

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**Robson Costa de Sousa**

**SECAGEM DE MATERIAIS PASTOSOS E GRANULARES NO LEITO  
DE JORRO MECÂNICO E CONVENCIONAL**

**São Carlos - SP**

**2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**Robson Costa de Sousa**

**SECAGEM DE MATERIAIS PASTOSOS E GRANULARES NO LEITO  
DE JORRO MECÂNICO E CONVENCIONAL**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**Orientador:** Prof. Dr. José Teixeira Freire

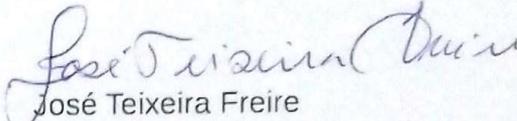
**Co-orientador:** Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

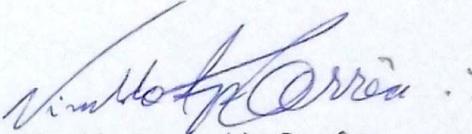
**São Carlos – SP**

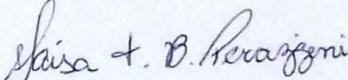
**2017**

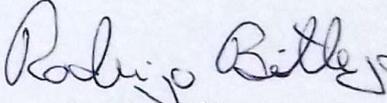
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE TESE DE ROBSON COSTA DE SOUSA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 02 DE JUNHO DE 2017.

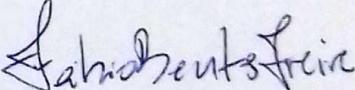
BANCA EXAMINADORA:

  
José Teixeira Freire  
Orientador, UFSCar

  
Nivaldo Aparecido Corrêa  
USP

  
Maisa Tonon Bitti Perazzini  
UNIFEI

  
Rodrigo Béttega  
UFSCar

  
Fábio Bentes Freire  
UFSCar

## DEDICATÓRIA

*In memoriam* de **Romil Pestana de Sousa**.

Esse foi sem sombra de qualquer dúvida o maior motivador do que me tornei hoje e o melhor ser humano que a vida me proporcionou em tê-lo como pai. À rainha da minha vida, minha eterna mãe **Maria Eulália da Costa**. Todas as vitórias e superações serão sempre dedicadas a vocês.

Às minhas amadas irmãs, Roberta Costa de Sousa Lozer e Cristina de Mello Souza. Dedico a vocês parte do que consegui e me tornei, afinal, sem o apoio das duas jamais teria chegado até aqui.

Aos meus sobrinhos: Lívia de Sousa Lozer, Nicole de Sousa Lozer, Marcelle de Mello Leão, Bernardo de Mello Leão, Leonardo de Mello Leão. A paixão que tenho por todos vocês serviu de combustível para superar este desafio.

## AGRADECIMENTOS

À DEUS, acima de tudo. Obrigado pela vida que me proporcionaste e pela saúde que me concedeste, foram fundamentais para superar mais este desafio na minha vida.

Aos meus pais, Maria Eulália da Costa e Romil Pestana de Sousa, por terem sido meu maior exemplo de dignidade, sabedoria e perseverança. Serei eternamente grato pela luz e o amor de vocês.

Às minhas irmãs Roberta Costa de Sousa Lozer e Cristina de Mello Souza. No momento que mais precisei, o que me fortaleceu não foram os objetos materiais, mas sim suas palavras de motivação.

À grande família: Roberta Costa de Sousa Lozer, Lívia de Sousa Lozer, Nicole de Sousa Lozer (minha linda afilhada e futura engenheira), Felipe Zerbini Lozer, Cristina de Mello Souza, Marcelo Cardoso Leão, Bernardo de Mello Leão, Leonardo de Mello Leão e Marcele de Mello Leão. Família é a base de tudo e com vocês eu quero sempre ser família.

Ao meu grande amor, minha noiva Ariany Binda Silva, que esteve comigo nessa jornada e nunca me abandonou, nem por um segundo, sempre me dando força e um lindo sorriso para continuar seguindo em frente.

Ao meu orientador, José Teixeira Freire, expresso minha eterna gratidão, por ter me guiado, dado o suporte necessário e pela paciência ao longo do desenvolvimento desse trabalho. O Professor Freire é, sem titubear, o maior EDUCADOR que conheci na vida.

Ao meu co-orientador, Professor Fábio Bentes Freire, pela amizade e importante colaboração no desenvolvimento e execução da Tese de Doutorado.

À família do meu amigo Freirão (Prof. Freire), especialmente à Dona Luzia, seus filhos Fábio e Flavio, pelo acolhimento, carinho e confiança que me deram desde quando cheguei em São Carlos. Vocês estarão sempre em minhas recordações.

Aos professores do DEQ/UFSCar, especialmente aos do Sistema Particulados, Thiago Faggion, Rodrigo Bettega, Maria do Carmo, Gustavo Maia, Ronaldo Corrêa, Demerval Sartori, pelas contribuições enriquecedoras dadas durante os seminários, *workshop*, dentre outros eventos acadêmicos e no dia a dia.

Aos meus grandes amigos Hugo Perazzini e Maisa Perazzini. A vida nos proporcionou momentos prazerosos e divertidos. Foi generosa nos tornando amigos de profissão. Sem o sabor dessa amizade, certamente as dificuldades enfrentadas neste doutorado teriam sido maiores. À vocês, o meu muito obrigado.

Tudo começou na graduação, os professores que me ensinaram, hoje são meus amigos desta linda e excelente profissão. Justiça seja feita, portanto, à vocês Profs. Marcos Halasz, Flávia Pereira Puget, Marcelo Mazza, Giuseppe Camilletti, Marcos Kopperschmidt, Rodolfo Silvério, os meus sinceros agradecimentos.

À minha sogra, meu sogro, minha cunhada e todos os demais dessa abençoada família que nos bastidores foram fundamentais para que eu pudesse vencer esse desafio.

Aos meus amigos e amigas que me acompanharam nesta trajetória acadêmica em São Carlos, especialmente ao casal Daniel Sampaio e Paula Muratas, aos meus amigos Cida e Vitinho, os quais me ajudaram muito, principalmente com meu pai, à comunidade da UNICAMP: Manu, Daniel, Lucas e o milionário Fernando Cassoli, à Doutora Josiana Laport, com sua amizade e companheirismo me motivou vencer mais esse desafio.

Aos colegas do Centro de Secagem e do DEQ/UFSCar, pelos momentos divertidos e de grande aprendizado.

Aos técnicos Oscar, Edilson, Adilson e Samuel pela ajuda com montagem e construção de equipamentos. Por terem sido prestativos quando precisei.

Aos colegas da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES/Engenharia Química do Campus Alegre. Obrigado pelo apoio e incentivo.

À todos que direta ou indiretamente me ajudaram a subir mais um degrau e a conquistar esse tão sonhado título de Doutor.

“A bravura provém do sangue, a  
coragem provém do pensamento”

- Napoleão Bonaparte

“Não é o mais forte que  
sobrevive, nem o mais  
inteligente. Quem sobrevive é o  
mais disposto à mudança”.

- Charles Darwin

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo verificar o comportamento do leito de jorro mecânico em relação ao leito de jorro convencional através da atrição de materiais particulados, da análise térmica e de massa durante a evaporação de água e da secagem de materiais pastosos e granulares. Com base nos dados obtidos, foram aplicados dois modelos matemáticos para representar a atrição, o modelo *CST* e o difusivo a dois parâmetros para descrever a secagem da pasta e dos grãos, respectivamente. Desta forma, foi utilizado um leito de jorro com coluna cilíndrica de aço inox de 0,87 m de altura, 0,30 m de diâmetro, base cônica inferior e superior (ângulo de 60°) com diâmetro 0,30 m e altura de 0,20 m. Para o leito de jorro mecânico utilizou-se um parafuso helicoidal de dimensões: eixo de 0,01 m de diâmetro, 1,3 m de comprimento, 0,70 m de espiral com diâmetro e passe de 0,0508 m. Para a atrição, os experimentos foram conduzidos com partículas de dolomita, esferas de vidro e alumina. Com exceção das esferas de vidro, houve atrição para os demais materiais particulados em ambos os leitos de jorro, porém em maiores proporções quando utilizou-se a configuração convencional. Foi visto também que a atrição influenciou na fluidodinâmica do leito de jorro convencional. Dos modelos aplicados, o proposto por Gwyn (1969) forneceu previsões aceitáveis em relação aos resultados observados. Para a evaporação de água, utilizou-se esferas de vidro de 3,2 mm de diâmetro como inertes. Verificou-se que as variáveis operacionais (velocidade, temperatura e vazão de água) influenciaram diretamente na temperatura, umidades relativa e absoluta do ar na saída do leito de jorro. Para a secagem de pastas, utilizou-se o leite desnatado e esferas de vidro usadas nos experimentos de evaporação de água. O leite desnatado interferiu na circulação das partículas inertes, causando modificações no adimensional de queda de pressão e na umidade do ar na saída do leito de jorro mecânico. As umidades relativa e absoluta, bem como a umidade do pó recolhido na saída do ciclone foram influenciadas pelas variáveis operacionais. Os resultados preditos do modelo *CST* apresentaram concordância satisfatória com a grande maioria dos resultados obtidos nos experimentos de secagem do leite desnatado. Quanto à secagem das esferas de alumina, os dados do adimensional de umidade dos grãos, como também da temperatura e da umidade relativa da fase fluida em função do tempo foram influenciados pelas condições operacionais. Os resultados preditos pelo modelo matemático a dois parâmetros alcançaram precisão satisfatória com relação aos dados observados e permitiu uma análise qualitativa da operação de secagem. No geral, todos os resultados obtidos nesse trabalho apresentaram comportamentos que concordam com o que foi observado na literatura.

## ABSTRACT

This study had the objective to assess the behavior of a mechanically spouted bed compared to a conventional spouted bed through attrition of particulate matter, thermal and mass analysis during water evaporation and through the drying of pastes and granular materials. Based on the obtained results, two mathematical models were applied to represent attrition, the *CST* model and the two-parameter diffusive model to describe the drying of the paste and grains, respectively. Therefore, a stainless steel spouted bed with cylindrical column of 0.95 m of height, 0.30 m of diameter, inferior and superior conical base ( $60^\circ$  angle) with 0.30 m of diameter and 0.20 m of height. For the mechanically spouted bed dryer, a helical screw with the following measures was used: outside diameter of 0.01 m, length of 1 m, 0.70 m of spiral with diameter, and pitch of 0.0508 m. The attrition experiments were conducted with dolomite particles, and glass and alumina spheres. With the exception of the glass beads, there was attrition for the other particulate materials in both spouted beds; however, at larger proportions when the conventional set was used. It was also observed that attrition influenced the fluid dynamics of the conventional spouted bed. Of the models used, the one proposed by Gwyn (1969) provided acceptable predictions regarding the results observed in this study. For water evaporation, glass beads of 3.2 mm of diameter were used as inert particles. It was verified that operational variables (velocity, temperature and water flow) had direct influence on temperature and relative and absolute humidity of air at the outlet of the spouted bed. For the drying of pastes, skimmed milk and the glass beads employed in the water evaporation trials were used. The skimmed milk interfered in the circulation of inert particles, causing changes in the dimensionless pressure drop and air humidity at the outlet of the mechanically spouted bed dryer. Relative and absolute humidity as well as the moisture of the powder collected at the outlet of the cyclone were influenced by the operational variables. The results predicted by the *CST* model presented satisfactory agreement with the majority of results obtained in the skimmed milk drying experiments. When it comes to the drying of alumina spheres, the dimensionless data of grain moisture and of temperature and relative humidity of the fluid phase as a function of time were influenced by the operational conditions. The results predicted by the two-parameter mathematical model reached satisfactory accuracy regarding the observed data and allowed for a qualitative analysis of the drying operation. In general, all results obtained in this study showed behavior which is consistent with what has been observed in the literature.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação esquemática do leito de jorro convencional com suas regiões características .....	5
Figura 2.2 - Esboço esquemático do leito de jorro com aeração tangencial e parafuso helicoidal:(1) entrada tangencial de ar (fendas), (2) parafuso helicoidal e (3) material particulado. ....	12
Figura 2.3 - Unidade experimental do leito de jorro mecânico. ....	13
Figura 2.4 - Mecanismo do processo de secagem de pasta sobre superfície de partículas inertes em leito de jorro .....	15
Figura 2.5 - Diagrama esquemático das pontes líquidas dentro do leito de jorro .....	23
Figura 3.1 - Diagrama esquemático da unidade experimental do leito de jorro: (1) soprador; (2) sistema by pass; (3) Medidor de vazão tipo Venturi; (4) sistema de aquecimento; (5) câmara de secagem; (6) computador; (7) compressor de ar; (8) bomba peristáltica; (9) reservatório de pasta; (10) motor do parafuso helicoidal; (11) bancada de transdutores; (12) ciclone e (13) coletor de pó seco .....	44
Figura 3.2 - Dimensões da câmara de secagem e do parafuso helicoidal .....	45
Figura 3.3 - Vista superior detalhada da base cônica. (a) leito de jorro convencional e (b) leito de jorro com parafuso helicoidal .....	46
Figura 3.4 - Sistema instalado para coleta dos grãos de alumina. Detalhe da posição axial do coletar na base cônica e desenho esquemático do coletor de materiais granulares.....	47
Figura 3.5 - Sistema usado para saturação das partículas de alumina. ....	59
Figura 4.1 - Queda de pressão total em função da velocidade do ar: leito de jorro convencional (símbolos abertos) e leito de jorro mecânico (símbolos fechados).....	64
Figura 4.2 - Queda de pressão em função da velocidade do ar na entrada sem a presença de partículas: leito de jorro convencional (símbolos abertos) e leito de jorro mecânico (símbolos fechados) - Teste em branco. ....	66
Figura 4.3 - Queda de pressão do leito particulado em função da velocidade do ar na entrada do leito de jorro - curva característica. (a) convencional e (b) mecânico .....	68

Figura 4.4 – Massa das esferas de alumina em função do tempo e evolução temporal da perda mássica (Xa). .....	70
Figura 4.5 - Distribuição granulométrica das esferas de alumina. ....	72
Figura 4.6 - Distribuição granulométrica das esferas de vidro.....	74
Figura 4.7 - Massa das esferas de alumina em função do tempo parametrizada nas velocidades do ar da entrada do leito de jorro convencional. ....	75
Figura 4.8 - Massa das partículas de dolomita em função do tempo e evolução temporal da perda de mássica (Xa).....	76
Figura 4.9 - Imagens das partículas de dolomita antes (a) e após a atrição (b).....	77
Figura 4.10 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para as esferas de alumina:(a) 0 minuto, (b) 210 minutos, (c) 690 minutos e (d) 2250 minutos.....	78
Figura 4.11 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para as partículas de dolomita: (a) 0 minuto, (b) 510 minutos, (c) 1470 minutos e (d) 2430 minutos. ....	81
Figura 4.12 - Dados experimentais e simulados da massa das esferas de alumina em função do tempo. ....	84
Figura 4.13 - Dados experimentais e simulados da massa das partículas de dolomita em função do tempo. ....	84
Figura 4.14 - Massa das esferas de alumina em função do tempo e evolução temporal da perda mássica (Xa). ....	86
Figura 4.15 - Distribuição granulométrica das esferas de alumina.....	87
Figura 4.16 - Distribuição granulométrica das esferas de vidro.....	88
Figura 4.17 - Massa das esferas de alumina em função do tempo e evolução temporal da perda mássica (Xa). ....	89
Figura 4.18 - Imagens das partículas de dolomita: (a) antes da atrição e (b) após a atrição no leito de jorro mecânico.....	90
Figura 4.19 - Temperatura do ar e temperatura de bulbo úmido em função do tempo na saída do leito de jorro convencional: (a) 80°C e (b) 100°C.....	92
Figura 4.20 - Temperatura do ar e temperatura de bulbo úmido em função do tempo na saída do ar do leito de jorro mecânico (a) e (b) 80°C - (c) e (d) 100°C. ....	93
Figura 4.21 - Eficiência térmica máxima em função do tempo para o leito de jorro convencional: (a) 80°C e (b) 100°C .....	97
Figura 4.22 - Eficiência térmica máxima em função do tempo para o leito de jorro mecânico: (a) e (b) 80°C - (c) e (d) 100°C .....	98

Figura 4.23 - Umidade relativa do ar em função do tempo na saída do leito de jorro convencional – (a) 80°C e (b) 100°C .....	101
Figura 4.24 - Umidade relativa do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico. (a) 80°C e 20 mL/min; (b) 80°C e 40 mL/min; (c) 100°C e 20 mL/min e (d) 100°C e 40 mL/min. ....	102
Figura 4.25 - Umidade absoluta do ar em função do tempo na saída do leito de jorro convencional. (a) 80°C e (b) 100°C .....	104
Figura 4.26 - Umidade absoluta do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico. (a) 80°C e 20 mL/min; (b) 80°C e 40 mL/min; (c) 100°C e 20 mL/min e (d) 100°C e 40 mL/min. ....	105
Figura 4.27 - Adimensional de queda de pressão em função do tempo para o leito de jorro mecânico: (a) 80°C e 20 mL/min; 80°C e 40 mL/min; (c) 100°C e 20 mL/min e (d) 100°C e 40 mL/min. ....	110
Figura 4.28 - Umidade relativa do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico: (a) 80°C e 20 mL/min; (b) 80°C e 40 mL/min; (c) 100°C e 20 mL/min e (d) 100°C e 40 mL/min. ....	113
Figura 4.29 - Umidade absoluta do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico: (a) 80°C e 20 mL/min; (b) 80°C e 40 mL/min; (c) 100°C e 20 mL/min e (d) 100°C e 40 mL/min. ....	115
Figura 4.30 - Imagem da vista superior do leito de jorro mecânico após a secagem do leite desnatado .....	118
Figura 4.31 - Dados preditos e observados para velocidade do ar 13 m/s: (a) temperatura do ar; (b) umidade do sólido em base úmida; (c) umidade relativa e (d) umidade absoluta. ....	121
Figura 4.32 - Queda de pressão em função da velocidade do ar na entrada sem a presença de partículas no leito de jorro convencional - Teste em branco.....	123
Figura 4.33 – Queda de pressão do leito particulado em função da velocidade de ar na entrada do leito de jorro convencional (Curva característica) .....	124
Figura 4.34 - Temperatura do ar em função do tempo na saída do leito de jorro convencional. (a) 80°C e (b) 100°C .....	125
Figura 4.35 - Temperatura do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico: (a) 80°C e (b) 100°C.....	126
Figura 4.36 - Umidade relativa do ar em função do tempo na saída do leito de jorro convencional. (a) 80°C e (b) 100°C .....	128

Figura 4.37 - Umidade relativa do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico. (a) 80°C e (b) 100°C. ....	129
Figura 4.38 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro convencional: $u_{mj}$ 1,10.....	131
Figura 4.39 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro convencional para 80 e 100°C. ....	132
Figura 4.40 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro mecânico sob às condições de 80°C e 09 m/s. ....	133
Figura 4.41 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro mecânico sob às condições de 100°C e 17 m/s. ....	133
Figura 4.42 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro mecânico: (a) $u = 09$ m/s e (b) $u = 17$ m/s.....	135
Figura 4.43 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro mecânico: (a) 80°C e (b) 100°C.....	135
Figura 4.44 - Adimensional de umidade da alumina em função do tempo para o leito de jorro convencional e mecânico.....	136
Figura 4.45 - Dados observados e preditos de umidade dos grãos em função do tempo obtidos da secagem no leito de jorro mecânico: (a) 09 m/s - (b) 17 m/s.....	138
Figura 4.46 - Dados observados e preditos de umidade dos grãos em função do tempo obtidos da secagem no leito de jorro mecânico: (a) 80°C - (b) 100°C.....	138

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Leito de jorro e suas diferentes configurações.....	11
Quadro 2.2 - Trabalhos sobre a secagem de pasta no leito de jorro convencional.....	17
Quadro 2.3 - Variáveis fluidodinâmicas afetadas pela presença da pasta no leito de jorro convencional. ....	21
Quadro 2.4 - Trabalhos realizado sobre a secagem de pasta no leito de jorro mecânico. ....	28
Quadro 2.5 - Modelos matemáticos da secagem de pastas em leito de jorro.....	31
Quadro 2.6 – Principais aplicações do leito de jorro convencional na secagem de materiais granulares.....	36

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1- Propriedades físicas dos materiais particulados. ....	42
Tabela 3.2 - Condições operacionais utilizadas na caracterização fluidodinâmica dos leitos de jorro.....	48
Tabela 3.3 - Condições operacionais utilizadas nos ensaios de atrição. ....	51
Tabela 3.4 - Condições operacionais utilizadas nos ensaios de evaporação da água e secagem do leite desnatado no leito de jorro convencional e mecânico. ....	54
Tabela 3.5 - Condições operacionais utilizadas na secagem das esferas de alumina no leito de jorro convencional e mecânico. ....	59
Tabela 4.1 - Parâmetros de ajuste e coeficientes de correlação dos leitos de jorro. ....	67
Tabela 4.2 - Dados da queda de pressão máxima e velocidade de mínimo jorro para esferas de alumina. ....	80
Tabela 4.3 - Dados da queda de pressão máxima e velocidade de mínimo jorro para as partículas de dolomita. ....	82
Tabela 4.4 - Valores dos parâmetros estimados $m$ e $k_p$ .....	85
Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros estimados $k_0$ e $k_1$ . ....	85
Tabela 4.6 - Dados da umidade relativa e da saturação do ar no regime permanente. ....	107
Tabela 4.7 - Umidade do pó de leite desnatado em função do tempo. ....	119
Tabela 4.8 - Coeficientes de difusão efetiva, $R^2$ e $\gamma$ estimados do modelo difusivo .....	139

## NOMENCLATURA

$a$	Coeficiente de ajuste	$[MT^{-1}]$
$b$	Coeficiente de ajuste	$[T^{-1}]$
$cp_{ge}$	Calor específico do gás na entrada do leito de jorro	$[L^2T^{-2}\Theta^{-1}]$
$cp_{gs}$	Calor específico do gás na saída do leito de jorro	$[L^2T^{-2}\Theta^{-1}]$
$cp_j$	Calor específico do leito de jorro.	$[L^2T^{-2}\Theta^{-1}]$
$cp_{pe}$	Calor específico da pasta na entrada do leito de jorro	$[L^2T^{-2}\Theta^{-1}]$
$cp_{ps}$	Calor específico da pasta na saída do leito de jorro	$[L^2T^{-2}\Theta^{-1}]$
$cp_s$	Calor específico das partículas inertes	$[L^2T^{-2}\Theta^{-1}]$
$D$	Diâmetro da coluna de leito de jorro	$[L]$
$D_0$	Diâmetro de entrada do leito de jorro	$[L]$
$Deff$	Difusividade efetiva	$[L^2T^{-1}]$
$d_p$	Diâmetro da partícula	$[L]$
$F_{pe}$	Vazão mássica de pasta na entrada do leito de jorro	$[MT^{-1}]$
$F_{ps}$	Vazão mássica de pasta na saída do leito de jorro	$[MT^{-1}]$
$h$	Coeficiente convectivo de transferência de calor por convecção	$[MT^3\Theta^{-1}]$
$h_f$	Altura da fonte	$[L]$
$h_{fmi}$	Altura da fonte no mínimo jorro	$[L]$
$h_{max}$	Altura máxima da fonte	$[L]$
$H^v$	Calor latente de vaporização	$[L^2\Theta^{-3}]$
$k$	Termo de acoplamento de fases	$[MT^{-1}]$
$k_0$	Constante da cinética de atrição do modelo de Lee et al. (1993)	$[T^{-1}]$
$k_l$	Constante da cinética de atrição do modelo de Lee et al. (1993)	$[L^2T^{-2}]$
$k_a$	Constante da cinética de atrição do modelo de Lee et al. (1993)	$[T^{-1}]$
$k_p$	Constante da cinética de atrição do modelo de Gwyn (1969)	$[T^{-m}]$
$m$	Expoente dependente do tempo de atrição	$[-]$
$m_j$	Massa do leito de jorro.	$[M]$
$m_s$	Massa das partículas inertes	$[M]$
$n$	Número de termos da série	$[-]$
$P$	Pressão	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$P_0$	Pressão no tempo inicial	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$P_{mj}$	Pressão do leito de jorro no mínimo jorro	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$q$	Calor perdido pelo leito de jorro	$[ML^2T^{-3}]$
$Q$	Vazão volumétrica	$[L^3T^{-1}]$

$Q_p$	Vazão mássica de pasta	[MT <sup>-1</sup> ]
$r$	Coordenada radial	[-]
$R$	Raio da partícula	[L]
$S$	Grau de saturação	[-]
$t$	Tempo	[T]
$T_0$	Temperatura do ar na entrada do leito de jorro	[Θ]
$T_g$	Temperatura da fase gasosa	[Θ]
$T_{ar}$	Temperatura do ar	[Θ]
$T_{ge}$	Temperatura do gás na entrada do leito	[Θ]
$T_{gs}$	Temperatura do gás na saída do leito	[Θ]
$T_{pe}$	Temperatura da pasta na entrada do leito de jorro	[Θ]
$T_{ps}$	Temperatura da pasta na saída do leito de jorro	[Θ]
$T_{sat}$	Temperatura de saturação do ar	[Θ]
$u$	Velocidade superficial do gás	[LT <sup>-1</sup> ]
$U$	Umidade em base úmida	[-]
$UA$	Umidade absoluta do ar na saída do leito de jorro	[-]
$u_{mj}$	Velocidade de mínimo jorro	[LT <sup>-1</sup> ]
$UR$	Umidade relativa do ar na saída do leito de jorro	[-]
$V_l$	Volume de líquido	[L <sup>3</sup> ]
$V_t$	Volume total	[L <sup>3</sup> ]
$W$	Massa do sólido	[M]
$W_{ge}$	Vazão mássica do gás na entrada do leito de jorro	[MT <sup>-1</sup> ]
$W_{gs}$	Vazão mássica do gás na saída do leito de jorro	[MT <sup>-1</sup> ]
$X$	Umidade adimensional	[-]
$X_0$	Umidade inicial do sólido	[-]
$x_e$	Fração mássica de água líquida na entrada do leito de jorro	[-]
$X_{eq}$	Umidade de equilíbrio	[-]
$x_s$	Fração mássica de água líquida na saída do leito de jorro	[-]
$y_e$	Fração mássica de vapor d'água na entrada	[-]
$y_s$	Fração mássica de vapor d'água na saída	[-]
$\gamma$	Parâmetro de ajuste proposto por Calado et al. (1987)	[-]

