) Na Avaliação Da**. 2015.

## APÊNDICES

Tabela 31 - Parâmetros de programação de processo do controlador de temperatura.

Display	Descrição	Ajuste	Default utilizado
SPt	Set point da temperatura de trabalho.	F06 a F07	120
tPO	Tempo programado do temporizador.	000 a 999	030
F 01	Modo de funcionamento do controlador: 000 – modo elétrico 001 – modo a gás 002 – modo a lenha	000 a 002	000
F 02	Tempo da saída de ignição acionada. (somente se F01=001)	02 a 20 seg.	000
F 03	Tempo de intervalo entre acionamentos da saída de ignição. (somente se F01=001)	01 a 10 seg.	000
F 04	Número de tentativas de ignição. (somente se F01=001)	01 a 05	000
F 05	Histerese do controle de temperatura. É a diferença entre desligar e religar a refrigeração	001 a 020°C	005
F 06	Bloqueio inferior de temperatura da programação do set point. Limite para regulagem de temperaturas muito baixas do set point	-25°C a F07	25
F 07	Bloqueio superior de temperatura da programação do set point. Limite para regulagem de temperaturas muito altas do set point.	F06 a 700°C	150
F 08	Offset da temperatura indicada. Possibilita compensar eventuais desvios na leitura da temperatura ambiente.	-15°C a 015°C	000
F 09	Temperatura mínima para liberação do vapor. A saída do vapor não será acionada enquanto a temperatura não atingir este valor.	-25°C a F07	000
F 10	Tempo mínimo de intervalo entre acionamentos do vapor através	000 a 255 min	000
F 11	Escala de tempo do temporizador: 000 – Escala em segundos. 001 – Escala em minutos. 002 – Escala em horas.	000 a 002	001
F 12	Tipo de cronômetro: 000 – Regressivo. 001 – Progressivo.	000 ou 001	000
F 13	Tipo de reset do temporizador: 000 – Reset manual. O reset é efetuado manualmente através da tecla 001 – Reset automático por tempo. O reset é efetuado automaticamente após o tempo de reset programado.	000 ou 001	000
F 14	Tempo para efetuar o reset automático. (somente F13=001)	00 a 255 seg	005
F 15	Disparo do temporizador: 000 – Manual. A temporização será iniciada pelo acionamento da Tecla. 001 – Ao energizar o controlador. Quando o controlador for energizado a temporização será iniciada. 002 – Ao atingir o set point da temperatura de trabalho. Nos modos 001 e 002 a tecla somente desativam o temporizador.	000 a 002	000
F 16	Disparo do controle de temperatura: 000 – Ao energizar o controlador. Quando o controlador for energizado o controle de temperatura será iniciada. 001 – Ao ativar o temporizador. Quando o temporizador for ativado o controle de temperatura será iniciada. A combinação F15=002 e F16=001 deve ser evitada, pois causará funcionamento indesejado do controlador	000 ou 001	000
F 17	Funcionamento do controle de temperatura após o final da contagem do tempo do temporizador. 000 – Mantém o controle de temperatura habilitado. 001 – Desabilita o controle de temperatura.	000 ou 001	000

F 18	Armazena o maior valor de temperatura registrada pelo sensor de temperatura durante o funcionamento do controlador. Este parâmetro não pode ser alterado, somente pode ser restaurado pressionando as teclas e por 10 segundos enquanto o parâmetro é exibido no display.	-25°C a 700°C	-
F 19	Armazena o número de vezes que a temperatura ultrapassou o valor de F07 durante o funcionamento do controlador. Este parâmetro não pode ser alterado, somente pode ser restaurado pressionando as teclas e por 10 segundos enquanto o parâmetro é exibido no display.	000 a 999	000
F 20	Uso da senha para o nível 1 (parâmetros de processo da programação). 000 – Não utiliza senha no nível 1. 001 – Utiliza senha no nível 1.	000 ou 001	000

Fonte: da autora, 2021.

Tabela 32 - Condições de operação e propriedades das partículas.