**Letras gregas**

$\Theta$	Ângulo da base cônica	[°]
$\rho$	Massa específica	[ML <sup>-3</sup> ]
$\Delta$	Diferença	[-]
$\rho_{ap}$	Massa específica aparente	[ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_{real}$	Massa específica real	[ML <sup>-3</sup> ]
$\Phi$	Esfericidade	[-]
$\eta$	Eficiência térmica	[-]

**SUMÁRIO**

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xii
NOMECLATURA	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Leito de jorro convencional	4
2.1.1 Atrição de materiais particulados	6
2.1.2 Modificações no leito de jorro convencional	9
2.1.3 Leito de jorro mecânico: aspectos gerais e características fluidodinâmicas	12
2.2 Secagem de pasta no leito de jorro	14
2.2.1 Aplicações do leito de jorro convencional na secagem de pastas	16
2.2.2 Influência da pasta na dinâmica do leito	20
2.2.3 Aplicações do leito de jorro mecânico na secagem de pastas	26
2.2.4 Modelos matemáticos de secagem de pasta em leito de jorro	30
2.3 Secagem de grãos em leito de jorro	34
2.3.1 Aplicações do leito de jorro convencional na secagem de materiais granulares	35
2.3.2 Aplicações do leito de jorro mecânico na secagem de materiais granulares	39
2.4 Comentários finais	39

3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 Materiais	41
3.2 Unidade experimental	43
3.3 Procedimento Experimental	48
3.3.1 Caracterização fluidodinâmica da unidade experimental	48
3.3.2 Atrição dos materiais particulados	51
3.3.3 Modelos da cinética de atrição	52
3.3.4 Evaporação de água e secagem do leite desnatado	53
3.3.5 Eficiência energética para a evaporação da água e a secagem do leite desnatado	56
3.3.6 Modelo CST para a secagem do leite desnatado	56
3.3.7 Secagem dos grãos de alumina	58
3.3.8 Modelo difusivo a dois parâmetros para a secagem dos grãos de alumina	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro convencional e mecânico	63
4.1.1 Queda de pressão total do leito de jorro	64
4.1.2 Queda de pressão do leito de jorro vazio (teste em branco) e com o material particulado	65
4.2 Atrição das partículas esféricas e não esféricas no leito de jorro convencional	70
4.2.1 Atrição em partículas esféricas	70
4.2.2 Efeito da velocidade do ar nas esferas de alumina	74
4.2.3 Atrição em partículas não esféricas	76
4.2.4 Efeito da atrição no comportamento fluidodinâmico	78
4.2.5 Simulação dos resultados da cinética de atrição	83
4.3 Análise da atrição de partículas esféricas e não esféricas no leito de jorro mecânico	86
4.3.1 Atrição em partículas esféricas	86

4.3.2 Atrição em partículas não esféricas	88
4.4 Análise térmica e de massa na evaporação de água no leito de jorro convencional e mecânico	91
4.4.1 Temperatura do ar de saída	91
4.4.2 Eficiência térmica	96
4.4.3 Umidade relativa e absoluta	100
4.5 Secagem do leite desnatado no leito de jorro mecânico	109
4.5.1 Adimensional da queda de pressão total do leito de jorro mecânico	110
4.5.2 Umidade relativa e absoluta em função do tempo	112
4.5.3 Umidade do pó	119
4.5.4 Simulação da secagem do leite desnatado no leito de jorro mecânico - modelo <i>CST</i>	120
4.6 Secagem de grãos de alumina no leito de jorro convencional e mecânico	122
4.6.1 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro convencional	123
4.6.2 Temperatura do ar de saída	125
4.6.3 Umidade relativa do ar de saída	128
4.6.4 Umidade dos grãos de alumina	130
4.6.5 Comparação entre a secagem no leito de jorro convencional e mecânico	136
4.6.6 Simulação do modelo difusivo a dois parâmetros	137
5 CONCLUSÕES	140
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

O leito de jorro é reconhecido mundialmente como uma eficiente técnica de contato sólido-fluido que ocupa lugar relevante em muitas operações unitárias. Dentre uma ampla gama de operações que são encontradas nas indústrias químicas, o leito de jorro tem se destacado no recobrimento de partículas, secagem de materiais granulares e pastosos, aquecimento ou resfriamento de sólidos, pirólise de biomassa, combustão e reações químicas em geral.

Essa técnica foi desenvolvida por Mathur e Gislher em 1954 com o propósito de melhorar a secagem de grãos de trigo úmidos, os quais não apresentavam fluidização de boa qualidade no leito fluidizado. Para resolver esse problema foi projetado um sistema composto por uma coluna cilíndrica acoplada a uma base cônica, pela qual se injetava uma corrente de ar que atravessava o leito de partículas sólidas contidas nas regiões cônica e cilíndrica. Para essa configuração, a literatura adota a nomenclatura leito de jorro tronco cônico-cilíndrico, comumente chamado de leito de jorro convencional. Segundo Mathur e Epstein (1974) a principal característica do leito de jorro é a formação de três regiões distintas: jorro, fonte e ânulo, sendo que o conjunto dessas regiões forma um movimento cíclico razoavelmente ordenado capaz de promover altas taxas de transferência de calor e massa.

Contudo, a configuração convencional aponta para algumas desvantagens que podem influenciar diretamente no consumo energético do processo envolvido, em face da elevada perda de carga que ocorre, principalmente no início da operação. Outra desvantagem, como consequência da primeira, está relacionada com a elevada vazão do ar, sendo esta mais utilizada para a necessidade de manter o jorro do que para promover a secagem. Além disso, podem ser citados também problemas referentes à ampliação de escala (*scale-up*), como por exemplo, a existência de uma altura máxima do leito para alcançar condições estáveis de operação. Todos esses fatores são importantes e podem limitar ou mesmo inviabilizar sua aplicação em escala industrial (NEMETH e PALLAI, 1983; PASSOS et al. 1989).

Na tentativa de buscar soluções práticas para eliminar ou contornar as desvantagens existentes, pesquisadores do mundo todo tem testado diferentes configurações de leito de jorro, como por exemplo, o leito de jorro cônico. Nesta configuração não há limitação de altura para a obtenção do jorro estável, operações são realizadas com baixas quedas de pressão de jorro e uma melhor percolação do ar na região anular. Contudo, a

capacidade de sólidos no leito é determinada pela vazão do ar e a potência que o soprador pode fornecer (OLIVEIRA,1994; OLAZAR et al. 2011). Dentre outras mudanças referentes à geometria, o leito de jorro bidimensional e o triangular são configurações que também conseguem promover operações à uma baixa queda de pressão, porém elevadas vazões de ar são necessárias para manter a estabilidade do jorro estável. A principal vantagem do leito de jorro bidimensional tem sido destaque em muitos estudos, que é a facilidade de ampliação de escala do equipamento (TARANTO, 1992 PASSOS et al. 1991 NGUYEN et al. 1997). A utilização de tubos internos também é uma excelente alternativa, permitindo um maior controle na taxa de circulação das partículas, bem como realizar operações com menores vazões de ar e queda de pressão na condição de jorro estável (PASSOS et al. 1994). Esses são apenas exemplos de muitas configurações de leito de jorro que podem ser encontrados na literatura.

Uma modificação interessante, denominada de leito de jorro mecânico, proposta por pesquisadores do Instituto de Pesquisa da Hungria foi patenteada por volta de 1976. Essa configuração de leito de jorro conta com o uso de um parafuso helicoidal (rosca sem fim) de dimensões apropriadas introduzido no centro da coluna cilíndrica na posição axial e aberturas tangenciais localizadas na região cônica do leito para a entrada do ar. O parafuso helicoidal é acionado por um motor no sentido de auxiliar as partículas no movimento do jorro. Devido a este fato, embora receba esse nome de leito de jorro mecânico, essa configuração permite que o material particulado continue realizando o movimento cíclico e sistemático característico do jorro. Estudos realizados usando o leito de jorro mecânico constataram que, em princípio, não há limites para a carga de materiais particulados havendo um melhor controle destes e uma redução significativa na queda de pressão (SZENTMARJAY; PALLAI, 1989).

Em termos de secagem, existem muitos trabalhos na literatura que usaram como secadores leitos de jorro com configurações cone-cilíndrico ou somente cônico e os quais foram fundamentais para elucidar a fluidodinâmica do equipamento e os fenômenos de transferência de calor, massa e de momento envolvidos nas operações. No caso do leito de jorro mecânico, estudos realizados sobre secagem usando esta configuração permitiram mostrar aspectos positivos em relação as demais configurações de leito de jorro, promovendo operações estáveis e material seco com baixa umidade. Entretanto, essa configuração ainda deve ser mais estudada, bem como aplicada para diferentes tipos de secagem de materiais pastosos e granulares, uma vez que são poucos os trabalhos encontrados na literatura. Além disso, pelo fato do material sólido encontrar-se diretamente em contato com o parafuso

helicoidal em constante agitação, ainda não se sabe sobre o efeito que o atrito nesse meio irá produzir durante o funcionamento do leito de jorro mecânico.

A importância do assunto em questão, somada às vantagens que o leito de jorro mecânico pode proporcionar motivaram a realizar modificações em um secador disponível no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar que poderá, sem mudança de geometria e dimensões do leito, ser utilizado alternadamente como leito de jorro convencional e leito de jorro mecânico. Além disso, destaca-se também para a entrada da corrente de ar, que será realizada pela entrada da base cônica para as duas configurações de leito de jorro, mantendo-se a semelhança mais próxima entre elas. Característica essa que a torna distinta do leito de jorro mecânico desenvolvido pelo grupo de pesquisadores da Hungria.

Nesse sentido, visando conciliar aspectos positivos de ambos os equipamentos, este trabalho teve como objetivo verificar o comportamento do leito de jorro mecânico em relação ao leito de jorro convencional através de dados obtidos da atrição de materiais particulados, da análise térmica e de massa durante a evaporação de água e, principalmente, da secagem de materiais pastosos e granulares. Com base nos dados obtidos, foram aplicados dois modelos propostos na literatura para representar a cinética de atrição, bem como o modelo *CST* e o difusivo a dois parâmetros para descrever os fenômenos envolvidos no processo de secagem.

## CAPÍTULO 2

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais assuntos a serem abordados no presente trabalho. Inicialmente, será apresentado o aspecto geral do leito de jorro, incluindo o problema da atrição de materiais particulados e as modificações na geometria do leito, considerando principalmente a inserção do parafuso helicoidal. Será apresentado também uma revisão sobre secagem de pastas envolvendo teoria, aplicações e os principais modelos matemáticos encontrados na literatura utilizados para descrever a secagem no leito de jorro convencional e mecânico. De maneira análoga à secagem de pastas, ao final deste capítulo será abordada uma revisão em relação à secagem de materiais granulares nas duas configurações de leito de jorro.

#### 2.1. Leito de jorro convencional

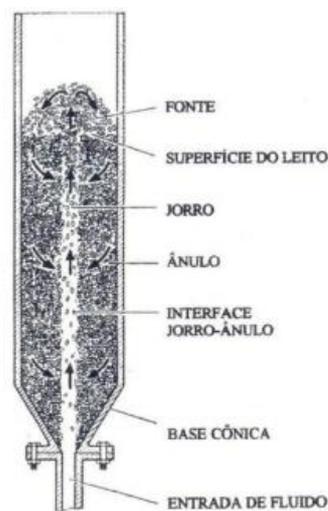
Motivados por problemas decorrentes da fluidização de baixa qualidade na secagem de grãos de trigo no leito fluidizado, os pesquisadores Mathur e Gislher, por volta de 1954 desenvolveram no Canadá a técnica do leito de jorro. Em princípio, o leito de jorro foi desenvolvido com a finalidade de promover uma movimentação homogênea com uma corrente gasosa em elevadas temperaturas sem danificar os grãos de trigo, difícil de se conseguir em operações com o leito fluidizado. Desde então, tem sido considerado um eficiente sistema de contato, principalmente, para partículas consideradas grossas ( $d_p > 1\text{mm}$ ) promovendo um elevado grau de contato fluido-partícula e, por consequência, altas taxas de circulação dos sólidos (MATHUR; EPSTEIN, 1974; FREIRE, 1992).

O leito de jorro na forma original, conhecido atualmente como leito de jorro convencional é constituído basicamente por uma coluna cilíndrica e uma base cônica, onde encontra-se a entrada do fluido que irá escoar pelo material particulado, geralmente o ar. Este fluido é injetado por um orifício localizado na extremidade inferior da região cônica, conforme mostra a Figura 2.1. O jorro então é formado quando a vazão de ar é suficiente para provocar o movimento ascendente das partículas acima do leito. Assim que isso acontece, três regiões distintas podem ser observadas:

- (i) Região central (canal de jorro): ocorre o movimento ascendente das partículas devido ao arraste promovido pelo fluido, sendo esta região caracterizada por uma elevada porosidade por onde as partículas são arrastadas;
- (ii) Região da fonte: região acima da superfície do leito pela qual as partículas se espalham radialmente para a região anular, e
- (iii) Região anular (deslizante) região caracterizada por baixa porosidade e por onde as partículas descem em contra-corrente com o ar, cujo comportamento apresenta semelhanças ao do leito deslizante.

O material particulado ao realizar o movimento descendente na região anular pode retornar ao jorro ao longo de toda a interface, porém, a maior parte desloca-se até a região da base e inverte seu sentido de movimento, sendo transportado novamente para cima. Desta forma é estabelecido um movimento cíclico e sistemático do material particulado com características fluidodinâmicas bastante distintas em relação a outras configurações de sistemas de contato sólido-fluido.

**Figura 2.1 - Representação esquemática do leito de jorro convencional com suas regiões características**



**Fonte: adaptado de Mathur e Epstein (1974)**

O movimento cíclico e razoavelmente ordenado proporciona características como a excelente mistura do material particulado e o elevado grau de contato entre as fases fluido-sólido, o que favorecem altas taxas de transferência de calor e massa. Na literatura os trabalhos sobre leitos de jorro mostram que essas características permitem que o leito de jorro

seja amplamente estudado e aplicado em diversos processos industriais, tais como secagem, granulação, revestimento de partículas, cristalização, carbonização e gaseificação do carvão, moagem e mistura de sólidos, pirólise de biomassa, dentre outros. Além disso, estas vantagens são associadas a razões econômicas, pois segundo Freire (1992), o interesse pela aplicação do leito de jorro nesses processos industriais é reiterado por baixos investimentos iniciais e baixo custo operacional.

Contudo algumas desvantagens limitam, ou senão, inviabilizam seu emprego como secador industrial uma vez que necessita de uma elevada queda de pressão para que o jorro aflore, bem como as vazões de fluido, governadas mais pelas necessidades do jorro, são os principais fatores que estão relacionados com problemas que envolvem ampliação de escala (scale-up) e custos energéticos. Além destas desvantagens a literatura menciona também que para se obter o jorro estável, as propriedades das partículas e a geometria do leito têm de estar dentro de uma determinada proporção, visto que haverá uma altura máxima alcançada pelo leito particulado para o estabelecimento do jorro, o que limita ainda mais a capacidade do secador (PASSOS et al. 1987, PALLAI et al. 2006).

Além das limitações mencionadas existe também a questão da atrição que pode se tornar um problema para determinadas operações, como granulação e recobrimento de comprimidos, devido ao severo atrito entre as partículas e das mesmas contra as fronteiras físicas do equipamento que ocorre a elevadas velocidades. Isto porque a operacionalidade do leito pode tornar-se comprometida por provocar mudanças na densidade e/ou volume do leito particulado devido à atrição durante as operações, as quais refletem diretamente sobre o comportamento fluidodinâmico com tendências a influenciar na velocidade de mínimo jorro e na queda de pressão (EPSTEIN; GRACIE, 1987). Além disso, existe a possibilidade também, no caso da secagem de pastas, de haver contaminação pela presença de resíduos do material particulado no pó obtido.

### 2.1.1 Atrição de materiais particulados

A atrição ocorre quando partículas do material sólido são removidas e, como consequência, pode levar à redução de tamanho da fase particulada e a emissão de partículas finas (conhecido na literatura como "*finos*"), as quais na grande maioria das vezes necessitam ser separadas ao final do processo (RAY; JIANG, 1987).

Existem duas diferentes formas que podem evidenciar a atrição, uma conhecida como abrasão superficial, ou seja, quando há a redução gradual do tamanho devido à quebra

de partes da superfície e a outra como fragmentação, que é a divisão do sólido em várias outras partes de tamanhos menores. Contudo, ambas as formas dependem de fatores que incluem as propriedades dos materiais, como a porosidade, o tamanho, a dureza, a massa específica, a forma, entre outros. Assim como pode depender também das condições operacionais, como o tempo de residência, a velocidade do ar, a pressão e a temperatura (RAY; JIANG, 1987).

No leito de jorro convencional, onde a movimentação é realizada pelo transporte pneumático das partículas, o mecanismo predominante de atrição é a abrasão superficial. Ocorre principalmente na região do jorro, quando os sólidos colidem entre si e contra a parede de sólidos que formam o canal do jorro. Além desta região, a atrição pode ocorrer também na região da fonte, por impacto, isto é, quando os sólidos colidem uns contra os outros e contra as paredes do equipamento (FERNÁNDEZ-AKARREGUI et al. 2012).

A abrasão superficial depende, além das propriedades dos materiais sólidos, dos parâmetros geométricos e fluidodinâmicos como o diâmetro do orifício de entrada do ar, o ângulo do cone, a altura do leito de partículas e a vazão do ar de entrada do leito. Essas dependências já foram observadas em grãos de uréia no leito de jorro convencional, conforme relata Mathur e Epstein (1974). Dentre as principais observações citam-se:

- o material particulado desgastou-se em maior proporção durante o início do processo em poucos minutos;
- a atrição foi maior a medida que aumentou o diâmetro do orifício de entrada do ar;
- em relação ao ângulo de cone, para ângulos mais agudos ( $30^\circ$ ) o desgaste foi maior quando comparado com ângulos maiores ( $60^\circ$ ); e
- o atrito tornou-se menos severo próximo a velocidades de mínimo jorro.

O trabalho realizado por Fernández-Akarregui et al. (2012) merece destaque nesse assunto por analisar, paralelamente, dados experimentais e numéricos da cinética de atrição de dois tipos de areia em função da velocidade do ar e da temperatura, obtidos em um leito de jorro cônico. Os autores observaram que ambos os materiais perderam massa ao longo do tempo e a perda tornava-se maior com o aumento da velocidade do ar. Além disso, a cinética de atrição foi simulada a partir de correlações empíricas compostas por equações de primeira ordem propostas por Gwyn (1969) e Lee et al. (1993). Os autores concluíram que a aplicação desses modelos no leito de jorro foi satisfatória, uma vez que os resultados preditos apresentaram boas concordâncias com os experimentais.

Em relação à cinética de atrição, os autores observaram que no início o desgaste foi significativo, seguido de uma redução exponencial do peso dos sólidos até atingir

um dado valor, a qual manteve-se praticamente constante ao longo do tempo. Embora não seja confirmado, os autores acreditam que a explicação para esse comportamento é devido ao fato dos grãos de areia apresentarem inicialmente superfícies irregulares, os quais após serem abrasados tornam-se, praticamente, esféricos ao final do processo.

Este efeito foi também constatado posteriormente por Sousa et al. (2015) ao analisar a cinética de atrição de materiais de geometria regulares e irregulares, como esferas de alumina e partículas de dolomita. Todavia, Sousa et al. (2015) analisaram a cinética de atrição em função do tempo de operação, o qual pode ser considerado curto quando comparado com o período utilizado por Fernández-Akarregui et al. (2012). Sousa et al. (2015) observaram através de curvas características construídas, em intervalos de tempo pré-estabelecidos, que a atrição influenciou diretamente nos parâmetros fluidodinâmicos, queda de pressão e velocidade de mínimo jorro. Segundo os autores, com a perda mássica devido ao desgaste, o peso do leito tornou-se menor, exigindo uma quantidade de energia menor para romper a coluna de partículas e mantê-lo em jorro estável. Notaram também que aumentando a agitação dos materiais particulados através da velocidade do ar de entrada, a atrição tornava-se maior, mostrando que há uma estreita relação entre as condições operacionais e as propriedades dos materiais particulados.

A atrição em leito de jorro é um assunto que ainda merece atenção, pois são poucos os trabalhos encontrados na literatura que analisaram o efeito da atrição em função do tipo de material particulado e dos parâmetros fluidodinâmicos no leito de jorro. O mesmo pode-se dizer sobre a modelagem matemática, visto que os modelos encontrados na literatura foram utilizados na descrição da cinética de atrição em leitos fluidizados, como é o caso dos modelos proposto por Lee et al. (1993) e Gwyn (1969).

Considerando as desvantagens mencionadas anteriormente que limitam o uso do leito de jorro convencional a realizar operações em escala industrial, além dos efeitos que a atrição pode exercer no comportamento fluidodinâmico do leito, pesquisadores tem se esforçado para melhorar a operacionalidade do equipamento, buscando o melhor ajuste entre as características e a necessidade do processo através de modificações na configuração convencional.

### 2.1.2 Modificações no leito de jorro convencional

As modificações impostas no leito de jorro convencional permitiram o desenvolvimento de novas geometrias de leitos e diferentes modos de operação do jorro. A configuração cônica e bidimensional são exemplos de leitos modificados estruturalmente que vem sendo comumente aplicada em muitas operações, principalmente, secagem de materiais pastosos e pirólise de resíduos (OLAZAR et al. 2010). No caso de configurações onde o jorro é ditado por acessórios mecânicos, são citados na literatura configurações como o leito de jorro com tubos internos e com parafuso helicoidal.

Além dos exemplos mencionados no parágrafo anterior, são propostas na literatura outras diferentes configurações de leito de jorro, como por exemplo: leito de jorro contínuo, leito de jorro combinado (fixo/cônico-cilíndrico), leito vibro-jorrado, leito de jorro cônico com tubo interno, leito de jorro fluidizado bidimensional, leito de jorro com rotação anular, leito de jorro-fluidizado, leito de jorro mecânico, leito de jorro com geometria triangular, leito de jorro diluído, leito jorro-fluidizado com tubo interno (OJALVO 1991; MEDEIROS, 2004; FINZER, 1989, LIMA, 1995; MAIALLE, 1996; VELASQUEZ, 2009; DEVAHASTIN, 1997; PASSOS, et al., 1989; SZENTMARJAY; PALLAI, 1989; NGUYEN et al. 1997; BIE et al. 2007; NIAMNUY et al. 2008; OSÓRIO-REVILLA et al. 2004).

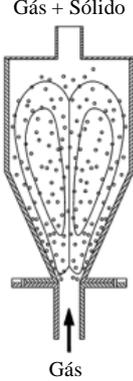
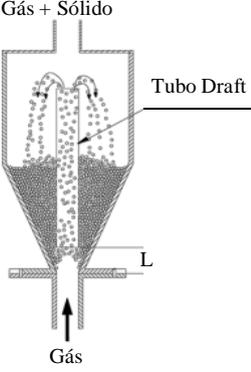
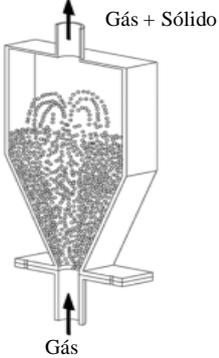
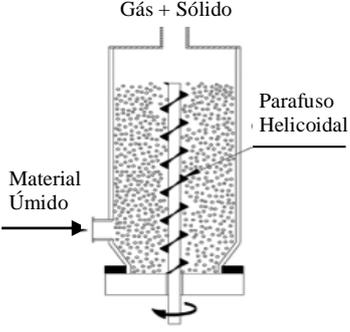
Dentre os exemplos citados anteriormente, são apresentados no Quadro 2.1 o esboço esquemático e as principais características de configurações modificadas que tem se destacado na literatura. O leito de jorro cônico apresenta uma única parte cônica com sólidos, isto permite melhorar as operações de secagem exigindo um custo energético menor e ótimas qualidades do produto final (SPREUTELS et al, 2014). Segundo Olazar et al. (2011) devido à razões geométricas, este tipo de leito de jorro é muito conveniente para a secagem de materiais que apresentam umidade elevada e pegajosos. No caso dos leitos bidimensionais estes são compostos por seções retangulares e uma base que permite uma boa recirculação das partículas para dentro do jorro, evitando a formação de zonas mortas e com a entrada do ar sendo realizada pelo centro do leito. Esta configuração tem sido citada como uma alternativa para superar as dificuldades surgidas na ampliação de escala (*scale-up*) através do melhoramento da capacidade volumétrica pelo simples fato de estender a largura do leito. Vários estudos já foram realizados com esse tipo de configuração, não somente a fluidodinâmica, mas também envolvendo as operações de secagem e recobrimento, como podem ser encontradas nos trabalhos de KALWAR, 1991; TARANTO, 1992; TARANTO, 1996; ZANOELO, 1994; e muitos outros.

Muitas operações no leito de jorro são realizadas usando componentes físicos, sendo os mais comuns citados na literatura: tubos internos e o parafuso helicoidal. A inserção de tubos internos é interessante do ponto de vista operacional contribuindo para o aumento de escala. Os tubos internos (*draft-tube*) ou placas retangulares (*draft-plate*) podem ser impermeáveis, porosos, ou parcialmente porosos, cilíndricos e levemente achatados. A posição no leito costuma ser apenas alguns centímetros acima da entrada do ar, podendo assumir diâmetro equivalente ou superior em relação à entrada.

De acordo com Da Rosa (2010) a finalidade do tubo draft é disciplinar a passagem de ar por dentro deste, estabelecendo uma barreira física capaz de separar as regiões anular e de jorro. Com essas regiões separadas fisicamente, o ar flui sem oportunidade de entrar para a região anular possibilitando que sejam realizadas operações com menores perdas de carga e alturas de leito superiores, ambos em relação a configuração convencional. A literatura cita diversos trabalhos de leitos de jorro com tubos internos, inclusive usando diferentes configurações geométricas, como por exemplo, secagem de grãos usando o leito bidimensional (Passos et al. 2011); atrição da areia usando um leito cônico (Fernández-Akarregui et al. 2012); secagem de fermento em pó no leito cônico (Spreutels et al. 2014), dentre outros.

De todas as opções mencionadas anteriormente e dentre das que são apresentadas no Quadro 2.1, o leito de jorro mecânico é o único que tem a finalidade de substituir o movimento pneumático das partículas pela ação do transporte a partir de um parafuso helicoidal (rosca sem fim). Esta configuração de secador permite realizar operações independentes da dinâmica do leito, o que possibilita controlar a velocidade de circulação das partículas sempre que for modificada a rotação do parafuso helicoidal. Como neste trabalho será contextualizada sobre as aplicações de um leito de jorro com parafuso helicoidal, uma revisão mais aprofundada sobre esse tipo de secador e as mais relevantes características fluidodinâmicas serão apresentados a seguir.

**Quadro 2.1 - Leito de jorro e suas diferentes configurações.**

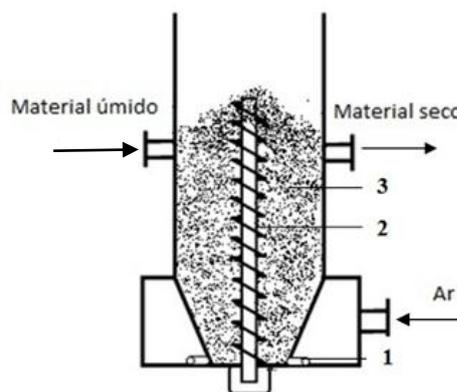
Desenho esquemático	Principais características
	<p>Leito de jorro jet:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem limitação de altura;</li> <li>• Útil para operar com pouca quantidade de materiais sólidos (porosidade acima de 75%); e</li> <li>• A circulação das partículas é mais intensa apresentando baixas velocidades de mínimo jorro e queda de pressão de jorro.</li> </ul>
	<p>Leito de jorro com tubo draft:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Não há limitação da altura de leito;</li> <li>• Controle da taxa de circulação de sólidos; e</li> <li>• Baixa vazão de ar para a região anular</li> </ul>
	<p>Leito de jorro bidimensional:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Boa circulação de sólidos e ausência de zonas mortas;</li> <li>• Elevada vazão de ar e baixas quedas de pressão; e</li> <li>• Grande capacidade volumétrica</li> </ul>
	<p>Leito de jorro mecânico:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte mecânico dos materiais sólidos;</li> <li>• Baixa queda de pressão e melhor aproveitamento do ar de secagem; <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor consumo energético; e</li> </ul> </li> <li>• Não há limites para altura do leito particulado</li> </ul>

Fonte: adaptado de Freire et al. (2012)

### 2.1.3 Leito de jorro mecânico: aspectos gerais e características fluidodinâmicas

A primeira modificação que combina o leito de jorro com o parafuso helicoidal foi desenvolvida e patenteada por pesquisadores do Instituto de Pesquisa da Hungria no meados da década de 70. A configuração possui características físicas bastante distintas da configuração convencional, principalmente, no modo da movimentação das partículas e na distribuição de ar pelo leito de partículas sólidas, conforme mostra a Figura 2.2. A estrutura consiste de um corpo cilíndrico acoplado a um vaso cônico com aberturas tangenciais na região inferior com o propósito de permitir que o ar seja distribuído para o leito particulado dentro do secador. Uma câmara tem a função de distribuir uniformemente o ar previamente aquecido por toda a região cônica do leito, além de contribuir com a eficiência térmica do processo. A movimentação do material particulado é ascendente e promovida por um parafuso helicoidal axialmente na região central do leito de jorro. Ao mesmo tempo em que mecanicamente são arrastados para cima, o espaço central é preenchido por sólidos que retornam pela região anular e inverte seu sentido de movimento. Assim, é estabelecido um movimento cíclico e uniforme independente da vazão de ar (NÉMETH et al. 1983).

**Figura 2.2 - Esboço esquemático do leito de jorro com aeração tangencial e parafuso helicoidal: (1) entrada tangencial de ar (fendas), (2) parafuso helicoidal e (3) material particulado.**

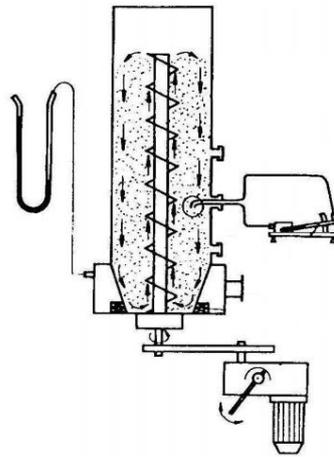


**Fonte: adaptado Németh et al. (1983)**

Szentmarjay et al. (1992) realizaram um estudo fluidodinâmico com o propósito de analisar o efeito do parafuso helicoidal sobre a queda de pressão e a distribuição da velocidade do ar em diferentes regiões do leito. Para isso foi usado um leito de jorro mecânico em escala laboratorial de 0,138 m de diâmetro e 0,65 m de altura, considerando

desde a base do fundo cônico até a região superior do corpo cilíndrico, conforme pode ser observado na Figura 2.3. Nesse estudo, foram utilizados materiais esféricos de vidro, cerâmica e hostaform, os quais apresentavam, respectivamente, a seguinte faixa de tamanho: 5,7-6,4; 4,7-8,7 e 7,3-7,7 mm. Foram utilizados também dois tamanhos diferentes de parafuso helicoidal, os quais eram movimentados por um motor instalado na região inferior da base cônica. O ar que alimentava o leito de jorro mecânico era distribuído pela região anular através de fendas abertas na região cônica, a qual localizava-se dentro de uma câmara por onde adentrava a corrente gasosa.

**Figura 2.3 - Unidade experimental do leito de jorro mecânico.**



**Fonte: Szentmarjay e Pallai, (1989)**

Os autores observaram que a distribuição da velocidade do ar é praticamente uniforme na direção radial, para diferentes posições investigadas da altura do leito, sendo levemente maior na região próxima ao parafuso helicoidal quando comparada com as proximidades da parede do equipamento, principalmente quando se utiliza maiores rotações. Os autores obtiveram dados da queda de pressão na entrada do leito a partir de ensaios experimentais, os quais serviram de base para afirmar que o parafuso helicoidal exerce um efeito de expansão do material particulado, com isso a circulação do ar torna-se favorecida e a queda de pressão tende a ser menor.

Com uma queda de pressão relativamente baixa, em relação ao que observa-se na configuração convencional e pelo fato de demandar vazões de ar para atender somente a secagem, esse conceito de leito de jorro mostrou-se um equipamento promissor devido a essas vantagens, o que levou a ser aplicado na secagem de grãos e pastas, conforme será conferido mais adiante.

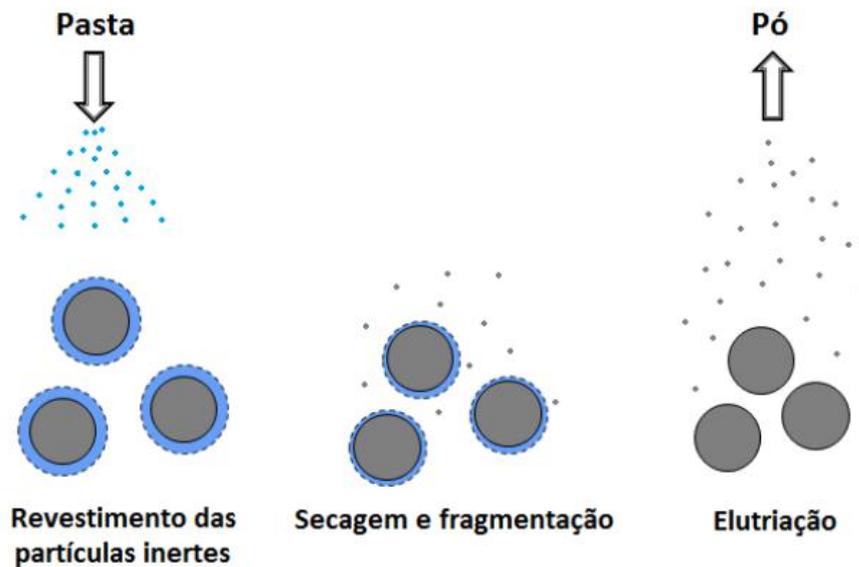
## 2.2 Secagem de pasta no leito de jorro

Primeiramente é importante definir o que são materiais pastosos, ou simplesmente, pastas, termo comumente usado em trabalhos que abordam esse assunto no leito de jorro. Na concepção de Weltman (1960), as pastas podem ser definidas como um sistema constituído de partículas de tamanho microscópico, ou coloidais, dispersas no meio líquido. Dentro desse contexto, existe uma ampla variedade de pastas, com características muito distintas e diversas formas físicas que podem variar desde soluções inorgânicas até pastas alimentícias.

A secagem de materiais pastosos utilizando o leito de jorro, aparentemente, parece ser bastante simples, contudo, a compreensão dos fenômenos envolvidos é bastante complexa (NASCIMENTO, 2013). A descrição do processo, em princípio, inicia com a alimentação do material úmido, que imediatamente entra em contato com as partículas inertes e a corrente gasosa previamente aquecidas. Neste momento, um filme líquido é formado sob a superfície das partículas, dando início a um processo de mudanças reológicas das pastas e a formação de um filme seco e quebradiço. À medida que prossegue a secagem, um determinado nível de umidade é alcançado, o filme seco se desprende devido às colisões entre as partículas, sendo em seguida transportado na forma de pó pela corrente gasosa para fora da câmara de secagem. Por fim, o material seco é coletado por um sistema de separação apropriado (FREIRE, et al. 2012; PERAZZINI, 2015).

Resumidamente o processo descrito pode ser dividido em quatro etapas principais, sendo estas: (1) alimentação da pasta, (2) formação do filme líquido sobre as partículas inertes, (3) mudanças reológicas das pastas e (4) desprendimento e coleta do material pulverizado, como mostra a Figura 2.4. As etapas descritas formam um processo cíclico, atuando simultaneamente, desde a alimentação da pasta até o desprendimento do filme seco. Este ciclo de secagem pode ser contínuo se a temperatura do leito correspondente a uma dada vazão de alimentação da pasta seja mantida suficiente elevada, de tal forma que a proporção das partículas recobertas, sob condições de estado estacionário, mantenha-se sempre baixa e assim não comprometa o movimento cíclico das partículas devido possíveis aglomerações (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

**Figura 2.4 - Mecanismo do processo de secagem de pasta sobre superfície de partículas inertes em leito de jorro**



**Fonte: Perazzini (2015)**

As condições estáveis, isto é, o regime permanente do processo descrito será alcançado se a taxa de remoção do material seco venha a ser maior ou igual à taxa de alimentação do material pastoso. Este por sua vez está diretamente relacionado à friabilidade do mesmo, a qual é influenciada pela umidade e composição da pasta, além do número de colisões efetivas das partículas que, segundo Barret; Fane (1990), são dependentes da:

- (i) taxa de circulação dos sólidos, a qual determina o tempo necessário para que os inertes sejam novamente recobertos e também a energia de colisão;
- (ii) taxa de secagem, já que as maiores taxas de secagem acabam favorecendo o aumento da friabilidade do filme, e
- (iii) razão entre a massa de pasta e massa de inertes, cuja, definição é dada pela vazão de alimentação de pasta e altura do leito de inertes.

Segundo Barret; Fane (1990), a estabilidade do processo poderá ser comprometida se a etapa da secagem ou do desprendimento do filme for um dos fatores limitantes. Por exemplo, se a cinética de secagem for a limitante, a espessura aderida pode simplesmente continuar a crescer como num processo de granulação e neste caso levando ao acúmulo do material seco no leito.

A descrição apresentada permite afirmar que o leito de jorro é um equipamento adequado para a secagem de materiais pastosos usando o leito particulado de inertes como suporte para a fase líquida, principalmente materiais termosensíveis. Sua aplicabilidade para vários tipos de materiais pastosos deve-se a fatores como o tempo de residência do material dentro do leito de jorro e também, devido as menores temperaturas na região anular quando comparadas com a temperatura de entrada do gás na região do jorro. Além desses fatores, pode ser atribuído também o baixo custo de instalação e de operação (FREIRE, 2012).

### 2.2.1 Aplicações do leito de jorro convencional na secagem de pastas

Os primeiros estudos que realizaram a secagem de pastas no leito de jorro surgiram no final da década de 60 pelos pesquisadores Romankov; Rashkovskaya (1968). Esses autores secaram com sucesso materiais como vernizes e tintas obtendo um produto pulverizado. No início dos anos 80, Pham (1983) comprovaram a viabilidade do processo através dos estudos de secagem do sangue bovino. A partir desse período, muitos outros trabalhos surgiram com a finalidade de observar a viabilidade da secagem de diversos materiais usando a configuração convencional. Uma visão dos principais trabalhos pode ser vista no Quadro 2.2, o qual mostra vários tipos de materiais pastosos que foram secos no leito de jorro com configuração convencional (cônico-cilíndrico).

**Quadro 2.2 - Trabalhos sobre a secagem de pasta no leito de jorro convencional.**

<b>Referência</b>	<b>Dimensões do leito</b>	<b>Tipo de inertes</b>	<b>Tipo de pasta</b>
Pham et al. (1983)	D = 1,04 m D <sub>0</sub> = 0,24 m Θ = 30	Partículas de polipropileno dp = 3- 5 mm ρ = 900 kg/m <sup>3</sup>	Sangue animal
Schneider e Bridgwater (1989)	D = 0,15 m D <sub>0</sub> = 0,02 m Θ = 65°	Esferas de vidro dp = 2- 5 mm ρ = 2800 kg/m <sup>3</sup> Polietileno dp = 4,3 mm ρ = 1321 kg/m <sup>3</sup>	Cloreto de Sódio (NaCl) e Suspensão de Alumina
Ré e Freire (1989)	D = 0,14 m D <sub>0</sub> = 0,03 m Θ = 60°	Partículas de polipropileno dp = 3,9 mm ρ = 900 kg/m <sup>3</sup>	Sangue animal e Extratos vegetais
Barret e Fane (1990)	D = 0,30 m D <sub>0</sub> = 0,05 m Θ = 30	Partícula de cerâmica dp = 2,5 mm ρ = 1370 kg/m <sup>3</sup>	Leite desnatado Efluente de amido, e Farinha de milho

**Quadro 2.2 - Continuação**

<b>Referência</b>	<b>Dimensões do leito</b>	<b>Tipo de inertes</b>	<b>Tipo de pasta</b>
Ochoa-Martinez et al. (1993)	D = 0,30 m D <sub>0</sub> = n.i Θ = n.i	Esferas de polipropileno dp = 3,9 mm ρ = n.i	Leite bovino
Spitzner Neto (1997)	D = 0,30 m D <sub>0</sub> = 0,05 m Θ = 60°	Esferas de vidro dp = 2,8 mm ρ = 2500 kg/m <sup>3</sup>	Sangue animal
Reyes et al. (1998)	D = 0,60 m D <sub>0</sub> = 0,05 m Θ = n.i	Partículas de polipropileno dp = 3,6 – 4,0 mm ρ = 940 kg/m <sup>3</sup>	Polpa de fruta
Oliveira e Souza (2005)	D = 0,15 m D <sub>0</sub> = 0,03 m Θ = 40	Partícula de teflon dp = 5,45 mm ρ = 2160 kg/m <sup>3</sup>	Extrato de Baunilha forficata
Rocha et al. (2004)	D = 0,103 m D <sub>0</sub> = 0,028 m Θ = 60°	Partícula de poliestireno dp = 3,3 mm ρ = 1045 kg/m <sup>3</sup>	Levedura ( <i>Saccharomyces cerevisiae</i> )

<b>Quadro 2.2 - Continuação</b>			
<b>Referência</b>	<b>Dimensões do leito</b>	<b>Tipo de inertes</b>	<b>Tipo de pasta</b>
Medeiros (2001)	D = 0,13 m D <sub>0</sub> = 0,05 m Θ = 60	Partícula de polietileno dp = 3,9 mm ρ = 950 kg/m <sup>3</sup>	Polpas de frutas
Almeida (2009)	D = 0,5 m D <sub>0</sub> = 0,03 m Θ = 60	Esferas de vidro dp = 2,0 – 2,36 mm ρ = 2500 kg/m <sup>3</sup>	Soluções de carbonato, Leite desnatado, Ovo homogeneizado; e Lodo de esgoto.
Nascimento (2013)	D = 0,5 m D <sub>0</sub> = 0,03 m Θ = 60	Esferas de vidro dp = 2,0 – 2,36 mm ρ = 2500 kg/m <sup>3</sup>	Ovo homogeneizado, Própolis, Soro de leite, Leite desnatado, Leite integral; e Leite semidesnatado
Perazzini (2015)	D = 0,3 m D <sub>0</sub> = 0,03 m Θ = 45°, 60° e 75°	Partícula de polietileno dp = 4,38 mm ρ = 930 kg/m <sup>3</sup>	Água destilada e leite desnatado
Vieira (2015)	D = 0,192 e 0,5 m D <sub>0</sub> = 0,03 m Θ = 60	Partículas de polietileno dp = 4,38 mm ρ = 930 kg/m <sup>3</sup>	Leite integral

**Fonte: Elaborado pelo autor**

Conforme foi observado no Quadro 2.2 uma gama de diferentes tipos de pastas foram secas no leito de jorro convencional. Segundo Freire et al. (1992), embora existam inúmeros trabalhos publicados, a secagem de pastas é extremamente complexa uma vez que há uma grande diversidade de pastas encontradas, cada uma apresentando características muito distintas. Dependendo do tipo de pasta, sua presença pode levar a efeitos significativos sobre a fluidodinâmica do leito. Segundo Almeida (2009) a presença de uma fase líquida no leito particulado pode acarretar problemas referentes à operação e ao controle do leito de jorro, neste caso as operações podem se tornar mais difíceis resultando no colapso do jorro. Já Bacelos et al. (2007) apontam a manutenção das condições do jorro estável como um dos maiores desafios na secagem de pastas, uma vez que foi comprovado através dos estudos realizados, que a adição da pasta influencia na fluidodinâmica do processo devido ao surgimento de zonas mortas e de uma dada quantidade de aglomerado de partículas que estão associados às forças de adesão e coesão que existem nas partículas molhadas.

### 2.2.2 Influência da pasta na dinâmica do leito particulado

Os primeiros estudos que mostraram mudanças no comportamento fluidodinâmico do leito de jorro foram realizados por Pham (1983). Esses autores em princípio perceberam que durante a secagem de sangue animal notava-se o aparecimento de zonas estagnadas. Posteriormente, novos estudos surgiram confirmando que a presença da pasta interfere na dinâmica do leito, sendo possível verificar essa interferência através de parâmetros fluidodinâmicos como a queda de pressão, velocidade de mínimo jorro e altura da fonte. Uma visão dos principais trabalhos que observaram a influência da pasta nas variáveis fluidodinâmicas do leito de jorro convencional pode ser vista no Quadro 2.3 e uma análise sucinta do que foi encontrado nestes trabalhos será apresentada posteriormente.

**Quadro 2.3 - Variáveis fluidodinâmicas afetadas pela presença da pasta no leito de jorro convencional.**

Referência	Variáveis fluidodinâmicas estudadas	Características do leito	Tipo de pasta
Patel et al. (1986)	$\Delta P = f(V_1)$ $h_f = f(u_{mj})$ $u_{mj} = f(V_1, T)$	$D = 0,15 \text{ m}$ $D_0 = 0,02 \text{ m}$ $\Theta = 60^\circ$	Glicerol e Água destilada
Barret e Fane (1990)	$\Delta P / \Delta P_{mj} = f(S)$ $u / u_{mj} = f(S)$	$D = 0,30 \text{ m}$ $D_0 = 0,05 \text{ m}$ $\Theta = 30^\circ$	Leite desnatado, efluente de amido e farinha de milho.
Schneider e Bridgwater (1993)	$\Delta P / \Delta P_{mj} = f(V_1 / V_t)$ $u / u_{jm} = f(V_1 / V_t)$ $u = f(t)$ $h_f = f(V_1 / V_t)$	$D = 0,15 \text{ m}$ $D_0 = 0,02 \text{ m}$ $\Theta = 65$	Glicerol e Água destilada
Medeiros et al. (2004)	$\Delta P / \Delta P_{mj} = f(t)$ $u / u_{mj} = f(t)$ $h_f / h_{fjm} = f(t)$	$D = 0,13 \text{ m}$ $D_0 = 0,03 \text{ m}$ $\Theta = 60$	Polpa de manga <i>in natura</i> e modificada
Almeida (2010)	$\Delta P / \Delta P_{jm} = f(t)$ $u / u_{jm} = f(t)$	$D = 0,30 \text{ m}$ $D_0 = 0,05 \text{ m}$ $\Theta = 60$	Água destilada, ovo homogeneizado, carbonato de cálcio, lodo de esgoto e leite desnatado.

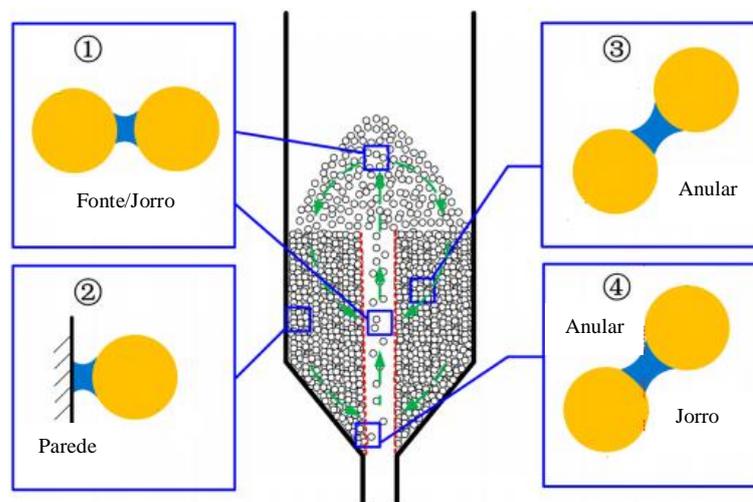
<b>Quadro 2.3 - Continuação</b>			
<b>Referência</b>	<b>Variáveis fluidodinâmicas estudadas</b>	<b>Características do leito</b>	<b>Tipo de pasta</b>
Nascimento (2013)	$\Delta P/\Delta P_{mj} = f(t)$ $u/u_{mj} = f(t)$	D = 0,30 m D <sub>0</sub> = 0,05 m $\Theta = 60$	Ovo homogeneizado, Própolis, soro de leite, leite desnatado, leite integral e leite semidesnatado
Perazzini (2015)	$\Delta P/\Delta P_{mj} = f(\Theta, t)$	D = 0,30 m D <sub>0</sub> = 0,03 m $\Theta = 60$	Água e leite desnatado
Vieira (2015)	$\Delta P/\Delta P_{mj} = f(Q_p, t)$	D = 0,30 m D <sub>0</sub> = 0,05 m $\Theta = 60$	Leite integral
Xu et al. (2015)	$u_{mj} = f(S)$ $h_{max} = f(d_p, D)$	D = 0,14 m D <sub>0</sub> = 0,016 – 0,025 m $\Theta = 60^\circ$	Água

**Fonte: Elaborado pelo autor**

No que diz respeito aos parâmetros fluidodinâmicos apresentados anteriormente no Quadro 2.3, alguns trabalhos mostraram que a queda de pressão no leito de jorro convencional torna-se menor com a presença de materiais líquidos. Tal fato foi constatado por exemplo por Schneider e Bridgwater (1993) ao analisar a queda de pressão no jorro estável na presença de água, glicerol e suspensões de alumina. Segundo os próprios autores isso ocorreu porque a presença da fase líquida diminuiu a passagem do ar pela região anular, por conseqüência, houve uma canalização do ar para a região no jorro, reduzindo a queda de pressão global (jorro + ânulo). Desta forma, uma maior proporção do ar é forçada a passar pelo canal do jorro. Outra possibilidade apresentada por esses autores reside nas forças de interação formadas por pontes líquidas entre as partículas, entre as mesmas e a parede do secador e entre as partículas e a interface das regiões jorro-anular.

As pontes líquidas e a porosidade na região anular são para Xu et al. (2015) os fatores mais importantes que podem influenciar nos parâmetros fluidodinâmicos, isto porque levam à efeitos muito diferentes dos que são encontrados com o leito seco. Segundo esses autores as pontes líquidas podem influenciar em todas as regiões do leito de jorro, como mostra a Figura 2.5. A presença de líquido entre as partículas pode levar a aglomeração nas regiões de jorro e da fonte (situação 1), as partículas podem estar “agarradas” próximas as paredes internas do secador (situação 2), o deslocamento das partículas da região anular para a região de jorro pode ser lento, se a fase líquida estiver entre as partículas na região anular, (situação 3) e a presença de liquido entre as partículas na interface jorro-ânulo prejudica as mesmas, dificultando que elas alcancem elevadas velocidades na região do jorro (situação 4).