Símbolo	Propriedade	Valor
$D_c$ [m]	Diâmetro do cilindro	0,12
$D_0$ [m]	Diâmetro de entrada	0,02
$H_c$ [m]	Altura cônica	0,125
$H$ [m]	Altura da parte cilíndrica	0,73
$H_0$ [m]	Altura do leito estático para todas as cargas de inertes estudadas, de 200g à 1,5kg	0,10; 0,12; 0,135; 0,15; 0,225; 0,305
$\gamma$	Ângulo do cone	40°
$\rho$ [kg.m <sup>3</sup> ]	Densidade do fluido a 100°C	1,2754
$\rho_p$ [kg.m <sup>3</sup> ]	Densidade da partícula	899,4
$\mu$ [kg/m.s]	Viscosidade dinâmica do fluido a 100°C	2,182E-05
$d_p$ [m]	Diâmetro das partículas [m]	0,004704
$\epsilon_0$	Porosidade do leito	0,39

Fonte: da autora, 2021.

Tabela 33 -Correlações preditas para Velocidade Jorro Mínimo

Massa de partículas	Correlações preditas para $q_{jm}$	
	Muklenov & Gorshtein (1965)	Tsvik <i>et al.</i> (1967)
200 g	5,68	9,63
300 g	6,82	12,08
400 g	7,67	13,97
500 g	8,53	15,92
1 kg	12,79	26,33
1,5 kg	17,34	38,39

Fonte: da autora, 2021.

Tabela 34 - Correlações preditas para Queda de Pressão de Jorro Mínimo

Massa de partículas	Correlações preditas para $-\Delta P_{jm}$			
	Muklenov & Gorshtein (1965)	Olazar <i>et al.</i> (1993)	Pallai & Nemeth (1969)	Sampaio (1978)
200 g	779,07	491,52	396,37	588,21
300 g	848,77	593,27	475,64	705,85
400 g	897,08	673,82	535,10	794,08
500 g	942,62	758,16	594,55	882,31
1 kg	1140,51	1195,99	891,83	1323,47
1,5 kg	1315,82	1687,61	1208,92	1794,03

Fonte: da autora, 2021.

Tabela 35 - Correlações preditas para Queda de Pressão Máxima.

Massa de partículas	Correlações preditas para $-\Delta P_{MÁX}$		
	Olazar <i>et al.</i> (1993)	Pallai & Nemeth (1969)	Saldarriaga (2017)
200 g	458,71	537,45	717,40
300 g	550,17	644,94	902,36
400 g	622,13	725,55	1049,39
500 g	697,11	806,17	1203,43
1 kg	1080,13	1209,26	2038,63
1,5 kg	1500,25	1639,21	3027,55

Fonte: da autora, 2021.

Tabela 36 – Matriz das variáveis independentes e das temperaturas ao longo do secador.

Exp.	Fatores			Temperaturas °C							
	$t_{al}$ [s] (x1)	$t_r$ [s] (x2)	$H_A$ [m] (x3)	T0 Máx	T0 Mín	T1 Máx	T1 Mín	T2 Máx	T2 Mín	T3 Máx	T3 Mín
Teste 1	10 (-1)	60 (-1)	0,40 (-1)	110	104	105	75	100	80	82	76
Teste 2	30 (+1)	60 (-1)	0,40 (-1)	100	72	105	68	110	68	86	81
Teste 3	10 (-1)	300 (+1)	0,40 (-1)	107	102	100	93	96	95	79	75
Teste 4	30 (+1)	300 (+1)	0,40 (-1)	112	106	107	78	105	78	83	68
Teste 5	10 (-1)	60 (-1)	0,68 (+1)	110	107	108	43	106	71	93	70
Teste 6	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)	112	106	102	39	98	63	80	66
Teste 7	10 (-1)	300 (+1)	0,68 (+1)	111	107	111	66	107	78	92	74
Teste 8	30 (+1)	300 (+1)	0,68 (+1)	110	107	103	35	98	63	78	62

Fonte: da autora, 2021.