**Figura 2. 5 - Diagrama esquemático das pontes líquidas dentro do leito de jorro**



**Fonte: Adaptado de Xu et al. (2015)**

Embora os resultados obtidos pelos autores mencionados no Quadro 2.3 apresentem concordância qualitativa, Passos e Mujumdar (2000) ao analisar os efeitos das forças capilares na aglomeração do leite úmido, usando também glicerol, constataram que o comportamento da queda de pressão no jorro estável tende a aumentar, mas em seguida diminui até um dado valor. A explicação para esse comportamento foi baseada nas hipóteses postuladas por Santana et al. (1997), segundo esses autores podem existir dois tipos distintos de ligações interpartículas que atuam dentro do leite de jorro. Uma ligação é formada por pontes líquidas fracas devido a um baixo conteúdo de líquido que recobre as partículas formando um filme muito fino. Nesta situação, o líquido atua como um lubrificante, o que faz com que a circulação das partículas seja maior, levando as partículas situadas na região anular deslocarem com facilidade para a região de jorro, conseqüentemente, a queda de pressão do leite torna-se maior. A segunda ligação está relacionada com a formação de pontes líquidas mais fortes. Isso acontece quando o conteúdo de líquido é aumentado acima de um valor limite onde a camada de recobrimento das partículas torna-se mais espessa. Nessas condições, há uma redução tanto na porosidade da região anular como na taxa de circulação das partículas, promovendo uma redução na queda de pressão.

Comportamento similar foi observado por Almeida et al. (2010) na secagem de ovo homogeneizado, leite desnatado e carbonato de cálcio em diferentes concentrações. No caso do carbonato de cálcio, o autor usou concentrações mássicas variando entre 3,02 e 9,24%, sendo que acima de 5,74% foi observado que queda de pressão apresentou comportamento inverso do que foi discutido anteriormente no trabalho de Schneider e Bridgwater (1993) e neste caso a queda de pressão teve um aumento significativo.

As características das pastas também afetam a dinâmica do leite conforme mostrou Medeiros (2004) ao analisar influência da composição química de polpas de frutas na secagem. Neste trabalho verificou-se que ao adicionar as polpas no leite, houve uma diminuição brusca na queda de pressão no momento que foram adicionadas. Segundo Medeiros (2004) a explicação para tal comportamento reside nas explicações de Schneider e Bridgwater (1993) apresentada anteriormente, contudo sendo neste caso a viscosidade do material responsável por aglomerar e prejudicar a circulação das partículas. Medeiros (2004) verificou ainda o efeito causado pela gordura e o açúcar que compõe as polpas de frutas na queda de pressão máxima e na vazão de mínimo jorro. Os efeitos da gordura nos parâmetros fluidodinâmicos contribuíram de forma positiva na estabilidade do leite, conforme foi visto nos experimentos conduzidos, apresentando menores queda de pressão máxima e maiores vazões de jorro mínimo. Por outro lado, os açúcares prejudicaram o desempenho

fluidodinâmico causando instabilidades durante a operação. Segundo Ochoa-Martinez et al. (1993) a característica pegajosa do açúcar dificulta a circulação do particulado inerte proporcionando o acúmulo da pasta sobre sua superfície, como consequência, aumentando a queda de pressão.

Comportamento similar foi observado por Nascimento (2013) na secagem de diferentes tipos de leite, como o leite desnatado, semidesnatado, integral e com baixo teor de lactose. Os efeitos desses materiais líquidos sob a queda de pressão foram observados através do adimensional de pressão do leite no regime transiente. Com condições estabelecidas de 80°C e 1,15  $u_{mj}$  e vazão de alimentação igual a 20 ml/min verificou-se que as maiores variações observadas pelo adimensional de queda de pressão foi quando utilizou-se o leite desnatado ( $1,5 \Delta P_i / \Delta P_{t=0}$ ). Para os demais tipos de leite, os valores dos adimensionais foram próximos da unidade. A justificativa para esse comportamento baseou-se na mencionada anteriormente por Ochoa-Martinez et al. (1993).

A altura da fonte é mais um parâmetro fluidodinâmico que foi constatado através dos trabalhos apresentados anteriormente no Quadro 2.3 que influenciava na dinâmica do leite. Almeida (2013) relata que a fonte aumenta quando a vazão de ar também é aumentada, tanto no leite seco quanto úmido. Entretanto, no caso do leite úmido é mais difícil manter um jorro estável com baixas alturas da fonte (XU et al. 2015). Segundo afirmam Patel et al. (1986) e Schneider e Bridgwater (1993), isso ocorre porque quanto maior o volume de líquido presente sobre o leite, maior deve ser a vazão do ar necessária para manter o jorro estável, o que faz com que a altura da fonte aumente.

Além da queda de pressão e da altura da fonte, a análise dos trabalhos citados no Quadro 2.3 mostraram que a velocidade de mínimo jorro do ar é o parâmetro fluidodinâmico que apresentou mais contradições dentre os trabalhos encontrados na literatura. Schneider e Bridgwater (1993) verificaram que a velocidade de mínimo jorro aumentou inicialmente à medida que a quantidade de glicerol foi alimentada sob o leite até atingir um ponto máximo. Deste ponto em diante, um pequeno aumento do glicerol dentro do leite de jorro causou uma redução nesse parâmetro. Cabe neste momento chamar à atenção para a altura do leite conduzido nos ensaios experimentais de Schneider e Bridgwater (1993), haja visto que para o comportamento apresentado para a velocidade de mínimo jorro a altura do leite foi de 0,05m. Quando os autores realizaram o mesmo procedimento usando uma dada velocidade de mínimo jorro, a altura do leite igual a 0,15 m, o comportamento correspondente para essa altura foi a redução do parâmetro com o aumento da concentração de glicerol. Este comportamento vai ao encontro com que foi observado no trabalho de Patel et al. (1986).

Porém, contradizendo o trabalho realizado por Passos e Mujumdar (2000), os quais mostraram que velocidade de mínimo jorro tornou-se maior à medida que aumentou a quantidade de glicerol dentro do leito de jorro.

As propriedades das pastas também influenciam na velocidade de mínimo jorro como relatam Nascimento (2013); Almeida (2009) e Bacelos et al. (2007). Medeiros (2004) mostrou claramente a dependência desse parâmetro com a composição química do material pastoso envolvido no processo. Segundo esses autores, diferentemente do comportamento apresentado usando glicerol, este parâmetro aumenta independentemente da alimentação, seja batelada ou continuamente, devido a formação de pontes sólidas com o leito de partículas inertes. Para Spitzner Neto (2001) isto está relacionado com a umidade do pó coletado na saída do leito de jorro por ser muito próxima da umidade do filme formado sobre a superfície do particulado inerte. Assim, pode-se afirmar que o filme que recobre as partículas inertes era formado por material seco pulverizado ao invés de um filme líquido. Conforme foi observado na literatura fica evidente que a presença da fase líquida afeta a estabilidade do leito.

Da mesma maneira que foram apresentadas as aplicações do leito de jorro convencional na secagem de pastas, o item a seguir mostra os principais trabalhos de secagem de diferentes tipos de pastas usando o leito de jorro mecânico.

### 2.2.3 Aplicações do leito de jorro mecânico na secagem de pastas

As primeiras aplicações do secador leito de jorro com parafuso helicoidal surgiram no final da década de 80 com a secagem de suspensões de carbonato de cobalto e de zinco realizada pelo pesquisador Szentmarjay; Pallai (1989). Desde então, diferentes tipos de materiais líquidos, tais como soluções, suspensões, emulsões, polpas e pastas do processamento alimentício têm sido secos com sucesso, demonstrando que este tipo de configuração de leito de jorro pode ser aplicado para um grande número de materiais pastosos.

Através dos trabalhos realizados, enfatizou-se por várias vezes que esta configuração de leito de jorro é uma excelente alternativa do ponto de vista operacional e de secagem capaz de realizar operações envolvendo baixas quedas de pressão e menor custo energético. Porém, o volume de trabalhos publicados não permite que essas vantagens possam ser estendidas para pastas em geral, pois existe uma gama de materiais pastosos com distintas características físicas e reológicas que ainda não foram testados nessa configuração de leito de jorro.

No Quadro 2.4 é apresentada uma lista dos trabalhos existentes sobre a secagem de pastas usando o leito de jorro com parafuso helicoidal desenvolvido no Instituto de Pesquisas da Hungria. Nesse quadro são apresentados em ordem cronológica os trabalhos seguidos pelos tipos de particulados inertes e seu tamanho. Além disso, são apresentados também as condições operacionais, a rotação e os tipos de materiais líquidos usados nos referidos trabalhos.

**Quadro 2.4 - Trabalhos realizado sobre a secagem de pasta no leito de jorro mecânico.**

<b>Referência</b>	<b>Material Inerte</b>	<b>Condição Operacional</b>	<b>Faixa de rotação do parafuso helicoidal</b>	<b>Materiais Líquidos</b>
Szentmarjay et al. (1989)	Esferas de vidro $d_p = 6\text{mm}$ $\rho_p = 2500\text{ kg/m}^3$	$u = (10 - 15)\text{ m/s}$ $T = 120^\circ\text{C}$ $Q_p = 80\text{ m}^3/\text{h}$	$\theta = 700\text{ rpm}$	Carbonato de cobalto e Carbonato de zinco
Kudra et al. (1989)	-	* $u = 1,1\text{ m/s}$ $T = 75 - 170^\circ\text{C}$ $Q_p = 3,4 - 8,3\text{ kg/h}$	-	Carbonato de cálcio, Plasma sanguíneo e Óxido de zinco
Szentmarjay et al. (1994)	Partículas de Hostaform $d_p = 7,6\text{ mm}$ $\rho_p = 1340\text{ kg/m}^3$	$q_{ar} = 80\text{ m}^3/\text{h}$ $T = 174 - 178^\circ\text{C}$ $Q_p = 3,7 - 4,7\text{ cm}^3/\text{min}$	$\theta = 195 - 600\text{ rpm}$	Suspensões de carbonato de cobalto
Szentmarjay et al., (1996)	Esfera de vidro $d_p = 4,0\text{ mm}$ $\rho_p = 2500\text{ kg/m}^3$ Partículas de Hostaform $d_p = 7,6\text{ mm}$ $\rho_p = 1340\text{ kg/m}^3$	$q_{ar} = 75 - 95\text{ m}^3/\text{h}$ $T = 104 - 106^\circ\text{C}$ $q_{ar} = 75 - 95\text{ m}^3/\text{h}$ $T = 90^\circ\text{C}$	$\theta = 550\text{ rpm}$ $\theta = 450\text{ rpm}$	Polpa concentrada de tomate e Suspensão de levedura
Szentmarjay et al. (1996)	Partículas de Hostaform $d_p = 7,6\text{ mm}$ $\rho_p = 1340\text{ kg/m}^3$		$\theta = 0 - 1000\text{ rpm}$	Suspensões de levedura e Amido

<b>Quadro 2.4 - Continuação</b>				
<b>Referência</b>	<b>Material Inerte</b>	<b>Condição Operacional</b>	<b>Faixa de rotação do parafuso helicoidal</b>	<b>Materiais Líquidos</b>
Pallai et al. (2007)	Partículas de Hostaform $d_p = 7,6 \text{ mm}$ $\rho_p = 1340 \text{ kg/m}^3$	$q_{ar} = 70 \text{ m}^3/\text{h}$ $T = 40 - 80^\circ\text{C}$ $Q_p = 3 - 4,5 \text{ cm}^3/\text{min}$	$\theta = 396 \text{ rpm}$	Hidróxido de alumínio e Polpa de tomate concentrada
Gyenis et al. (2008)	Partículas de Hostaform $d_p = 7,6 \text{ mm}$ $\rho_p = 1340 \text{ kg/m}^3$	$q_{ar} = 15 - 70 \text{ m}^3/\text{h}$ $T = 40 - 80^\circ\text{C}$ $Q_p = 3 - 20 \text{ cm}^3/\text{min}$	$\theta = 210 - 520 \text{ rpm}$	Polpa concentrada de tomate e Albumina de soro bovino

**Fonte: Elaborado pelo autor**

Sobre as informações apresentadas anteriormente no Quadro 2.4 foi visto que o material particulado inerte usado na maioria das vezes foi um polímero cuja característica é de resistir à temperaturas elevadas (acima de 140°C). No caso das condições operacionais, estas variaram desde a mais baixa como, por exemplo, a temperatura do ar de entrada igual a 40°C até a uma elevada de 174°C, o mesmo pode-se dizer para a velocidade de rotação do parafuso helicoidal variando entre 0 e 1000 rpm. Os materiais líquidos mais usados foram soluções inorgânicas e polpas orgânicas, como por exemplo, polpa de tomate.

#### 2.2.4 Modelos matemáticos de secagem de pasta em leito de jorro

Os modelos matemáticos encontrados na literatura são utilizados com o propósito de descrever o comportamento do processo de secagem. No Quadro 2.5 são apresentados, de forma resumida, alguns dos modelos comumente usados na secagem de pastas em leito de jorro, destacando-se suas principais características e limitações.

**Quadro 2.5 - Modelos matemáticos da secagem de pastas em leito de jorro.**

<b>Modelo matemático</b>	<b>Características do modelo</b>	<b>Limitações do modelo</b>
Pham (1983)	Balanço de entalpia para as fases gás e sólido	A secagem ocorre apenas na região anular. A dinâmica do leito não é influenciada pela presença da pasta. As perdas térmicas são desprezíveis.
Barret e Fane (1989)	Modelo qualitativo	A presença da pasta não afeta as condições fluidodinâmica do leito. Abordagem matemática de extrema complexidade.
Reyes e Massarani (1991)	Modelo de equilíbrio termodinâmico.	Pode ser usado para materiais com elevada umidade. As fases existentes estão em equilíbrio térmico. A secagem ocorre preferencialmente na região anular. Não há troca de massa e nem de energia do gás na região do jorro.

<b>Quadro 2.5 - Continuação</b>		
<b>Modelo matemático</b>	<b>Características do modelo</b>	<b>Limitações do modelo</b>
Markowski (1992)	Balanço global de massa e localizado no eixo radial para energia.	É desprezível a troca de energia desde a região anular até a região de jorro. Na região anular, a fase particulada e o gás estão em equilíbrio.
Reyes (1993)	Modelo a duas regiões composto de balanço de massa e energia para as regiões anular e de jorro.	A transferência de energia desde a região de jorro até a anular é desprezível. As partículas retornam para a região de jorro próximo à entrada do leito. O material particulado e o gás estão em equilíbrio térmico na região anular. Necessidade de uma variável de saída.
Oliveira (1996)	Modelo composto de balanços de massa e de energia para as regiões da fonte, anular e de jorro.	A presença da pasta não afeta a dinâmica do leito.
Abarca (2001)	Balanço global de massa e energia	Admite que o leito seja um tanque perfeitamente agitado.

<b>Quadro 2.5 - Continuação</b>		
<b>Modelo matemático</b>	<b>Características do modelo</b>	<b>Limitações do modelo</b>
Fernandes (2005)	Balanço de energia no aquecedor e na região de jorro e balanço de massa nas fases particuladas e do gás	Admite que o leito seja um tanque perfeitamente agitado. A difusão na película aderida é desprezível. Apenas acúmulo de energia no aquecedor.
Almeida et al (2009)	Balanço macroscópico de massa e energia para as fases gás, sólida e líquida.  Composto por uma expressão exponencial que descreve a taxa de secagem.	Comportamento referente a um tanque perfeitamente agitado (CST).  A temperatura do sólido na saída é igual à temperatura do gás de saída do secador.  Acúmulo desprezível da pasta no leito.  A difusão da fase líquida no interior do filme que recobre as partículas é desprezível.

**Fonte: Elaborado pelo autor**

### 2.3 Secagem de grãos em leito de jorro

O leito de jorro pode operar em regimes fluidodinâmicos desde o diluído até o denso, ambos capazes de permitir que seja realizada uma secagem uniforme e com a mínima degradação dos materiais granulares (MARKOWSKI et al. 2007). No regime diluído (região do jorro) o transporte dos grãos é realizado no sentido ascendente e concorrente à vazão do ar de secagem e alta porosidade, enquanto no regime mais denso, a maioria das partículas está na região anular, contracorrente a vazão do ar de entrada, a uma velocidade muito menor a que existe na região diluída (PRACHAYAWARAKORN et al. 2006).

Embora a secagem dos grãos no leito de jorro seja puramente convectiva, o mecanismo de transporte da umidade para a corrente gasosa difere em cada região do leito. Na região central (região do jorro) o ar aquecido em contato com o grão úmido encontra-se à elevadas velocidades e temperaturas, conseqüentemente, os coeficientes das trocas térmica e de massa também são altos. Além disso, o transporte dos materiais sólidos nessa região é bastante diluído e devido a velocidade do ar ser alta o tempo de residência nesta região é curto. Estas características tornam essa região importante na remoção de umidade de materiais no período de taxa constante, uma vez que nesta fase da secagem os mecanismos de transferência de massa são controlados pelas condições externas (ar de secagem). Por outro lado, na região anular pelo simples fato da velocidade do material particulado ser menor que na região de jorro e a porosidade baixa em relação ao jorro, há o favorecimento da secagem de materiais no período a taxa decrescente, visto que a transferência de massa é controlada por mecanismos de difusão (interior do material).

Devido a essas particularidades, o leito de jorro vem sendo aplicado amplamente na secagem de materiais sólidos sensíveis ao calor, principalmente produtos agrícolas, tais como trigo, soja, ervilha, lentilhas, dentre outros. Sua importância na secagem desses tipos de materiais deve-se ao fato de que o leito de jorro pode ser aplicado usando corrente gasosa à elevada temperatura, independentemente do tipo de grão, mantendo a boa qualidade do produto (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Dentro desse contexto, serão apresentadas as principais aplicações do leito de jorro convencional na secagem de materiais granulares.

### 2.3.1 Aplicações do leito de jorro convencional na secagem de materiais granulares

Historicamente, o leito de jorro convencional foi aplicado pela primeira vez na secagem de grãos de trigo devido à grande vantagem em relação aos secadores tradicionais, a obtenção de elevadas temperaturas do ar sem que danificasse os grãos. Desde então, o leito de jorro tem sido empregado por várias décadas na secagem de uma variedade de materiais particulados, tais como poliméricos, fertilizantes e especialmente materiais granulares agrícolas (CANESIN; MASSARANI, 1984; KALWAR; RAGHAVAN, 1992; LIMA, 1995).

No Quadro 2.6 é apresentada uma visão geral da secagem de grãos realizada ao longo dos anos utilizando a configuração leito de jorro convencional (cônico-cilíndrico). Esse quadro é composto por informações com base nas dimensões do leito, das condições operacionais e dos tipos de grãos usados na secagem. Em conjunto com essas informações são apresentadas também as principais conclusões, sendo estas referentes ao efeito das variáveis usadas nas condições operacionais, como temperatura e velocidade do ar de secagem, umidade dos grãos, umidade relativa na saída do secador sobre a qualidade do material usado e na taxa de secagem.

**Quadro 2.6 – Principais aplicações do leito de jorro convencional na secagem de materiais granulares.**

Referência	Dimensões do secador	Condições operacionais	Tipo de grão	Principais conclusões
Becker e Sallans (1960)	LJC Dc = 23 cm Di = 3,8 cm $\theta = 120^\circ$	$T_f = 207 - 331^\circ\text{C}$ $Q_p = \text{n.i}$ $q_{\text{ar}} = 0,015 \text{ kg/min}$ $W_{\text{bs}} = 10\%$	Trigo dp= 3,6 cm	Os grãos não foram danificados durante a secagem no leito de jorro, mesmo usando elevadas temperaturas do ar de entrada.
Peterson (1962)	LJC Dc = 30,48 cm Di = 5,08 cm $\theta = 35^\circ$	$T_f = 124 - 448^\circ\text{C}$ $Q_p = \text{n.i}$ $q_{\text{ar}} = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ $W_{\text{bs}} = 31\%$ lentilhas $q_{\text{ar}} = 0,32 \text{ m}^3/\text{s}$ $W_{\text{bs}} = 24,6\%$ linhaça $q_{\text{ar}} = 0,34 \text{ m}^3/\text{s}$ $W_{\text{bs}} = 34,7\%$	Ervilhas dp= 0,66 cm Linhaça dp= 0,22 cm Lentilhas dp= 0,44 cm	Observou-se atrição dos grãos durante a secagem. Os grão não foram danificados à elevadas temperaturas do ar de secagem. Foram verificados: maior eficiência térmica e capacidade de evaporação em relação ao secador convencional não agitado. Constatou que o custo da instalação do leito de jorro na escala industrial é menor em relação ao secador outro tipo diferente de secador convencional usado.
Brunello et al (1974)	LJC Dc = 30,48 cm Di = 5,08 cm $\theta = 35^\circ$	$T_f = 60 - 90^\circ\text{C}$ $Q_p = 25 - 35 \text{ kg}$ $q_{\text{ar}} = 4,51 - 7,5 \text{ k/min}$ $W_{\text{bs}} = 80\%$	Cevada dp= n.i	As condições operacionais empregadas não danificaram os grãos.

**Quadro 2.6 - Continuação**

Referência	Dimensões do secador	Condições operacionais	Tipo de grão	Principais conclusões
Lima (1995)	LJC Dc = 17 cm Di = 5 cm $\theta = 60^\circ$	$T_f = 73 - 83^\circ\text{C}$ Qp = 1,5 – 3,0 kg $q_{\text{ar}} = \text{n.i}$ $W_{\text{bs}} = 20 - 30\%$	Feijão dp= 7,5 cm	A temperatura do ar e a umidade inicial dos grãos influenciaram na taxa de secagem
Medeiros (2004)	LJC Dc = 7,2 cm Di = 3 cm $\theta = 60^\circ$	$T_f = 57,5 - 58,5^\circ\text{C}$ Qp = 1,15 – 1,37 kg $u_{\text{ar}} = 0,76 - 0,90 \text{ m/s}$	Feijão dp= 0,84 cm	A vazão e temperatura do ar influenciaram diretamente nas taxas de secagem.
Oliveira e Rocha (2007)	LJC Dc = 20 cm Di = 5 cm $\theta = 60^\circ$	$T_f = 60 - 80^\circ\text{C}$ $W_{\text{bs}} = 19 - 32\%$	Feijão dp= 7,34 cm	O modo intermitente demonstrou-se promissor na secagem dos grãos de feijão. Verificou-se que o modo de operação aumentou a eficiência energética mantendo a qualidade do produto
Magalhães e Pinho (2008)	LJC Dc = 25 cm Di = 5 cm $\theta = 45^\circ$	$T_f = 40 - 70^\circ\text{C}$ $u_{\text{ar}} = 1,08 - 1,78 \text{ m/s}$ $W_{\text{bs}} = \text{n.i}$	Rolha dp= 2,32 cm	Temperatura e umidade relativa do ar influenciaram na taxa de secagem
Markowsk et al., (2010)	LJC n.i	$T_f = 33 - 56^\circ\text{C}$ $W_{\text{bu}} = 17,5\%$	Cevada dp= 0,43 cm	O tempo para a umidade relativa e a umidade atingirem o equilíbrio foi menor para a maior temperatura do ar.
Santana (2011)	LJC Dc = 16 cm Di = 2,54 cm $\theta = 60^\circ$	$T_f = 46-65^\circ\text{C}$	Linhaça dp= 1,74 cm	Para as temperaturas empregadas não foi verificado danos nos grãos. A umidade dos grãos diminuiu com o tempo de secagem e sob forte influência da temperatura do ar de entrada.

**Quadro 2.6 - Continuação**

Referência	Dimensões do secador	Condições operacionais	Tipo de grão	Principais conclusões
Evangelista Neto (2013)	LJC Dc = 18 cm Di = 3 cm $\theta = 60^\circ$	$T_f = 33 - 56^\circ\text{C}$ $W_{bu} = 17,5\%$	Girassol dp= 5,32 cm	A temperatura e a carga de grãos influenciaram na taxa de secagem
Chielle et al., (2015)	LJC Dc = 17,2 cm Di = 0,02 cm $\theta = 60^\circ$	$T_f = 40 - 100^\circ\text{C}$ $u_{ar} = 9,24 - 11,76 \text{ m/s}$ $W_{bu} = 17,5\%$	Sementes de mamão dp= 5,32 cm	Secagem prévia das sementes de mamão O leito de jorro foi considerado pelos autores uma boa alternativa no processamento das sementes de mamão.
Freire et al., (2016)	LJC Dc = 36 cm Di = 6,0 cm $\theta = 32^\circ$	$T_f = 70 - 90^\circ\text{C}$ $u_{ar} = 4,2 \text{ m/s} (1,7 = u/u_{mj})$ $W_{bu} = 10,0\%$	Bagaço de laranja	Secagem foi realizada na proporção 2:1, p/ 1kg de resíduo seco para 0,5 kg de resíduo úmido A dimensão do leito foi modificada para que não ocorresse o colapso do jorro, sendo este eficiente para o cone com o ângulo de $32^\circ$ . O aumento da temperatura do ar de entrada proporcionou na redução da umidade do resíduo. Além disso, foi verificado que as propriedades psicrométricas do ar também foram influenciadas.

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme foi visto no Quadro 2.6, o leito de jorro convencional foi aplicado usando elevadas temperaturas do ar de secagem. Sobre as condições de operação, variáveis como temperatura e velocidade do ar de secagem, assim como a umidade inicial do material granular oferecem influência sobre a taxa de secagem dos grãos.

### 2.3.2 Aplicações do leito de jorro mecânico na secagem de materiais granulares

A respeito da aplicação do leito de jorro mecânico nas operações de secagem de grãos, foi encontrado na literatura apenas um único trabalho, sendo este realizado na década de 80 e pelo mesmo grupo de pesquisa da Hungria. Foi na secagem de grãos que esta configuração de secador foi usada pela primeira vez, mostrando-se um secador atraente do ponto de vista operacional e da secagem, uma vez que possibilitou trabalhar com baixas quedas de pressão e um melhor aproveitamento do ar para o processo.

Péter et al. (1985) foram os primeiros pesquisadores a utilizarem o parafuso helicoidal na secagem de materiais granulares, como batatas fatiadas em formato “chips” e cenouras cortadas em cubos. A secagem foi realizada de duas formas, sendo uma destas reaproveitando o ar de saída. A outra maneira o ar não era reaproveitado e deixava o sistema de secagem por uma saída na parte superior do leito de jorro. Nesse trabalho, os pesquisadores afirmam que as principais vantagens dessa configuração de leito de jorro estão relacionadas com o transporte mecânico dos materiais, pois o uso do parafuso helicoidal possibilitou reduzir pela metade a demanda energética do secador, e assim, aproveitando o ar para as condições da secagem dos legumes. Foi concluído que o produto final foi um material uniformemente seco e com aproximadamente 8% de umidade, sendo estes resultados observados nos dois sistemas de secagem.

## 2.4 Comentários finais

Dentro do contexto apresentado, existe uma preocupação crescente no sentido de realizar modificações no leito de jorro convencional com o propósito de minimizar ou eliminar as limitações encontradas nessa configuração de leito de jorro. Surge, então, como alternativa promover a circulação das partículas por meio de uma rosca sem fim, ao invés do transporte pneumático. Desta forma, torna-se possível realizar operações com baixas quedas de pressão, aproveitando melhor a corrente de ar para as condições da secagem, além de realizar operações com jorro estável para qualquer altura do leito particulado. O modo de como a circulação do material particulado é promovido e as vantagens que este conceito de

leito de jorro apresentam, constituem a justificativa para que trabalhos sobre secagem no leito de jorro mecânico sejam incentivados. Porém, não foram encontrados na literatura trabalhos realizados em leitos de jorro semelhantes que possibilitem atuar com e sem o parafuso helicoidal, mantendo-se idênticas as dimensões do leito, o que faz com que exista uma carência de informações na literatura frente a secagem de materiais pastosos e granulares.

No próximo capítulo serão apresentados os materiais e métodos que foram empregados nos experimentos realizados nesse trabalho, usando as duas configurações de leito de jorro, o mecânico e a convencional.

## CAPÍTULO 3

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados em três seções os materiais particulados, a unidade experimental e os métodos empregados no presente trabalho de pesquisa. Na primeira seção (3.1) são informados os materiais sólidos e suas principais propriedades físicas, bem como as pastas usadas e suas composições químicas. A seção 3.2 está reservada à descrição da unidade experimental, destacando-se as configurações de leito de jorro e as dimensões do parafuso helicoidal. A seção 3.3 encerra este capítulo e apresenta a descrição dos procedimentos experimentais e numéricos usados na caracterização fluidodinâmica dos leitos de jorro, atrição dos materiais particulados, evaporação de água e a secagem dos materiais pastosos e granulares.

#### 3.1 Materiais

Os materiais particulados selecionados na condução dos ensaios experimentais foram: partículas de dolomita, esferas de vidro e alumina. A seleção desses diferentes tipos de materiais levou em consideração a finalidade do estudo, além de apresentarem distintas propriedades físicas. Usou-se as esferas de alumina na secagem dos grãos por ser um excelente adsorvente, visto que pode ser considerado como um grão modelo e também por favorecer na análise dos mecanismos internos e externos do processo de secagem. No caso das esferas de vidro na secagem de pastas, esse material particulado garante que a secagem seja processada apenas sobre sua superfície formando um filme líquido, servindo também de suporte nas trocas térmicas do processo de secagem. De modo específico, para os ensaios de atrição optou-se por usar os três materiais particulados, justamente pelo fato de serem distintos fisicamente, um interessante meio comparativo em relação às esferas de vidro, que devido sua importância é comumente utilizado como inerte na secagem de pastas em leito de jorro.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as propriedades físicas de cada material particulado no que diz respeito ao diâmetro médio, porosidade e massa específica (real e aparente), bem como as técnicas de medidas utilizadas para caracterizar cada um desses materiais sólidos.

**Tabela 3.1-** Propriedades físicas dos materiais particulados.

Propriedade	Vidro	Alumina	Dolomita
$d_p$ (mm)	3,20 (a)	3,42 (a)	6,22 (b)
$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )	-	1501 (c)	-
$\rho_{real}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2500 (d)	2482 (c)	2819 (c)
$\Phi$ (-)	1 (b)	1 (b)	0,85 (b)

(a) Peneiramento, (b) Análise de imagem, (c) Picnometria a gás, (d) Picnometria líquida

No caso do diâmetro médio, o valor para as esferas de vidro e de alumina foi obtido a partir do cálculo do diâmetro médio de Sauter. Esta equação considera a fração mássica retida em cada Mesh e o diâmetro médio da partícula entre as peneiras, conforme mostra Equação 3.1. Para isso, primeiramente obteve-se a distribuição granulométrica através do peneiramento, um método clássico que se fez através do agrupamento de peneiras (padronizadas) na ordem crescente do conjunto de peneiras do tipo Tyler/Mesh com a seguinte série: 4, 5, 6, 7, 8, 10 e 12, sob agitação por um período de 30 minutos. Nesse trabalho foi considerado como diâmetro médio da partícula o diâmetro médio de peneira, sendo calculado através da média aritmética entre a abertura da peneira em que o material particulado ficou retido e a peneira com abertura imediatamente maior. Desta forma, com os dados obtidos do peneiramento, calculou-se o diâmetro médio para cada tipo de material particulado.

$$dp_s = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{dp_i}} \quad (3.1)$$

Para as partículas de dolomita, a técnica usada para determinar o diâmetro médio foi diferente da usada nos materiais esféricos devido sua forma irregular não ter permitido uma boa distribuição granulométrica no peneiramento, uma vez que a maior parte da amostra usada permanecia retida na primeira peneira. Desta forma, o tamanho desse material sólido foi conhecido com base no diâmetro médio de Ferret, o qual foi obtido

utilizando o *software* ImageProPlus 4.5, considerando uma amostra com 60 partículas de dolomita antes e após o ensaio de atrição. A massa específica de todos os materiais particulados foi determinada através de ensaios de picnometria líquida com água e picnometria gasosa, sendo este último através de um picnometro a gás Hélio. Todos esses experimentos foram realizados em triplicada e o desvio médio não foi superior a 5%. Para a esfericidade das partículas de vidro, alumina e as partículas de dolomita foi utilizado também o *software* ImageProPlus 4.5.

Com respeito à fase líquida usada nos experimentos, foi usada a água como uma “pasta” modelo por ser um material que não possui característica pegajosa e isenta de partículas sólidas e o leite desnatado como pasta “real”, que por sua vez é constituído por concentrações de sólidos e ausência de gordura. Além disso, o leite desnatado é um excelente material líquido quando se deseja analisar a operacionalidade do leito de jorro, tendo em vista que sua presença afeta o comportamento fluidodinâmico e dificulta a movimentação dos inertes durante a secagem. O leite desnatado utilizado foi da marca Parmalat cuja composição referente a 200 mL fornecida pelo fabricante possui 6,0 g de proteínas, 0,0 g de gordura, 130 mg de sódio e 210 mg de cálcio.

### **3.2. Unidade experimental**

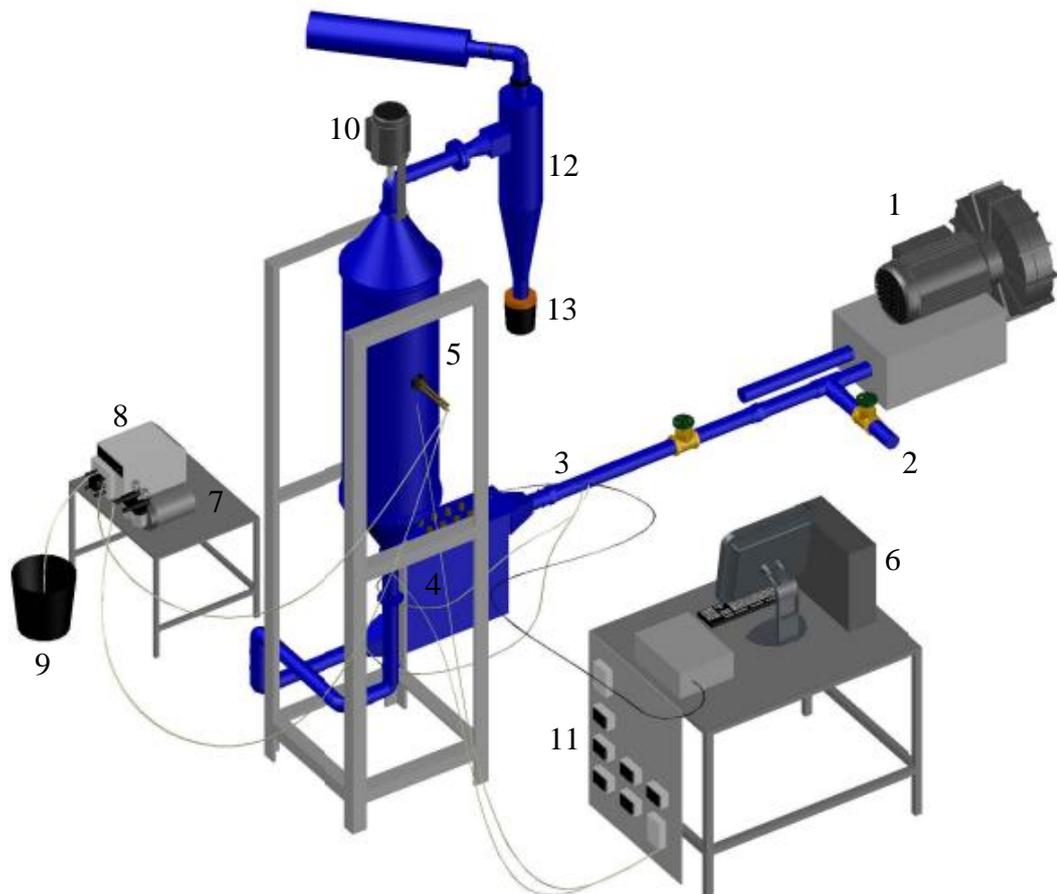
A unidade experimental utilizada na condução dos experimentos está disponível no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar e consiste de um leito de jorro cônico-cilíndrico equipado com toda a instrumentação necessária para a condução dos experimentos tanto no que envolve a parte fluidodinâmica quanto na secagem. Visando obter uma melhor compreensão, a unidade experimental é apresentada tomando como referência a Figura 3.1.

Conforme pode ser observado na Figura 3.1, o fornecimento de ar é realizado por um soprador (1) da marca IBRAM com potência nominal de 7,5 HP com capacidade máxima para vazão de ar igual  $4 \text{ m}^3/\text{min}$ . Tubulações de aço com 2 in de diâmetro nominal são responsáveis por transportar a corrente de ar desde o soprador até a entrada do leito de jorro. Antes de atingir a entrada do leito, a corrente de ar fornecida pelo soprador foi ajustada por duas válvulas gavetas com diâmetro de 2 polegadas que possibilitaram direcionar o ar atmosférico em duas direções distintas, sendo estas uma para a câmara de secagem e outra para o ambiente. A velocidade da corrente gasosa de entrada do leito foi obtida mediante a medida de diferença de pressão entre dois pontos de medida localizados no medidor tipo Venturi (3) e aferida através de um medidor Venturi padrão. Para as duas configurações do

leito de jorro, essa variável foi medida com relação ao diâmetro da entrada da base cônica de 2 polegadas.

Para os casos específicos dos ensaios de secagem, no aquecimento da corrente de ar utilizava-se um trocador de calor (4) constituído por um conjunto de três resistências elétricas com potência elétrica de 1000 W cada uma, sendo estas ligadas em paralelo. As resistências eram acionadas mediante um controlador de temperatura na marca Flyever Modelo R60, que permitiu realizar o controle da potência de aquecimento e o ajuste da temperatura de operação do ar desejada.

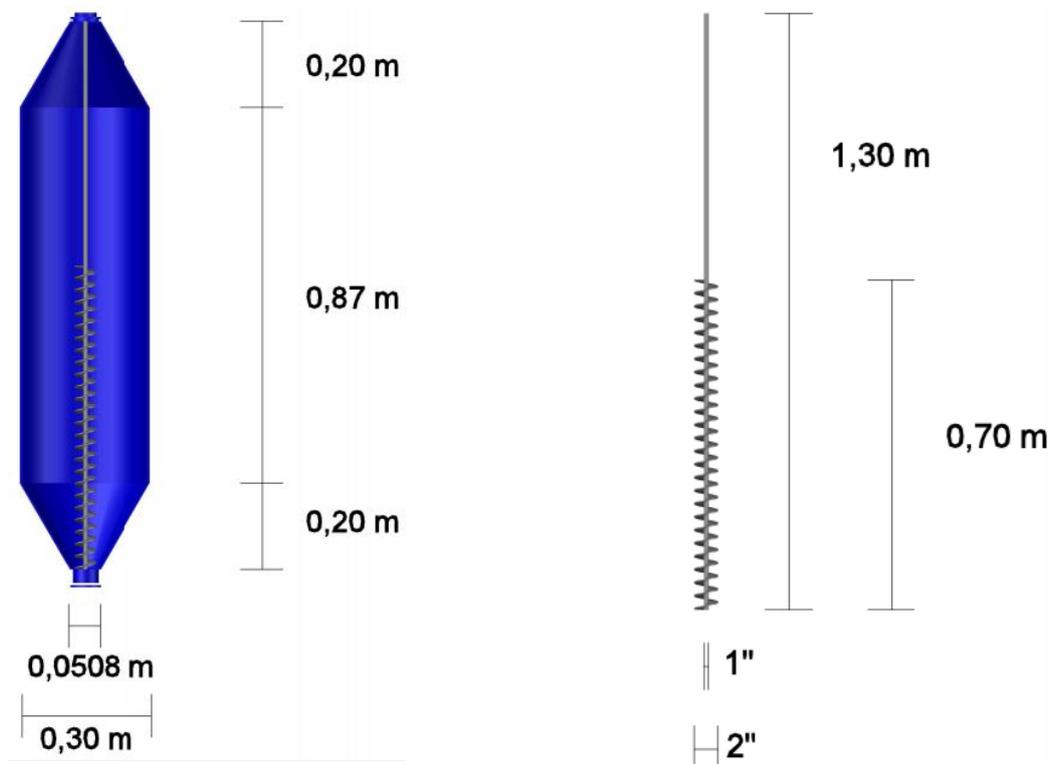
**Figura 3.1 - Diagrama esquemático da unidade experimental do leito de jorro:**  
(1) soprador; (2) sistema by pass; (3) Medidor de vazão tipo Venturi; (4) sistema de aquecimento; (5) câmara de secagem; (6) computador; (7) compressor de ar; (8) bomba peristáltica; (9) reservatório de pasta; (10) motor do parafuso helicoidal; (11) bancada de transdutores; (12) ciclone e (13) coletor de pó seco



Fonte: elaborado pelo autor

A câmara de secagem (5) é a mesma para as duas configurações de equipamento e foi construída com chapa inox de 1,5 mm de espessura, consiste de uma coluna cilíndrica de 0,87 m de comprimento e diâmetro de 0,30 m conectada a duas bases cônicas. Essas bases cônicas, sendo uma localizada na região inferior e a outra no topo (região superior) possuem dimensões semelhantes, tais como: angulação de 60°, 0,20 m de altura e 0,30 m de diâmetro, conforme mostrado na Figura 3.2. No interior da câmara de secagem, conforme mostra o diagrama esquemático na Figura 3.2, está disposto um parafuso helicoidal de dimensões: eixo de 0,01 m de diâmetro (1 polegada) 1,3 m de comprimento, 0,70 m de espiral com diâmetro e passe na medida de 0,0508 m (duas polegadas). A rotação do parafuso helicoidal é provida por um motor de corrente contínua trifásico de 1 Hp (10) acoplado à base cônica do topo. O motor trifásico é ligado ao um inversor de frequência da marca WEG CFW 10.

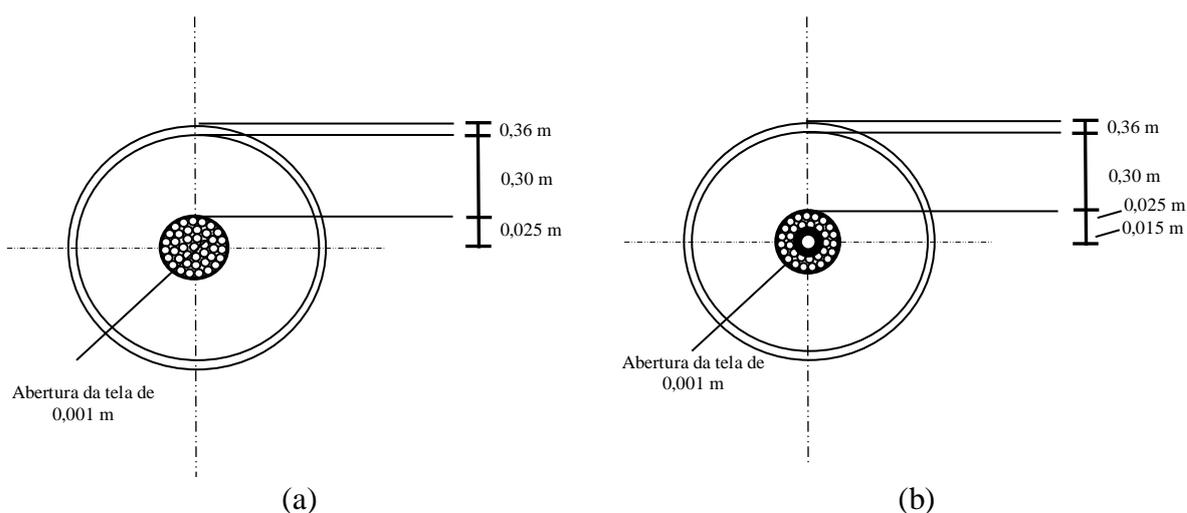
**Figura 3.2 - Dimensões da câmara de secagem e do parafuso helicoidal**



**Fonte: elaborado pelo autor**

Ainda na base cônica inferior uma tela foi inserida com a finalidade de impedir a passagem do material particulado para dentro da tubulação, sendo esta adaptada a um rolamento quando for usado o parafuso helicoidal. Detalhes da tela são observados no esquema apresentado na Figura 3.3.

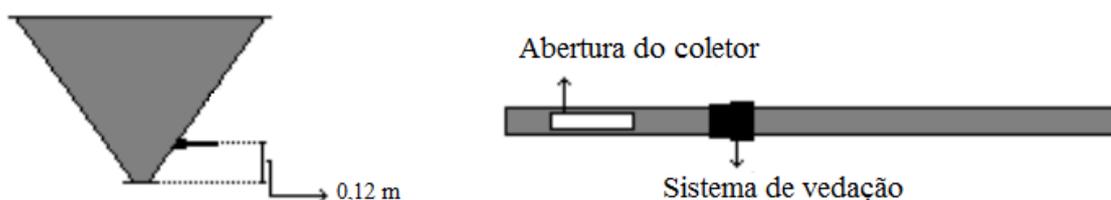
**Figura 3.3 - Vista superior detalhada da base cônica. (a) leito de jorro convencional e (b) leito de jorro com parafuso helicoidal**



**Fonte: elaborado pelo autor**

Para os ensaios de secagem de pasta, a unidade experimental possui um sistema de alimentação de material líquido constituído de um alimentador de duplo fluido posicionado na região central da câmara de secagem. O alimentador foi conectado por mangueiras a um compressor de ar (7) e uma bomba peristáltica da marca Coler Parmer (8), a qual faz a alimentação para a câmara de secagem do material armazenado em um recipiente apropriado (9). O material seco é coletado por um coletor (13) fixado na saída do ciclone tipo Lapple construído em aço inox (12). No caso da secagem dos grãos de alumina foi utilizado a mesma configuração de leito de jorro. Na sua base cônica, a 0,12 m acima da entrada do leito foi instalado um ponto de coleta dos materiais granulares, conforme detalhado no esboço da Figura 3.4.

**Figura 3.4 - Sistema instalado para coleta dos grãos de alumina. Detalhe da posição axial do coletor na base cônica e desenho esquemático do coletor de materiais granulares.**



**Fonte: adaptado de Almeida (2009)**

A unidade experimental foi instrumentada por medidores de modo que fossem obtidos, simultaneamente, os dados de pressão e temperatura durante os ensaios experimentais, em diferentes localizações do leito de jorro. Para os dados de pressão foram utilizados transdutores de pressão da marca Auto Tran Incorporated com faixa de operação de 0 – 5 Psi, sendo dois para a medida da velocidade do ar no medidor tipo Venturi e um na entrada do leito para a queda de pressão.

Para as medidas de temperatura foram utilizados termopares, sendo um na entrada do leito de jorro, dois na saída do ciclone para as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido. Todos os termopares foram calibrados em um poço de calibração da marca Block Calibrator DB-35L e os desvios médio entre as medidas do calibrador e dos termopares são inferiores a 3%.

Os sinais de pressão e temperatura eram enviados pelos seus respectivos medidores para um módulo de sistema de aquisição de dados da marca Lynx composto por uma placa condicionadora de sinais modelo ADS0500 conectado a um computador (6) que era responsável por processar e armazenar os dados com o auxílio de uma rotina computacional em modo LabVIEW®.

Finalizado a apresentação dos materiais particulados e o detalhamento da unidade experimental utilizados em todos os experimentos, o item a seguir irá encerrar este capítulo com a descrição individual dos procedimentos experimentais realizados no presente trabalho de pesquisa.

### 3.3 Procedimento Experimental

#### 3.3.1 Caracterização fluidodinâmica da unidade experimental

O procedimento experimental utilizado na caracterização fluidodinâmica para as duas configurações de leito de jorro foi conduzido conforme as condições operacionais apresentadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 - Condições operacionais utilizadas na caracterização fluidodinâmica dos leitos de jorro**

Condições operacionais	Leito de jorro convencional	Leito de jorro mecânico
Massa da carga de inerte (kg)	3,0	3,0
Velocidade do ar (m/s)	-	5 - 22
Rotação do parafuso helicoidal (rpm)	-	180 - 540

**Fonte: elaborado pelo autor**

Os experimentos realizados para obtenção dos dados de queda de pressão no leito de jorro mecânico foram realizados empregando diferentes valores de rotações e velocidades do ar de entrada. No caso do parafuso helicoidal, uma faixa de trabalho variou da mínima condição fornecida pelo inversor de frequência (180 rpm) até uma máxima permitida pelo sistema (540 rpm). Para rotações maiores, o leito de jorro era considerado como operacionalmente instável, em virtude das elevadas vibrações do motor acoplado no topo do equipamento. O mesmo foi observado também para a vazão de ar, em que testes preliminares com esferas de vidro foram realizados no sentido de obter uma faixa de velocidade de ar que pudesse ser empregada sem prejudicar os experimentos. No caso da velocidade do ar de entrada, a menor condição foi 5 m/s, sendo esse valor a quantidade mínima de ar que o sistema conseguiu fornecer para o sistema. Abaixo desse valor o sistema apresentava-se instável. O limite máximo encontrado foi de 22 m/s, acima desse valor foram observadas elevadas quedas de pressão. Essas vibrações também interferiram nas medidas das variáveis de saída no leito de jorro. Portanto, condições operacionais fora dessa faixa de velocidade do ar foram descartadas, uma vez que tornava instável do ponto de vista operacional.

Os experimentos foram realizados em triplicatas para os dois sistemas utilizando condições iniciais idênticas, como a mesma quantidade mássica de esferas de vidro (3 kg) e o diâmetro médio dessas partículas (3,20 mm).

A caracterização fluidodinâmica da unidade do leito de jorro convencional foi realizada adotando a metodologia proposta em Mathur e Epstein (1974). Essa metodologia consiste na obtenção de curvas características do leito de jorro obtidas a partir das medidas de queda de pressão em função da velocidade do ar de entrada do leito de jorro para vazões crescentes (partindo da condição de leito fixo até o jorro estável) e decrescentes (do jorro estável retornando ao leito fixo). Nessas curvas características é imprescindível a subtração dos dados da queda de pressão do leito de jorro vazio, cuja metodologia é conhecida na literatura como “teste em branco”. Desta forma, a contribuição da queda de pressão se dá apenas pela presença das partículas.

Com leito de jorro montado para a configuração convencional, primeiramente, realizava-se o procedimento experimental adicionando na câmara de secagem, conforme apresentada na Figura 3.2, uma massa pré-determinada de 3 kg de esferas de vidro; quantidade esta que preencheu apenas a região cônica do leito. Esta quantidade de inertes foi escolhida com relação aos experimentos realizados por Perazzini, (2015). Em seguida, ligava-se o soprador e, sequencialmente, regulava-se a válvula de “*by pass*” desviando uma vazão de ar para o equipamento suficiente para promover a expansão do jorro. Aguardava-se o sistema atingir o regime permanente, fato este verificado quando as temperaturas do ar na saída do leito de jorro ficavam constantes. Depois que essa condição fosse satisfeita, a válvula de “*by pass*” foi totalmente aberta de modo que o escoamento do ar fosse desviado para o ambiente. A seguir, moderadamente a válvula de “*by pass*” foi fechada e aos poucos o ar foi sendo canalizado para dentro do leito de jorro, até que fosse alcançado a condição de jorro estável. Ao final desse procedimento, realizava-se o processo inverso, ou seja, uma abertura moderada da válvula de controle até que novamente a vazão de ar fosse totalmente desviada para o ambiente. Durante esse procedimento, armazenavam-se os dados de queda de pressão e velocidade do ar toda vez que houvesse um aumento ou uma diminuição gradual da vazão de ar. Desta forma, com base no procedimento descrito obteve-se a queda de pressão total do leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada.

O procedimento experimental adotado para o teste em branco foi similar ao empregado no leito de jorro com partículas, ou seja, foram obtidos dados da queda de pressão em função da velocidade do ar para vazões crescentes e decrescentes. Nesse caso, sem a

presença da fase particulada dentro do leito de jorro, a queda de pressão deve-se, principalmente, à contribuição do atrito do fluido com a parede do leito e o orifício de entrada. Aos dados obtidos de pressão e velocidade do teste em branco foram ajustados a função potência, conforme Equação 3.2

$$\Delta P = au^b \quad (3.2)$$

Como as curvas características do leito propostas em Marthur e Epstein (1974) referem-se à queda de pressão causada somente pelo leito particulado, então, os dados da queda de pressão do equipamento sem partículas (teste em branco) foram subtraídos da queda de pressão total do leito de jorro (partículas e equipamento).

Para modificar a configuração de leito de jorro, inicialmente, separava-se as partículas do equipamento por uma abertura na região inferior do equipamento. Depois de vazio, a parte superior do secador (composto pelo topo cônico e o ciclone) foi desmontada e com o topo do leito aberto encaixava-se o parafuso helicoidal. Em seguida, a parte superior do equipamento foi fechada e sobre o topo cônico instalava-se o motor responsável por fazer a rotação do parafuso helicoidal.

Com o leito de jorro preparado para trabalhar com o parafuso helicoidal, o procedimento experimental iniciava-se selecionando no inversor de frequência uma condição operacional de rotação e, desta forma, funcionava-se o parafuso helicoidal. Com o parafuso helicoidal sob rotação, inseria-se o material particulado e em seguida acionava-se o soprador com a válvula gaveta de “*by pass*” totalmente aberta de modo que o escoamento de ar se dirigisse preferencialmente para o ambiente. A partir desse momento, regulava-se a válvula de controle para 50% de abertura e aguardava-se o sistema atingir o regime permanente. Depois que o regime permanente fosse atingido, rapidamente abria-se a válvula de “*by pass*” para desviar a vazão de ar para o ambiente e assim dar início ao monitoramento das variáveis de interesse. Deste ponto em diante o procedimento segue da mesma maneira que foi realizado no leito de jorro convencional. Ao final de cada experimento, repetia-se esse procedimento experimental, porém, ajustando-se novas condições operacionais.

O monitoramento da queda de pressão e vazão do ar das duas configurações de leitos de jorro foi realizado através do sistema de aquisição de dados, o qual efetuava a leitura de 1024 valores de vazão do ar e sua correspondente queda de pressão, fornecendo à média e o desvio padrão. Esses dados eram obtidos pela rotina em modo LabVIEW na tela do

microcomputador, os quais foram utilizados posteriormente na construção dos gráficos apresentados no capítulo 4.

### 3.3.2 Atrição dos materiais particulados

O procedimento experimental utilizado para analisar a atrição dos materiais particulados nos leitos de jorro foi conduzido conforme as condições operacionais apresentadas na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 - Condições operacionais utilizadas nos ensaios de atrição.**

Condições operacionais	Leito de jorro convencional	Leito de jorro mecânico
Massa do material particulado (kg)	2,6	2,6
Velocidade do ar (m/s) - alumina	21,45 (1,10 $u_{mj}$ ) e 23,40 (1,20 $u_{mj}$ )	9,0
Velocidade do ar (m/s) - dolomita	24,35 (1,10 $u_{mj}$ )	9,0
Rotação do parafuso helicoidal (rpm)	-	360
Tempo de atrição (min.)	2250	2250

**Fonte: elaborado pelo autor**

Referindo-se ao leito de jorro convencional e com base nos dados informados na Tabela 3.3, primeiramente, inseria-se dentro do leito de jorro uma quantidade de material particulado (2,6 kg). Em seguida, funcionava-se o soprador com a válvula de controle “*bypass*” totalmente aberta desviando a vazão de ar para o ambiente. Regulava-se para um valor fixo de velocidade do ar de entrada (17 m/s), o qual foi mantido por um determinado intervalo de tempo pré-estabelecido, sendo que ao final a válvula da tubulação de descarga do ar em excesso era totalmente aberta e o soprador desligado. Com o sistema desligado, foram retirados os materiais particulados pela região cônica do leito de jorro e em seguida pesados em uma balança digital. No caso das esferas de alumina, foi necessário realizar a secagem na estufa de convecção forçada por um período de 24 horas, devido a rápida adsorção de umidade durante o processo. Assim, ao final de cada ensaio de atrição as esferas de alumina

foram secas e posteriormente pesadas.

Para mudar de configuração de leito de jorro realizava-se o procedimento de desmontagem e instalação dos equipamentos conforme apresentado no item 3.3.1. Com o leito de jorro com parafuso helicoidal preparado, iniciava-se o procedimento experimental fixando-se os valores da velocidade do ar de entrada (0,9 m/s) e a rotação do parafuso helicoidal (360 rpm). De maneira análoga que no leito de jorro convencional, aguardava-se por um determinado intervalo de tempo pré-estabelecido, sendo que ao final cessava-se a rotação do parafuso helicoidal, a válvula da tubulação de descarga do ar em excesso era totalmente aberta e o soprador desligado. Depois que todo o sistema fosse desligado, retiravam-se os materiais particulados pela região cônica do leito de jorro e em seguida pesava-se em uma balança digital. No caso das esferas de alumina, foi necessário realizar a secagem na estufa de convecção forçada por um período de 24 horas, devido a rápida adsorção de umidade durante o processo. Assim, ao final de cada ensaio de atrição as esferas de alumina foram secas e posteriormente pesadas.

Com os dados de massa obtidos ao longo do tempo referente às duas configurações de leito de jorro, calculou-se a atrição dos materiais particulados. A atrição ( $X_a$ ) foi definida e quantificada de acordo com a Equação 3.3, sendo  $M_i$  a massa do sólido no tempo (t) e  $M_0$  a massa inicial do sólido.

$$X_a = \left(1 - \frac{M_i}{M_0}\right) \times 100 \quad (3.3)$$

Além do procedimento experimental empregado na atrição dos materiais particulados usados nos leitos de jorro, a atrição foi analisada também do ponto de vista numérico, conforme metodologia apresentada no item a seguir deste capítulo.

### 3.3.3 Modelos da cinética de atrição

Baseando-se no trabalho desenvolvido por Fernández-Akarregui et al. (2012), os quais utilizaram os modelos empíricos propostos por Gwyn (1969) e Lee et al. (1993) para analisar a cinética de atrição de partículas de areia em um leito de jorro convencional, o presente estudo optou por aplicar esses modelos, representados pelas Equações 3.4 e 3.5, para descrever o comportamento da cinética de atrição das esferas de alumina e das partículas de dolomita.

$$\frac{dW}{dt} = k_p m t^{m-1} \quad (3.4)$$

$$W = (W_0 - W_{\min}) e^{-k_a t} + W_{\min} \quad (3.5)$$

Da Equação 3.4, têm-se uma expressão matemática para estimar a massa de partículas de alumina ( $W$ ) obtida em qualquer intervalo de tempo ( $t$ ), conforme mostra a Equação 3.6.

$$W = W_0 \exp^{-k_p m t^m} \quad (3.6)$$

Em relação ao modelo proposto por Lee et al., (1993), a variável  $k_a$  utilizada nesse trabalho baseou-se na modificação realizada por Fernández-Akarregui et al. (2012), a qual teve como propósito considerar a velocidade de mínimo jorro, conforme pode ser observado na Equação 3.7.

$$k_a = k_0 e^{-k_1 / u_0 (u_0 - u_{mj})} \quad (3.7)$$

As constantes dos modelos foram estimadas com base em rotinas computacionais desenvolvidas no *software* Matlab. Para isso, tomou-se como critério a minimização dos quadrados dos desvios entre dados observados e preditos pelos modelos empregados nesse trabalho, utilizando a função *lsqcurvefit*.

### 3.3.4 Evaporação de água e secagem do leite desnatado.

O procedimento experimental utilizado para analisar a evaporação da água e a secagem do leite desnatado nos leitos de jorro foi conduzido conforme as condições operacionais apresentadas na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4 - Condições operacionais utilizadas nos ensaios de evaporação da água e secagem do leite desnatado no leito de jorro convencional e mecânico.**

Condições operacionais	Leito de jorro convencional	Leito de jorro mecânico
Massa de inerte (kg)	3,0	3,0
Temperatura (°C)	80 e 100	80 e 100
Velocidade do ar (m/s)	17 (1,10 u <sub>mj</sub> )	09 - 17
Vazão de líquido (mL/min)	20, 30 e 40	20, 30 e 40
Rotação do parafuso helicoidal (rpm)	-	360

**Fonte: elaborado pelo autor**

O procedimento experimental para a evaporação de água no leito de jorro convencional iniciava-se ligando o soprador com a válvula de “by pass” totalmente aberta para desviar a vazão de ar totalmente para o ambiente. Em seguida, regulava-se um valor fixo para quaisquer variáveis operacionais de entrada, conforme apresentadas na Tabela 3.4. Definida a variável de operação, aguardava-se o sistema alcançar o regime permanente e a partir desse instante iniciava-se a atomização da água no interior da câmara de secagem a 20 mL/min, sendo este valor escolhido para iniciar os ensaios de evaporação nesse leito de jorro. A partir desse momento, o processo passava a ser monitorado em tempo real pelo sistema de aquisição de dados até que o sistema alcançasse novamente o regime permanente. Após ter atingido novamente essa condição, interrompia-se a vazão de alimentação da água e abria-se a válvula de “by pass” desviando a passagem de ar para o ambiente. Ao final desse experimento, o leito de jorro era preparado para iniciar um novo experimento à uma vazão de alimentação de água maior.

Após ter finalizado os experimentos com água no leito de jorro convencional, montava-se a nova configuração com parafuso helicoidal. O procedimento experimental foi semelhante com o que foi descrito no parágrafo anterior. Porém, depois que o soprador foi acionado, configurava-se no inversor de frequência a rotação de trabalho (360 rpm) e para quaisquer variáveis operacionais de velocidade e temperatura informadas na Tabela 3.4,

aguardava-se o regime permanente ser atingido. Satisfeita essa condição, a vazão de alimentação de água iniciava-se com 20 mL/min. A partir desse momento, o processo passava-se a ser monitorado em tempo real pelo sistema de aquisição de dados até que o sistema alcançasse novamente o regime permanente. Após ter atingido essa condição, cessava-se nessa ordem, a alimentação da água e a rotação do parafuso helicoidal, para posteriormente desviar totalmente a vazão do ar, abrindo totalmente a válvula de “by pass”. Desta forma, dava-se por encerrado o procedimento para 20 mL/min e iniciava-se uma nova alimentação de água de acordo com que foi informada na Tabela 3.4.

Para a secagem do leite desnatado, o procedimento experimental empregado foi similar com o que foi realizado na evaporação da água nas duas configurações de leito de jorro. Entretanto, durante a secagem foi coletado e pesado o pó na saída do ciclone em intervalos de tempo de 10 minutos, com a finalidade de conhecer a produção e a umidade do produto final ao longo do processo. Para isso, foi necessário determinar a massa inicial através de sua pesagem em balança analítica e posteriormente ser conduzida para uma estufa de circulação forçada à temperatura de 105°C por 24 horas.

Diante desses dados obtidos, a umidade das amostras foi determinada através da Equação 3.8, sendo esta referida em base úmida.

$$U(b.u) = 100 \frac{m_a}{m_{as} + m_a} \quad (3.8)$$

Onde U é a umidade em base úmida,  $m_a$  e massa de água,  $m_{as}$  é a massa da amostra seca.

Tanto na evaporação de água como na secagem do leite desnatado, foram monitorados os dados de temperatura do ar de entrada e de saída, as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída do leito de jorro em intervalo de 20 segundos pelo sistema de aquisição de dados e leitura de 1024 pontos através da rotina desenvolvida no *software* LabVIEW, a qual fornecia a média e o desvio padrão. Por meio de uma rotina computacional desenvolvida no *software* MatLab, os dados de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido foram utilizados para calcular a umidade relativa e absoluta do ar na saída dos leitos de jorro, com base nos cálculos psicrométricos propostos na metodologia desenvolvida em Wilhelm (1976).

### 3.3.5 Eficiência energética para a evaporação da água e a secagem do leite desnatado

A eficiência energética de um leito de jorro pode ser estimada através de equações que segundo Kudra, (2004) relacionam a energia usada na evaporação da umidade ( $E_{evp}$ ) nas condições de alimentação, com a energia térmica total fornecida ao secador ( $E_t$ ). De acordo com Kudra (2004) esta definição pode ser representada matematicamente pela Equação 3.9 para materiais sólidos não muito úmidos a baixas temperaturas, quando o calor específico for considerado constante e o processo adiabático. Baseando-se nessas condições, a Equação 3.9 foi usada para compor a parte térmica que envolve o estudo da evaporação da água e a secagem do leite desnatado realizado no presente trabalho de pesquisa. Além disso, esta é uma equação muito simples de ser usada, uma vez que envolve dados de temperatura do ar em diferentes locais.

$$\eta = \frac{T_0 - T_{ar}}{T_0 - T_{sat}} \quad (3.9)$$

A eficiência energética ( $\eta$ ) foi estimada como a razão entre as diferenças de temperatura do ar de saída ( $T_{ar}$ ) e a temperatura do ar de entrada do leito de jorro ( $T_0$ ) e a diferença entre as temperaturas do ar de entrada ( $T_0$ ) e a ambiente, sendo esta última substituída pela temperatura de bulbo úmido, uma vez que pode ser considerada a temperatura na condição de saturação do ar na saída do leito de jorro ( $T_{sat}$ ).

### 3.3.6 Modelo *CST* para a secagem do leite desnatado.

O modelo matemático de parâmetros concentrados proposto por Almeida et al (2009) foi aplicado nesse trabalho de pesquisa para descrever os fenômenos de calor e massa que ocorre durante a secagem do leite desnatado. A base do modelo está fundamentada em balanços macroscópicos de conservação de massa e energia, considerando as seguintes hipóteses simplificadoras: o leito de jorro comporta-se como tanque perfeitamente agitado; a mistura gasosa é considerada como um gás ideal; o acúmulo da pasta no interior do leito de jorro não é significativo; e a camada de filme formado sobre a superfície do material inerte é muito fina de modo que a difusão da água no interior do filme pode ser considerada desprezível.

Com base nessas hipóteses, as variações na umidade das fases gás e líquida foram calculadas conforme mostram as Equações de 3.10 e 3.11 referentes aos balanços globais de conservação de massa das fases gás e sólido.

$$\frac{dy_s}{dt} = \frac{1}{m_g} (W_{ge}y_e - W_{gs}y_s + k) \quad (3.10)$$

$$x_s = \frac{F_{pe}x_e - k}{F_{ps}} \quad (3.11)$$

onde  $y_s$  e  $y_e$  as frações mássicas de vapor d'água na saída e na entrada do leito de jorro,  $t$  é o tempo,  $m_g$  é a massa de gás,  $W_{gs}$  e  $W_{ge}$  as vazões mássicas do gás na saída e na entrada,  $k$  o termo de acoplamento de fases,  $x_s$  e  $x_e$  as frações mássicas de água líquida na saída e na entrada do leito de jorro,  $F_{ps}$  e  $F_{pe}$  as vazões mássicas de pasta na saída e na entrada do leito de jorro.

A variação na temperatura do gás na saída do leito de jorro foi obtida através do balanço global de conservação de energia, conforme mostra a Equação 3.12.

$$\frac{dT_{gs}}{dt} = \frac{W_{ge}cp_{ge}T_{ge} + F_{pe}cp_{pe}T_{pe} - W_{gs}cp_{gs}T_{gs} - F_{ps}cp_{ps}T_{ps} - k\Delta H^v - q}{m_g cp_g + m_s cp_s + m_j cp_j} \quad (3.12)$$

Na Equação 3.12, o último termo do lado direito refere-se à perda de calor da parede do leito de jorro para o ambiente que corresponde a Equação 3.13.

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (3.13)$$

onde  $T_{gs}$  e  $T_{ge}$  as temperaturas do gás na saída e na entrada do leito,  $cp_{gs}$  e  $cp_{ge}$  o calor específico do gás na saída e na entrada do leito,  $cp_{ps}$  o calor específico da pasta na saída e  $cp_{pe}$  o calor específico da pasta na entrada do leito,  $cp_s$  o calor específico das partículas inertes,  $T_{ps}$  e  $T_{pe}$  as temperaturas da pasta na saída e na entrada do leito,  $\Delta H^v$  o calor latente de vaporização,  $q$  o calor perdido pelo leito de jorro,  $m_s$  a massa das partículas inertes,  $m_j$  e  $cp_j$  a massa e o calor específico do leito de jorro.

Nota-se que na equação 3.12 apresentada anteriormente, há um termo que refere-se ao acoplamento de fases representado pela letra  $k$ , o qual é representado pela Equação 3.14.

$$k = a(1 - e^{-bt}) \quad (3.14)$$

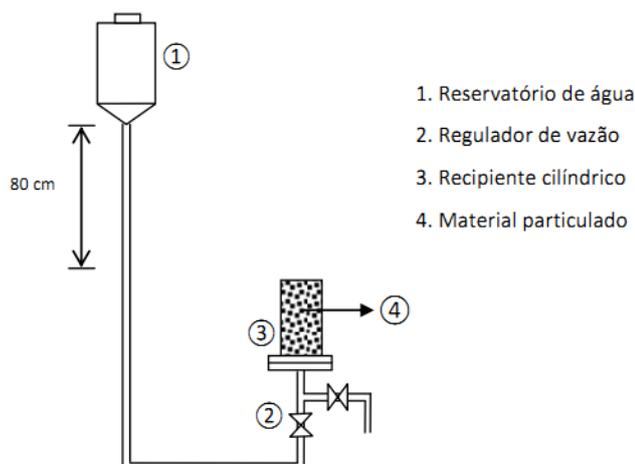
Na Equação 3.14 os parâmetros  $a$  e  $b$ , assim como o coeficiente convectivo de transferência de calor ( $h$ ) devem ser ajustados aos dados experimentais, considerando as condições operacionais. Cada conjunto de parâmetros ( $a, b$  e  $h$ ) representa apenas uma condição experimental à qual o modelo foi ajustado.

O modelo apresentado foi resolvido numericamente através da integração aplicando o método Runge-Kutta em uma rotina computacional construída no *software* MatLab. As condições iniciais ( $t = 0$ ), utilizadas na resolução do equacionamento basearam-se a partir de dados experimentais da umidade absoluta ( $y_0 = y_{0, \text{exp}}$ ) e a temperatura do gás ( $T_0 = T_{0, \text{exp}}$ ).

### 3.3.7 Secagem dos grãos de alumina

Antes de realizar os experimentos de secagem, os grãos de alumina foram saturados com água por um período de 48 horas, conforme procedimento adotado por Perazzini (2014). O sistema usado para a saturação é constituído, basicamente, por um reservatório de água (1) localizado a uma altura de 80 cm acima do recipiente cilíndrico (3) usado para saturar o material particulado (4), como mostra a Figura 3.5. Por gravidade, a água é fornecida para o recipiente cilíndrico a uma vazão regulada por uma válvula gaveta (2) de modo que entre em contato com material particulado lentamente, até que todo o material esteja submerso por água.

**Figura 3.5 - Sistema usado para saturação das partículas de alumina.**



**Fonte: Perazzini (2014)**

Após a saturação das esferas de alumina, os ensaios experimentais de secagem foram conduzidos conforme as condições operacionais apresentadas na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5 - Condições operacionais utilizadas na secagem das esferas de alumina no leito de jorro convencional e mecânico.**

Condições operacionais	Leito de jorro convencional	Leito de jorro mecânico
Massa de inerte (kg)	4,0	4,0
Temperatura (°C)	80 e 100	80 e 100
Velocidade do ar (m/s)	16,1 (1,10 $u_{mj}$ )	09 e 17
Rotação do parafuso helicoidal (rpm)	-	360

**Fonte: elaborado pelo autor**

Inicialmente, acionava-se o soprador, regulava-se a velocidade do ar através da válvula de controle de “*by pass*” e ajustava-se a temperatura. Os valores dessas variáveis operacionais foram estabelecidos conforme constam na Tabela 3.5. Com valores fixos de velocidade e temperatura do ar na entrada do leito de jorro, aguardava-se o regime permanente. Assim que essa condição fosse satisfeita, interrompia-se o fornecimento e o

aquecimento da corrente gasosa desligando o soprador e o controlador de temperatura. A partir desse instante, iniciava-se a inserção do material particulado para dentro da câmara de secagem por uma abertura localizada na parte superior desta câmara. Após o carregamento do leito de jorro, o sistema era novamente reestabelecido, ou seja, acionava-se o soprador e o aquecedor. Assim que esses equipamentos eram religados, dava-se início a aquisição dos dados de queda de pressão, velocidade do ar, temperatura do ar de entrada e as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída do leito de jorro.

Após ter finalizado os experimentos com o leito de jorro convencional, montava-se a configuração com o parafuso helicoidal. O procedimento experimental usado na secagem dos grãos de alumina usando essa modificação foi semelhante com o que foi descrito no parágrafo anterior para o leito de jorro convencional. A diferença reside no fato que, depois que o soprador tivesse sido acionado, configurava-se no inversor de frequência a rotação de trabalho (360 rpm). Desta forma, para quaisquer valores de velocidade e temperatura informadas na Tabela 3.5, aguardava-se o regime permanente ser atingido. Satisfeita essa condição, interrompia-se o fornecimento e o aquecimento da corrente gasosa desligando o soprador e o controlador de temperatura. A partir desse instante, iniciava-se o carregamento da câmara de secagem com as partículas de alumina. Após o carregamento do leito de jorro, o sistema era novamente reestabelecido, ou seja, acionava-se o soprador e o aquecedor. Com o fornecimento e aquecimento da corrente gasosa reestabelecido, iniciava-se a aquisição dos dados de queda de pressão, velocidade do ar, temperatura do ar de entrada e as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída do leito de jorro com parafuso helicoidal.

O procedimento experimental empregado para a secagem dos grãos foi o mesmo utilizado nas duas configurações de leito de jorro. Foram coletadas amostras em intervalos de tempos pré-determinados e armazenadas em dessecadores. Ao final dos experimentos, as amostras eram pesadas em uma balança analítica e encaminhadas para uma estufa de convecção forçada para determinar a umidade final de cada amostra pelo método direto da estufa a 105°C por 24 horas.

Todas as medidas de temperatura do ar tanto na entrada quanto na saída dos secadores foram realizadas por termopares que estavam conectados ao sistema de aquisição de dados, o qual fazia a leitura de 1024 valores, fornecendo a média e o desvio padrão. Esses dados foram posteriormente usados nos cálculos da umidade relativa e absoluta do ar na saída por meio de uma rotina computacional desenvolvida em MatLab.

### 3.3.8 Modelo difusivo a dois parâmetros para a secagem dos grãos de alumina.

Existem muitos modelos matemáticos na literatura que podem ser utilizados para simular a secagem das partículas de alumina no leito de jorro mecânico. Cada modelo tem sua particularidade, possibilitando classificá-los segundo a complexidade de resolução, fundamentação teórica, dentre outros fatores. Um modelo clássico fundamentado na segunda lei de Fick, implica que a umidade presente em um determinado material difunde de seu interior para sua superfície e desta para a corrente gasosa mediante evaporação.

Matematicamente, a umidade (fase líquida ou vapor) pode ser difundida em coordenadas esféricas, considerando constantes as propriedades dos sólidos e a difusividade efetiva, conforme apresenta a Equação 3.15.

$$\frac{\partial X(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r D_{eff,G} \frac{\partial X(r,t)}{\partial r} \right] \quad (3.15)$$

A Equação 3.15 é escrita em termos da umidade adimensional ( $X$ ) e está sujeita a condição inicial apresentada na Equação 3.16.

$$C.I: X(r,0) = X_0, \text{ para } t > 0 \text{ e } 0 \leq r \leq R \quad (3.16)$$

A condição de contorno comumente empregada na Equação 3.15 é aquela que representa a simetria no perfil de umidade, como mostra a Equação 3.17.

$$C.C.1: \left. \frac{\partial X(r,t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \text{ para } t > 0 \text{ e } r = 0 \quad (3.17)$$

Considerando a resistência externa à transferência de massa, a segunda condição de contorno, representada pela Equação 3.18, foi utilizada de modo a obter um modelo a dois parâmetros, como foi proposto por Calado et al. (1987) na modelagem da secagem de grãos em leito de jorro cônico.

$$C.C.2: X(r,t)|_{r=R} = (X_0 - X_{eq})e^{-\gamma t} + X_{eq}, \text{ para } t > 0 \text{ e } r = R \quad (3.18)$$

A solução analítica do modelo proposto com as condições inicial (Equação 3.16) e de contorno (Equação 3.17 e 3.18), considerando constante a resistência externa e a difusividade efetiva, permite que a umidade média dos grãos de alumina seja predita pela Equação 3.19 (CALADO et al. 1987).

$$X = e^{-\gamma t} \left[ 1 + \frac{6 \gamma R^2}{D_{eff}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 \pi^2} \left( \frac{1 - e \left( \gamma - \frac{n^2 \pi^2 D_{eff}}{R^2} \right) t}{\frac{\gamma R^2}{D_{eff}} - n^2 \pi^2} \right) \right] \quad 3.19$$

onde:  $\gamma$  o parâmetro a ser determinado,  $t$  o tempo de secagem,  $R^2$  o raio do grão,  $D_{eff}$  o coeficiente de difusão mássica efetiva,  $n$  o número de termos.

A Equação 3.19 foi resolvida em uma rotina computacional desenvolvida no *software* Matlab, considerando 10 termos e tolerância  $1 \times 10^{-13}$ . Os parâmetros ( $D_{eff}$  e  $\gamma$ ) foram estimados com base no critério dos mínimos quadrados, ao mesmo tempo em que a equação analítica (Equação 3.19) foi resolvida no MatLab.

## CAPÍTULO 4

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo foi reservado para apresentar os resultados acompanhados de suas respectivas discussões. Com o propósito de obter uma melhor análise e compreensão, os resultados foram apresentados e discutidos separadamente em cinco itens, destinando-se sempre que possível às duas configurações de leitos de jorro no mesmo item. No item 4.1, são apresentados os resultados que englobam a caracterização fluidodinâmica sem e com a presença da fase líquida. Os itens 4.2 e 4.3 apresentam os resultados referentes aos estudos sobre a atrição dos materiais particulados no leito de jorro convencional e no leito de jorro mecânico. O item 4.4 destina-se à apresentar os resultados referentes à análise térmica e de massa realizada a partir dos experimentos de evaporação de água nas duas configurações de leitos de jorro. Por fim, no item 4.5 são apresentados os resultados experimentais e simulados da secagem do leite desnatado e dos grãos de alumina.

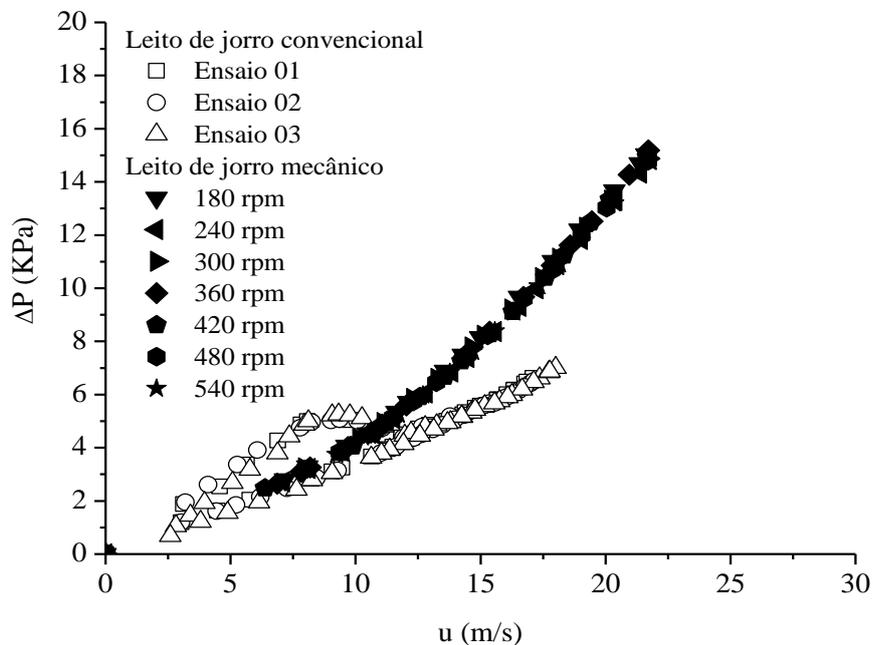
#### 4.1 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro convencional e mecânico

A caracterização fluidodinâmica foi realizada com a finalidade de verificar os aspectos fluidodinâmicos, bem como analisar as vantagens e as limitações operacionais do leito de jorro mecânico em relação ao convencional. Para tal fim, foram analisados dados da queda de pressão em função da velocidade do ar de entrada das duas configurações de leito de jorro. Assim, tornou-se interessante para esse estudo analisar o sistema como um todo, portanto, curvas de  $\Delta P = f(u)$  foram registradas considerando o sistema global (queda de pressão total do leito), somente o equipamento (queda de pressão sem a presença de partículas) e apenas com o leito particulado (curva característica proposta em Mathur e Epstein, 1974).

#### 4.1.1 Queda de pressão total do leito de jorro

As duas configurações de leito de jorro apresentam aspectos fluidodinâmicos distintos quanto à queda de pressão total, como pode ser observado na Figura 4.1. A queda de pressão total do leito de jorro modificado é representada por símbolos fechados para distinguir da queda de pressão total do leito de jorro convencional.

**Figura 4.1 - Queda de pressão total em função da velocidade do ar: leito de jorro convencional (símbolos abertos) e leito de jorro mecânico (símbolos fechados).**



**Fonte: elaborado pelo autor**

Dentro das condições avaliadas, os dados referentes ao leito de jorro convencional mostraram boa reprodução através da repetição dos experimentos. O mesmo foi observado para o leito de jorro mecânico, apesar dos experimentos também terem sido realizados em triplicata, optou-se por apresentar os dados da queda de pressão em função da velocidade do ar de entrada para diferentes rotações do parafuso helicoidal.

A primeira observação importante a ser feita analisando a Figura 4.1 é a respeito do comportamento apresentado nas curvas de queda de pressão total das duas configurações de leito de jorro. Percebe-se que a queda de pressão total aumenta em função do aumento da velocidade do ar de entrada. No caso do leito de jorro convencional, observa-

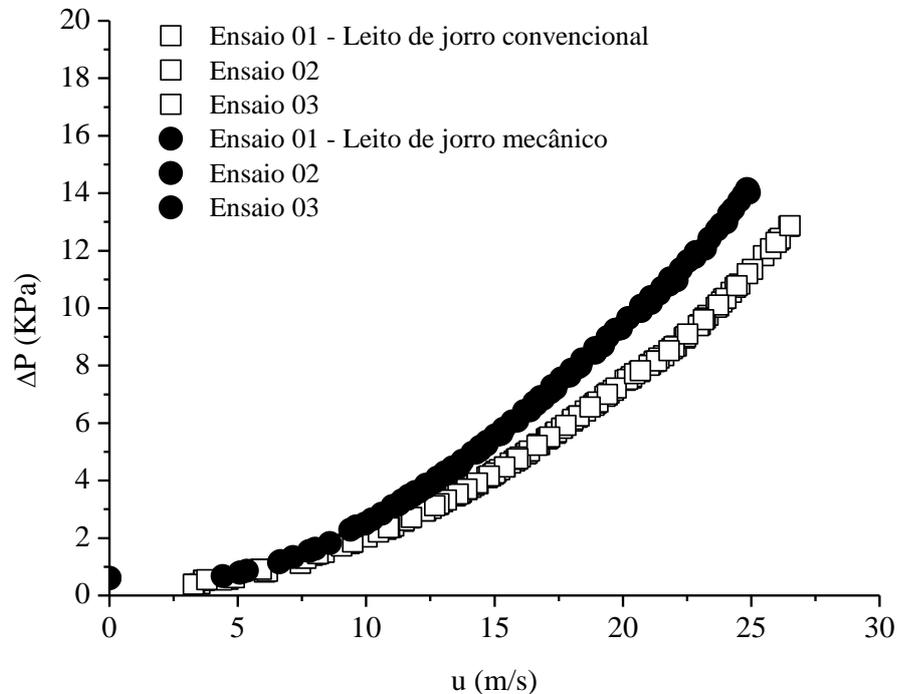
se que no sentido crescente da velocidade do ar de entrada, a existência de um pico na queda de pressão (representada por símbolos abertos). Este é um comportamento característico dessa configuração e que corresponde à expansão do leito particulado promovida pela corrente gasosa. Entretanto, isto não foi verificado no leito de jorro mecânico, conforme exibem os dados da queda de pressão em função da velocidade e da rotação do parafuso helicoidal (representados pelos símbolos fechados). Nesta configuração de leito de jorro, a corrente gasosa não exerce mais a função de promover a circulação do material particulado, uma vez que o parafuso helicoidal quando acionado pelo rotor auxilia as partículas no movimento do jorro e, portanto, a queda de pressão total aumenta continuamente para toda a faixa avaliada de velocidade do ar de entrada, comportamento típico da queda de pressão através do orifício, que neste caso refere-se ao de entrada do leito.

A segunda constatação e não menos importante refere-se ao fato de que houve um aumento da pressão do sistema quando modificou-se a configuração do leito de jorro. A queda de pressão total do leito de jorro mecânico foi superior na maior parte da velocidade do ar de entrada do que no leito de jorro convencional. Deve-se, no entanto, lembrar que o leito de jorro mecânico possui em seu interior um parafuso helicoidal e, além disso, uma restrição na área de entrada da corrente gasosa, contribuindo com o aumento da perda de carga do leito. Essa particularidade pode ser melhor entendida analisando os dados da queda de pressão do leito de jorro vazio e, posteriormente, somente das partículas.

#### 4.1.2 Queda de pressão do leito de jorro vazio (teste em branco) e com material particulado.

A queda de pressão do leito de jorro sem a presença de material particulado (teste em branco) foi avaliada em função da velocidade do ar de entrada, conforme mostra a Figura 4.2. Da mesma maneira que foram obtidos os dados de queda de pressão total, nessa figura os dados da queda de pressão do leito de jorro mecânico vazio são representados por símbolos fechados, enquanto no leito de jorro convencional, por símbolos abertos.

**Figura 4.2 - Queda de pressão em função da velocidade do ar na entrada sem a presença de partículas: leito de jorro convencional (símbolos abertos) e leito de jorro mecânico (símbolos fechados) - Teste em branco.**



**Fonte: elaborado pelo autor**

As curvas apresentadas na Figura 4.2 foram obtidas dos experimentos realizados em triplicata, mostrando a boa reprodutibilidade dos dados experimentais. Nota-se que para ambas as configurações a queda de pressão aumenta continuamente com a velocidade do ar de entrada. Entretanto, observa-se que para o leito de jorro mecânico a perda de carga foi maior em relação ao leito de jorro convencional, reforçando o que foi afirmado anteriormente. A presença do parafuso helicoidal e da redução na região da área de entrada do leito aumenta a resistência à passagem do ar, e por consequência, eleva a queda de pressão.

Para a obtenção das curvas do leito particulado, ajustou-se uma equação aos pontos experimentais apresentados na Figura 4.2, admitindo que seguiam uma curva da função potência para as duas configurações de leito de jorro. Os respectivos coeficientes de correlação, bem como os parâmetros de ajuste são apresentados separadamente para cada equipamento na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Parâmetros de ajuste e coeficientes de correlação dos leitos de jorro.**

Configuração	Função	R <sup>2</sup>
LJC	$\Delta P_{vz} = 0,0250u^{1,8888}$	0,999
LJM	$\Delta P_{vz} = 0,0362u^{1,852}$	0,999

Leito de jorro convencional (LJC) Leito de jorro mecânico (LJM)

**Fonte: elaborado pelo autor**

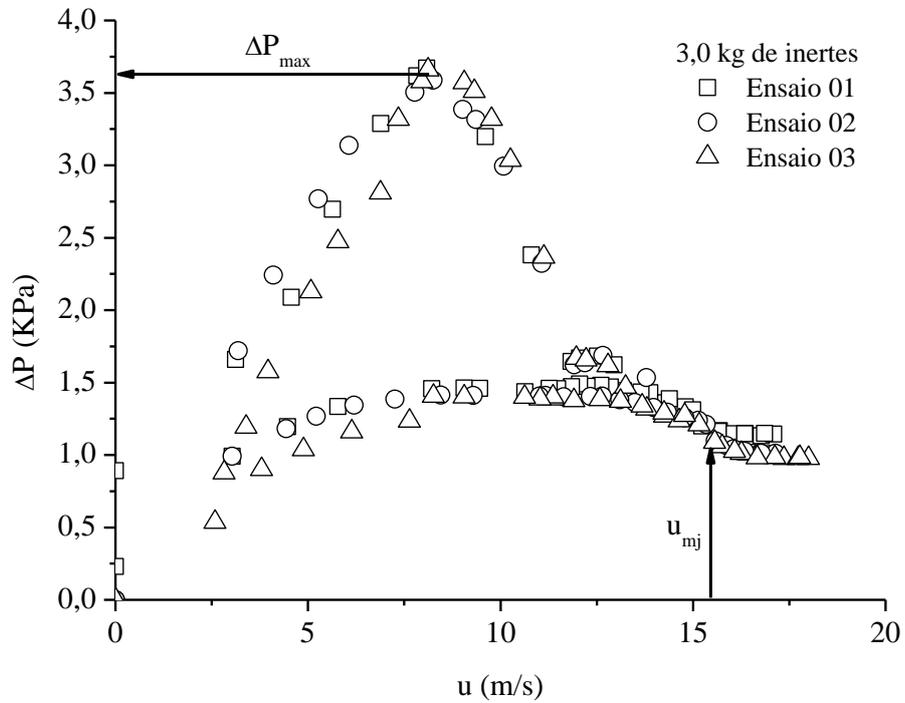
Com base nos valores obtidos dos coeficientes de correlação apresentados na Tabela 4.1, conclui-se que o ajuste apresentou boa concordância, uma vez que os valores dos coeficientes de correlação (R<sup>2</sup>) foram próximos da unidade. Sendo assim, auxiliado por essas equações, a queda de pressão total da mistura fluido-partícula foi subtraída da queda de pressão do leito de jorro sem partículas, com a finalidade de obter apenas a contribuição do leito particulado. Para esses testes todos os experimentos envolvendo inertes foram conduzidos com a carga mássica de 3 kg de esferas de vidro, quantidade necessária para ocupar apenas a parte cônica do leito.

Nas Figuras 4.3 (a) e (b) são apresentados os dados da queda de pressão em função da velocidade do ar de entrada para os dois leitos de jorro já descontando a queda de pressão do leito de jorro sem partículas.

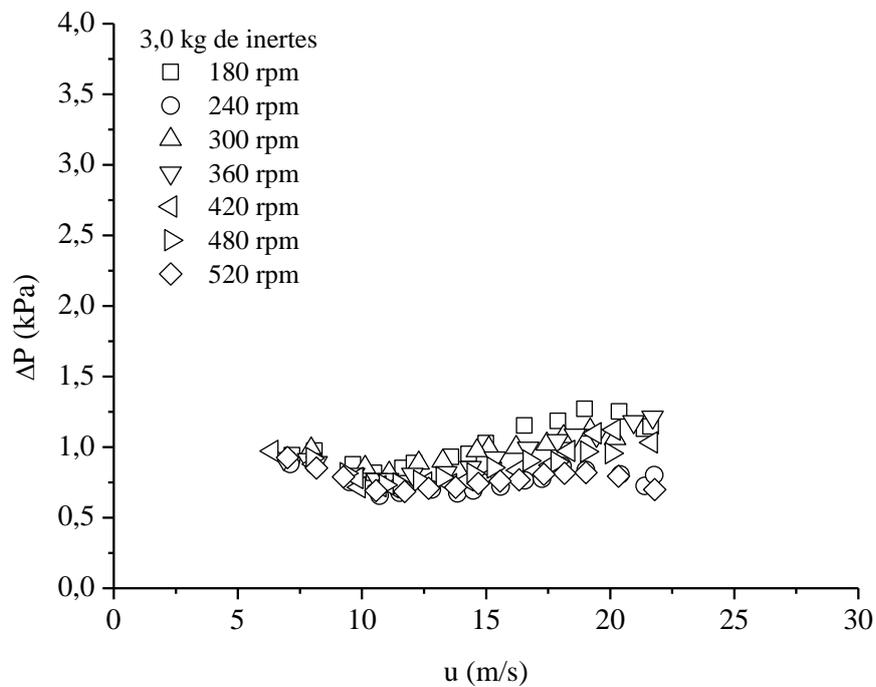
O comportamento observado na Figura 4.3 (a) era esperado e concorda com as curvas características do leito de jorro convencional já contida em Mathur e Epstein (1974), usadas para descrever a transição do leito estático para leito de jorro. Além disso, confirmaram a reprodutibilidade dos dados obtidos, sugerindo que a circulação do material particulado foi adequada, possibilitando identificar visualmente parâmetros fluidodinâmicos como a queda de pressão máxima, a queda de pressão de jorro na condição de jorro estável e a velocidade de mínimo jorro.

Sabe-se que no caso do leito de jorro convencional (Figura 4.3a) o movimento das partículas é realizado pela corrente gasosa. Na transição do leito estático para o jorro é necessário que a energia requerida pela corrente gasosa seja elevada ao ponto de promover o deslocamento das partículas que encontram-se compactadas na região cônica. Por conseqüência, a queda de pressão acaba atingindo uma condição máxima. Somente depois que o jorro atravessa a superfície do leito é que a queda de pressão reduz significativamente, dando início ao jorro estável com quedas de pressão sem oscilações bruscas.

**Figura 4.3 - Queda de pressão do leito particulado em função da velocidade do ar na entrada do leito de jorro - curva característica. (a) convencional e (b) mecânico**



**(a)**



**(b)**

**Fonte: elaborado pelo autor**

No leito de jorro mecânico (Figura 4.3b), a principal distinção reside sobre a trajetória das partículas quando se usa o parafuso helicoidal. Verificou-se visualmente através de aberturas localizadas em posições radiais do corpo cilíndrico que o movimento é controlado e ditado pela rotação empregada; as partículas próximas ao centro do leito realizam um movimento ascendente, não são mais lançadas e tão pouco existe a região da fonte como no jorro clássico. Pelo contrário, as partículas emergem pelo centro e se espalham pela superfície em direção a região radial do leito. Embora não tenha sido possível observar mais detalhes sobre o deslocamento do material particulado, muito possivelmente as partículas devem retornar para o centro antes de chegar até o final da região cônica do leito, assim como ocorre na configuração convencional de leito de jorro.

Ao utilizar o parafuso helicoidal, observa-se que não houve um aumento brusco da queda de pressão até alcançar o valor máximo no início do experimento, como ocorreu no leito convencional (Figura 4.3b). A queda de pressão manteve-se praticamente constante, apresentando pequenas variações em torno da unidade, mesmo com o aumento da velocidade do ar de entrada do leito de jorro. Conforme já foi visto no item 2.1.3, o parafuso helicoidal tem como finalidade realizar o transporte ascendente do material particulado a partir de uma trajetória em espiral sem a necessidade de elevadas vazões de ar, por consequência, a corrente gasosa atravessa o canal de jorro sem enfrentar uma grande resistência, resultando na queda de pressão praticamente constante em função da velocidade do ar de entrada desde o início do experimento.

Ainda na Figura 4.3b é possível observar que a velocidade de rotação do parafuso helicoidal influenciou nas medidas de pressão do leito de jorro. Estudos realizados por Szentmarjay et al. (1989) mostraram que essa influência acontece devido ao fluxo mássico das partículas na região central aumentar linearmente a medida que aumenta a rotação do parafuso helicoidal. Quando isso acontece, a corrente de ar, mesmo a baixa velocidade, escoar pelo leito de partículas com maior facilidade, ocasionando uma menor perda de carga no leito.

Com base no que foi observado, em princípio seria impossível afirmar sem uma constatação experimental que a atrição ou outro qualquer tipo de dano causado no material sólido é maior com o uso do parafuso helicoidal do que na configuração convencional do leito de jorro. Sendo assim, procurou-se analisar comparativamente a atrição de diferentes tipos de materiais sólidos nas duas configurações de leito de jorro.

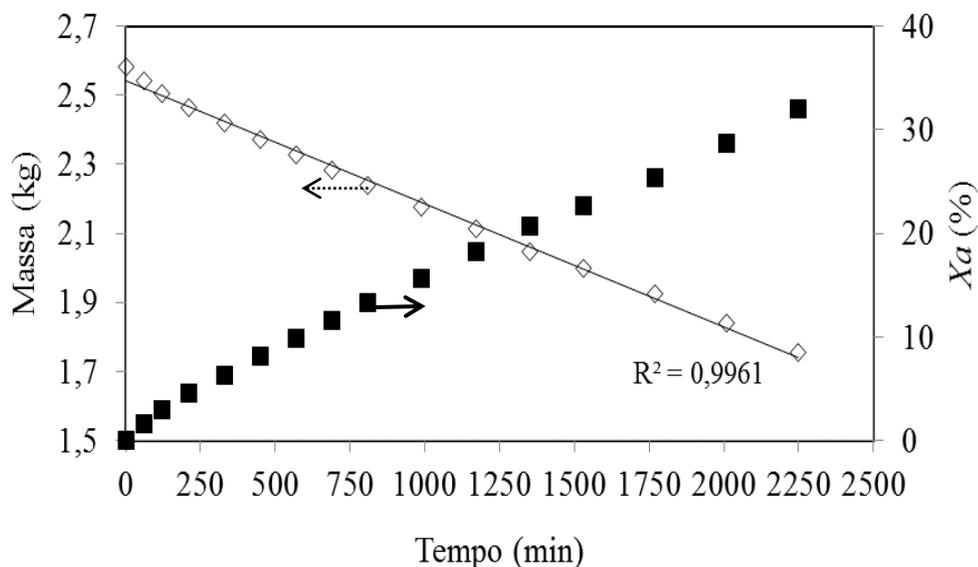
## 4.2 Atrição das partículas esféricas e não esféricas no leito de jorro convencional

A atrição das partículas de dolomita e das esferas de vidro e alumina foi analisada empregando as condições do regime de jorro estável, mantendo-se fixa a velocidade do ar de entrada em 10 e 20% acima da velocidade de mínimo jorro, carga mássica de 2,6 kg e sem ultrapassar o tempo de 2250 minutos (37,5 horas). Assim, com a velocidade do ar fixa nessas condições, a massa do leito particulado foi pesada em intervalos de tempo previamente estabelecidos, conforme foi descrito no capítulo 3. A atrição foi analisada também do ponto de vista matemático com base nos modelos propostos na literatura, considerando os resultados experimentais obtidos da perda mássica em função da velocidade, tanto para as esferas de alumina quanto as partículas de dolomita.

### 4.2.1 Atrição em partículas esféricas

Em relação as esferas de alumina, verifica-se na Figura 4.4 que a massa reduziu em função do tempo, a partir da carga inicial de 2,6 kg até alcançar 1,75 kg. Esta redução pode ser considerada significativa, uma vez que a atrição ( $X_a$ ) ao longo do tempo aumentou e foi superior a 30% em relação a concentração de esferas de alumina usada no início dos ensaios experimentais.

**Figura 4.4 – Massa das esferas de alumina em função do tempo e evolução temporal da perda mássica ( $X_a$ ).**



Fonte: elaborado pelo autor

De acordo com a Figura 4.4, observa-se que uma análise visual seria suficiente para confirmar que o comportamento expressa uma redução mássica linear em função do tempo. Entretanto, o início da atrição tende para um rápido comportamento não linear, como observado nos três primeiros pontos apresentados na Figura 4.4. O comportamento não linear observado no instante inicial sugere que seja uma característica específica existente em equipamentos de leitos móveis, principalmente no caso dos fluidizados e de jorro, visto que a atrição é intensa no início e depende fortemente de fatores que agem em conjunto, como as condições operacionais e as propriedades dos materiais particulados. Para os dados obtidos das esferas de alumina, a região não linear encontra-se na faixa entre 0 a 120 minutos, o que pode ser considerada desprezível em relação ao tempo de atrição, que foi de 2250 minutos e assim considerar que houve uma redução linear da massa em função do tempo. Esta consideração pode ser confirmada pelo valor de  $R^2$ , sendo este para os dados experimentais obtidos, próximo da unidade (0,99), confirmando o que foi observado visualmente.

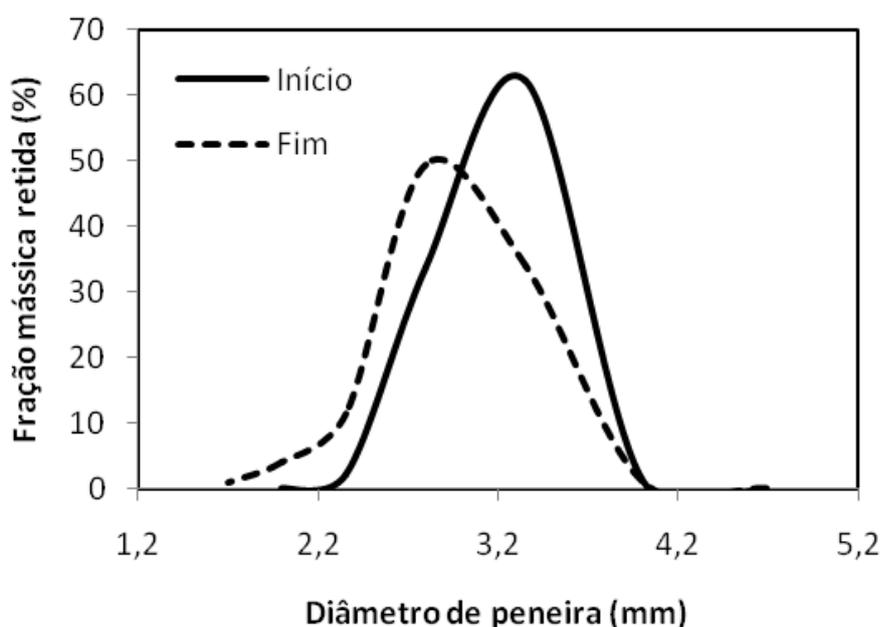
O comportamento observado na Figura 4.4 concorda com o que foi visto na literatura, onde a atrição está relacionada com o modo de como os sólidos se desgastam dentro do leito de jorro. Segundo Lee et al. (1993) é amplamente aceito que a atrição de materiais particulados seja evidenciada pela abrasão superficial ocasionada pelas sucessivas colisões entre as partículas e as fronteiras físicas dentro do leito de jorro. Reppenhagen e Werther (2003) definem a abrasão superficial como um fenômeno capaz de promover a quebra em partículas muito *finas* da superfície dos sólidos que se encontra exposta ao contato. Fernández-Akarregui et al. (2012) relatam que a velocidade dos materiais sólidos alcançada e o contato entre as partículas e a parede formada pela interface jorro-ânulo, possivelmente são elevados na região de jorro, o que favorece à abrasão superficial. Porém, não descartam que essa possibilidade ocorra também na região da fonte devido as colisões ou o impacto partícula-partícula e partícula-parede do leito de jorro. Entretanto, a intensidade do impacto irá depender de muitos fatores, principalmente do número de colisões, da área superficial do material particulado e da velocidade da partícula.

Independente da região onde ocorreu a abrasão superficial, o fato é que as esferas de alumina, por ser um material poroso, não resistiu às diferentes interações de contatos dentro do leito de jorro, levando a uma atrição bastante considerável do ponto de vista macroscópico. Na medida em que a superfície das esferas de alumina foi desgastada, as mesmas tornaram-se menores em relação ao tamanho original e conseqüentemente o seu peso também diminuiu.

Outro detalhe reside sobre o tempo que foi usado nos ensaios experimentais desse trabalho. Não foi possível saber se a redução da massa continuaria sendo linear para tempos maiores que 2250 minutos. Apesar da porosidade das esferas de alumina, esperava-se que a partir de um determinado intervalo de tempo a atrição não fosse significativa, ao ponto de considerar a massa constante para as condições operacionais empregadas, ou seja, que fosse atingido o estado estacionário da atrição. Fato este que foi constatado por Lee et al., (1993), os quais analisaram a atrição de um tipo de adsorvente poroso. Esses autores observaram que a massa do adsorvente não apresentou reduções significativas após 15 horas de operação. Tempos maiores foram alcançados com grãos de areia, neste caso superior a 200 horas, dependendo da velocidade do ar usada nos ensaios experimentais, conforme observado no trabalho realizado por Fernández-Akarregui et al. (2012). Por esta razão, acredita-se que as reduções lineares da massa observada na Figura 4.4 podem estar relacionadas com o tempo usado nos ensaios experimentais, o qual não foi suficiente para que o estado estacionário fosse atingido. Para os objetivos do presente trabalho, usar as partículas como inertes para a secagem, o tempo de 2250 minutos já é suficiente.

Visto que houve perda mássica durante a atrição, como mostrado na Figura 4.4, então procurou-se comparar a distribuição granulométrica das esferas de alumina no início e no final da atrição, como mostra a Figura 4.5.

**Figura 4.5 - Distribuição granulométrica das esferas de alumina.**



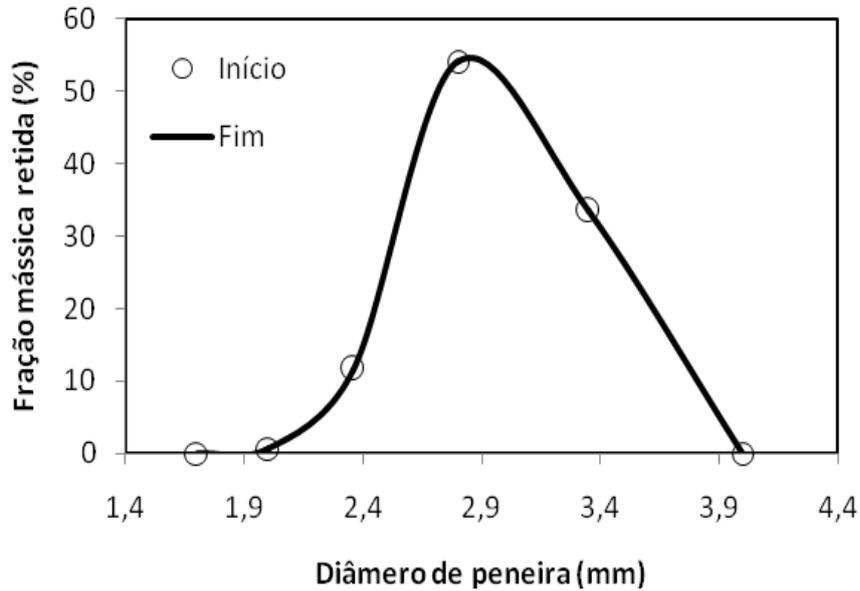
**Fonte: elaborado pelo autor**

Conforme pode ser visto na Figura 4.5, observa-se que as duas curvas apresentam um comportamento gaussiano da fração mássica retida entre os limites do diâmetro de peneira usada nos ensaios experimentais. Porém, verifica-se que ao final da atrição o tamanho médio do leito particulado foi menor, bem como a concentração mássica retida em cada diâmetro de peneira, conforme mostra a curva pontilhada deslocada para o lado esquerdo. Fato este comprovado através do cálculo realizado pela equação de Sauter, sendo este o diâmetro médio que corresponde a 3,42 mm no início e 3,09 mm ao final da atrição. Ainda na Figura 4.5 é possível observar também que as partículas maiores tendem a apresentar uma redução mais acentuada em relação às partículas de tamanho menores. Uma possível explicação para esta situação está relacionada com o tamanho da partícula, pois segundo Lee et al. (1993) a probabilidade das partículas de tamanho menor se desgastarem é mínima devido ao fato de apresentarem estruturalmente poucas falhas ou imperfeições quando comparadas com outras partículas maiores e assim são mais resistentes ao atrito, por consequência a atrição torna-se menor.

Por outro lado, as condições operacionais empregadas, velocidade do ar e o tempo, possivelmente não foram suficientes para promover a atrição das esferas de vidro, pelo fato da massa do leito particulado não ter reduzido até o final dos ensaios experimentais. Tal afirmação pode ser verificada observando o tamanho médio das esferas de vidro com base na distribuição granulométrica obtida a partir de dados da fração mássica retida antes e após os ensaios de atrição, como mostra a Figura 4.6.

Nesta figura, verifica-se que as curvas se sobrepõem, indicando que não houve variação mássica para a faixa de peneira utilizada, sendo este comportamento um indicativo para confirmar que as esferas de vidro resistiram ao atrito no interior do leito de jorro e não se desgastaram. Como não houve variação de tamanho, o diâmetro médio de Sauter calculado foi o mesmo, ou seja, igual a 3,20 mm. Assim para o tempo utilizado, 2430 minutos constatou-se que não houve desgaste das partículas utilizadas.

**Figura 4.6 - Distribuição granulométrica das esferas de vidro**

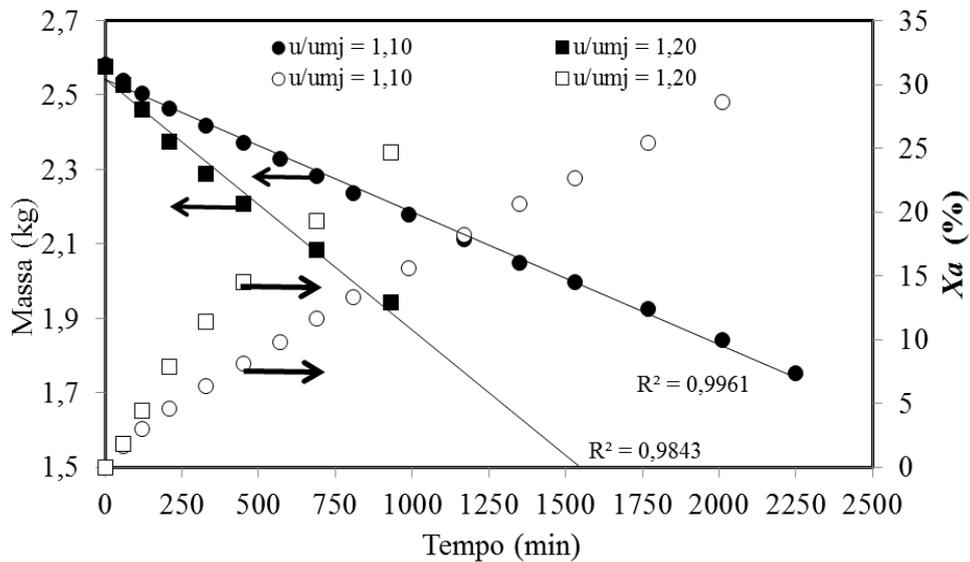


**Fonte: elaborado pelo autor**

#### 4.2.2 Efeito da velocidade do ar nas esferas de alumina

Duas condições de velocidade do ar na entrada ( $u/u_{mj} = 1,10$  e  $u/u_{mj} = 1,20$ ) do leito foram usadas para verificar o efeito ocasionado na atrição das esferas de alumina. Na Figura 4.7 são apresentados os dados experimentais referentes à massa do leito particulado e a evolução temporal da atrição em função do tempo. Observa-se que a massa das esferas de alumina decresce à medida que aumenta o tempo para as duas condições operacionais. Além disso, verifica-se que para a maior velocidade do ar de entrada ( $u/u_{mj} = 1,20$ ) a redução da massa torna-se mais acentuada.

**Figura 4.7 - Massa das esferas de alumina em função do tempo parametrizada nas velocidades do ar da entrada do leito de jorro convencional.**



**Fonte: elaborado pelo autor**

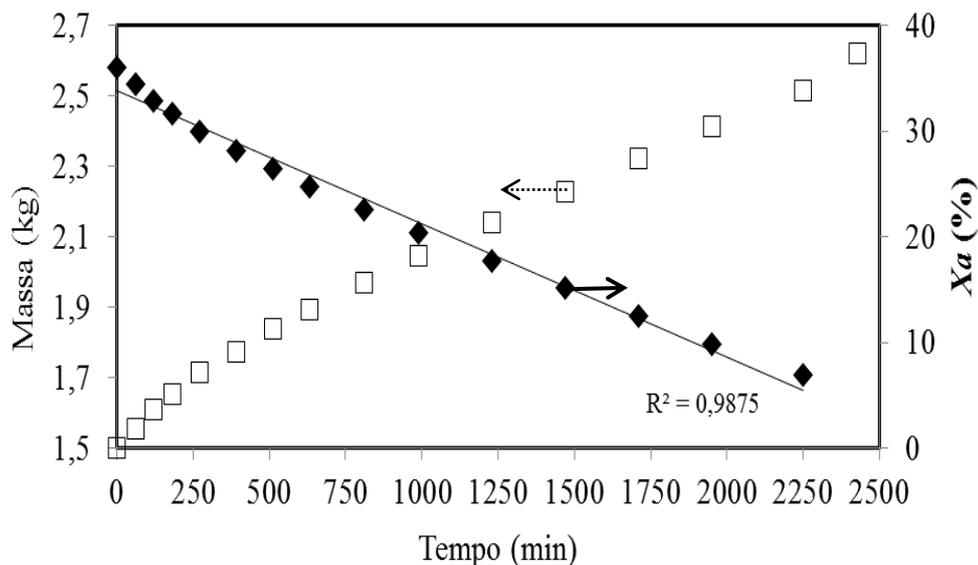
Analisando a Figura 4.7, observa-se o efeito da velocidade do ar através de uma diferença considerável entre os pontos correspondentes a maior e menor condição empregada nos ensaios experimentais. Com o aumento da velocidade do ar percebe-se que o efeito da atrição foi maior, isto é, a redução da massa aumentou até o final do experimento. Este efeito está relacionado com a quantidade de energia cinética que é transferida da força de arraste do ar para as esferas de alumina, que se torna maior quando aumenta a velocidade do ar de entrada. Uma vez que aumentou a energia cinética das esferas de alumina, as colisões interpartículas e o impacto com a parede do equipamento também tornaram-se maiores, por consequência, aumentou a atrição durante o movimento cíclico do material particulado dentro do leito de jorro e com isso maiores perdas mássicas foram evidenciadas.

Tal fato pode ser confirmado com base nos resultados referentes à evolução da atrição ( $X_a$ ) dos dados obtidos da fração mássica em função do tempo referente às duas velocidades do ar de entrada. Como já era esperado, nota-se que a atrição aumenta conjuntamente com o tempo para as condições operacionais empregadas. Os valores da atrição foram significativos, sendo superiores a 30% para as duas velocidades do ar testadas.

#### 4.2.3. Atrição em partículas não esféricas

Na Figura 4.8 são apresentados os dados obtidos da massa do leito particulado e da evolução da atrição em função do tempo para as partículas de dolomita. Semelhante ao que foi observado para as esferas de alumina na Figura 4.4, verifica-se que a partir da carga de sólidos usada inicialmente, 2,6 kg, houve uma redução na massa das partículas de dolomita com o tempo até atingir ao final da atrição a massa de 1,60 kg. Além disso, pôde-se verificar que a perda de massa percentual das partículas de dolomita segue o comportamento inverso da redução mássica até alcançar o valor de 35%.

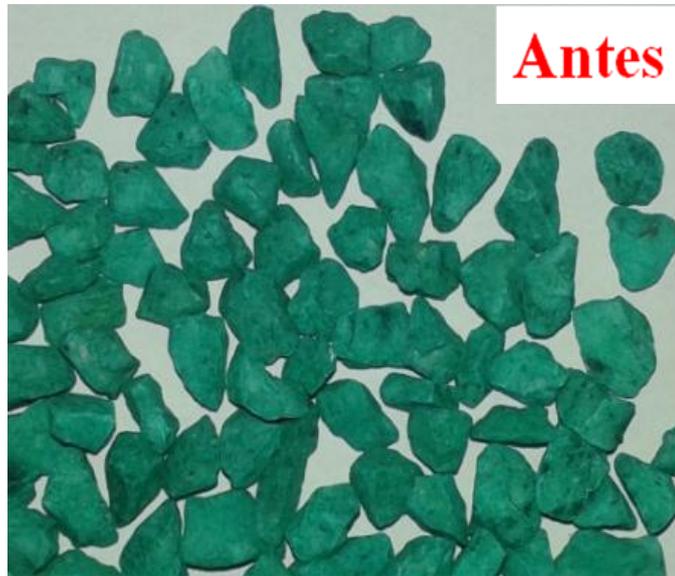
**Figura 4.8 - Massa das partículas de dolomita em função do tempo e evolução temporal da perda de mássica ( $X_a$ ).**



**Fonte: elaborado pelo autor**

Observa-se também que existe uma tendência mais acentuada de inclinação dos três primeiros pontos de cada curva, mostrando que há uma redução mássica não linear no início da atrição quando comparado com os demais pontos. Este fato contribui para confirmar o que foi sugerido anteriormente, o que está relacionado com a contribuição da condição operacional e das propriedades do material, sobretudo com o formato irregular da partícula. Para esse tipo de material sólido deve-se levar em consideração a questão morfológica, pois sua estrutura é formada por picos ou arestas que ao ser submetido a impactos se desgastam rapidamente, tendendo a se tornarem arredondadas, como mostra a Figura 4.9.

**Figura 4.9 - Imagens das partículas de dolomita antes (a) e após a atrição (b).**



**(a)**



**(b)**

**Fonte: elaborado pelo autor**

Diferente das esferas de alumina, tentou-se através do peneiramento identificar uma curva granulométrica das partículas de dolomita, porém não foi possível devido ao acúmulo apenas em uma única peneira. A solução encontrada foi medir o diâmetro de Ferret de uma amostra com 60 partículas através do software ImageProPlus®. Foram medidas três amostragens, sendo estas referentes aos ensaios experimentais realizados antes e após a atrição e os valores encontrados para os diâmetros foram, de 6,22 mm no início e 6,08 mm ao final da atrição.

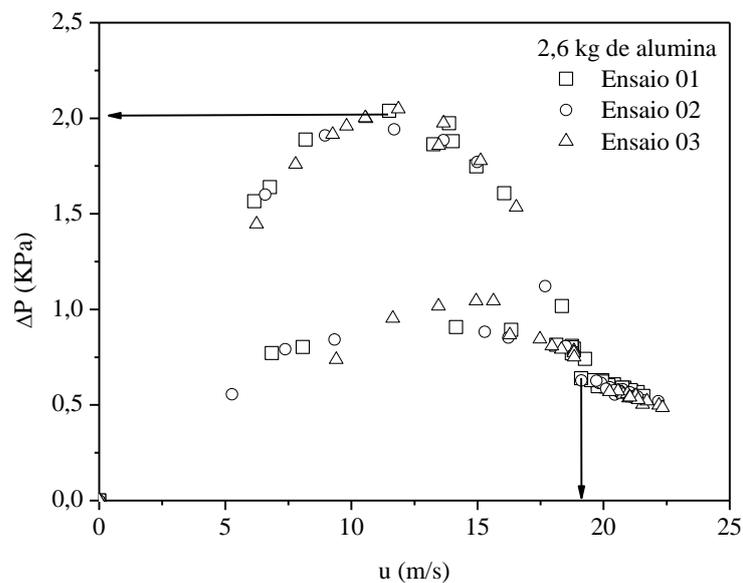
Com exceção das esferas de vidro, as perdas mássicas das esferas de alumina e das partículas de dolomita foram significativas, acima de 30% do valor da massa usada nos experimentos. Devido a esse fato, surgiu a necessidade de investigar se o comportamento fluidodinâmico do leito era afetado pela atrição dentro do leito de jorro.

#### 4.2.4 Efeito da atrição no comportamento fluidodinâmico

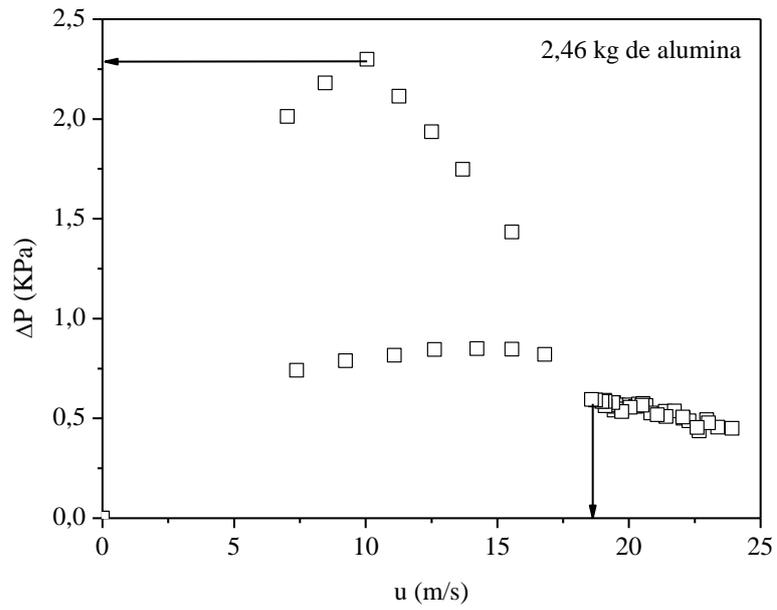
Com a finalidade de analisar o efeito da atrição no comportamento fluidodinâmico do leito de jorro, verificou-se através das curvas características os parâmetros como a queda de pressão máxima e a velocidade de mínimo jorro referentes a situações que antecedem e finalizam o desgaste dos materiais particulados.

Nas Figuras 4.10 e 4.11 são apresentadas as curvas características obtidas, em princípio, para as esferas de alumina e em seguida para as partículas de dolomita, considerando os dados obtidos da queda de pressão em função da velocidade do ar. Com base nos comportamentos apresentados, constatou-se que todas as curvas características apresentam o comportamento típico do leito de jorro convencional conforme proposto em Mathur e Epstein, (1974). Após a apresentação dos resultados das Figuras 4.10 e 4.11, são apresentados na Tabela 4.2 os dados da queda de pressão máxima ( $\Delta P_{\max}$ ) e da velocidade de mínimo jorro ( $u_{mj}$ ) obtidos para cada tempo em que foi construída a curva característica.

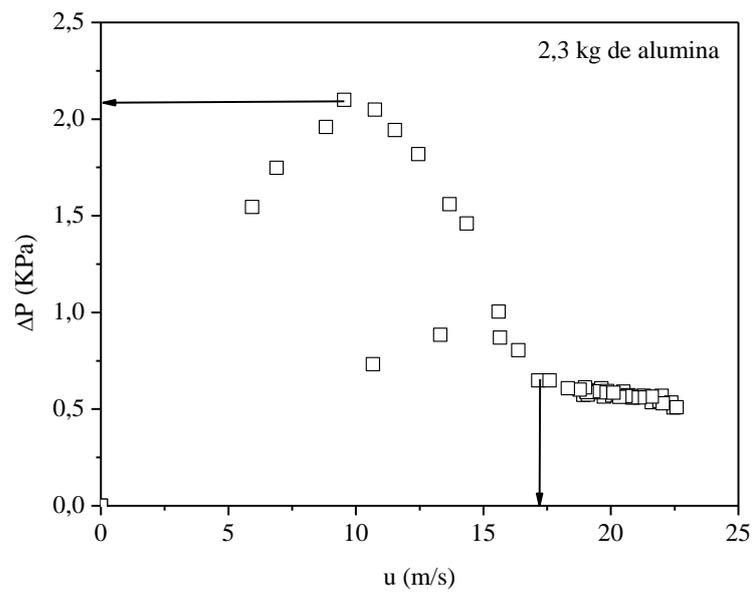
**Figura 4.10 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para as esferas de alumina: (a) 0 minutos, (b) 210 minutos, (c) 690 minutos e (d) 2250 minutos.**



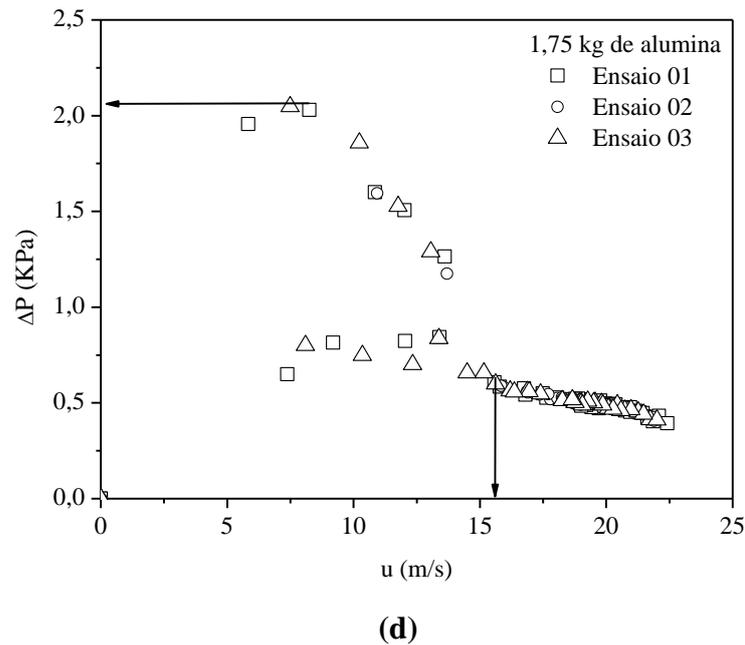
(a)



(b)



(c)



Fonte: elaborado pelo autor

**Tabela 4.2 - Dados da queda de pressão máxima e velocidade de mínimo jorro para esferas de alumina.**

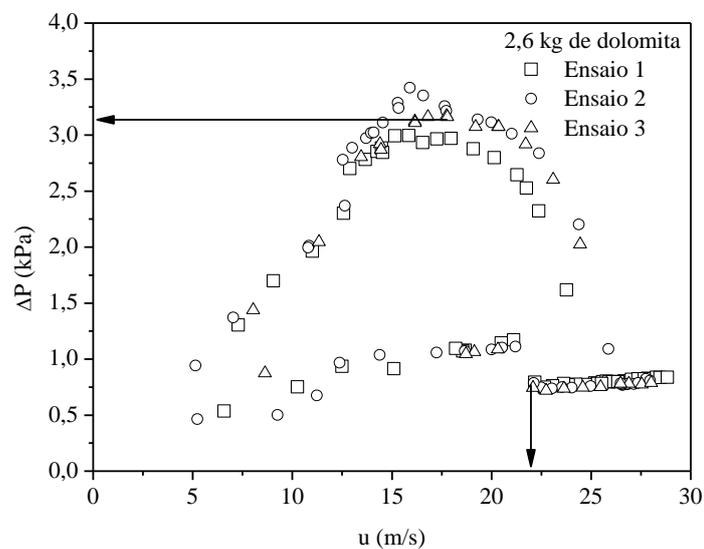
Tempo (min)	$\Delta P_{\max}$ (kPa)	$u_{mj}$ (m/s)
0	$2,04 \pm 0,06$	$19,25 \pm 0,10$
210	2,35	18,57
690	2,14	18,31
2250	$2,01 \pm 0,04$	$15,58 \pm 0,04$

Fonte: elaborado pelo autor

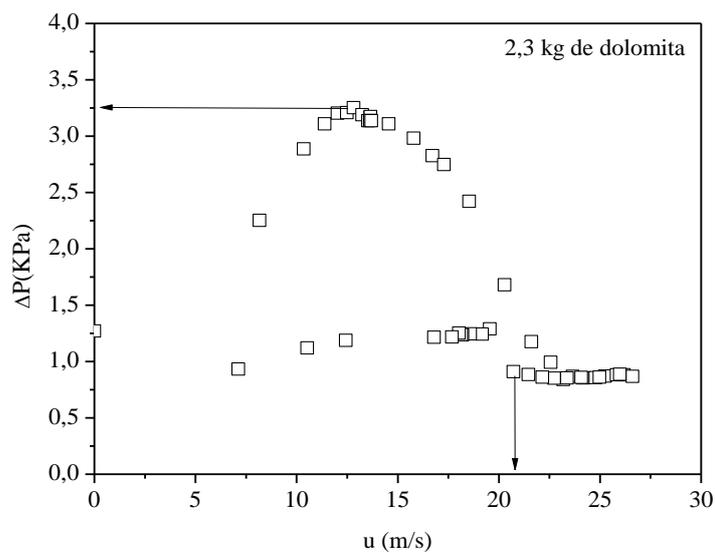
Através dos dados apresentados na Tabela 4.2 constatou-se que ocorreu redução significativa na velocidade de mínimo jorro após a atrição, aproximadamente 24% em relação ao valor da velocidade em  $t = 0$ . Este comportamento era esperado, uma vez que a massa do leito particulado reduziu devido a atrição, o que fez com que a quantidade de energia exigida para manter a condição do jorro estável, ou seja, a movimentação cíclica característica do material particulado tenha sido menor ao final da atrição. Quanto à queda de pressão máxima foi observada uma variação influenciada pela atrição. Conforme avança a atrição, a tendência é que a quantidade de energia necessária para realizar a expansão do leito também se torne menor, e com isso influencie nessa variável, conforme observando na Tabela 4.2.

Da mesma maneira, são apresentadas nas Figuras 4.11 as curvas características referentes aos ensaios experimentais para diferentes tempos da atrição das partículas de dolomita. Os parâmetros indicados nas curvas apresentadas, como a queda de pressão máxima ( $\Delta P_{\max}$ ), a velocidade de mínimo jorro ( $u_{mj}$ ) são apresentados na Tabela 4.3.

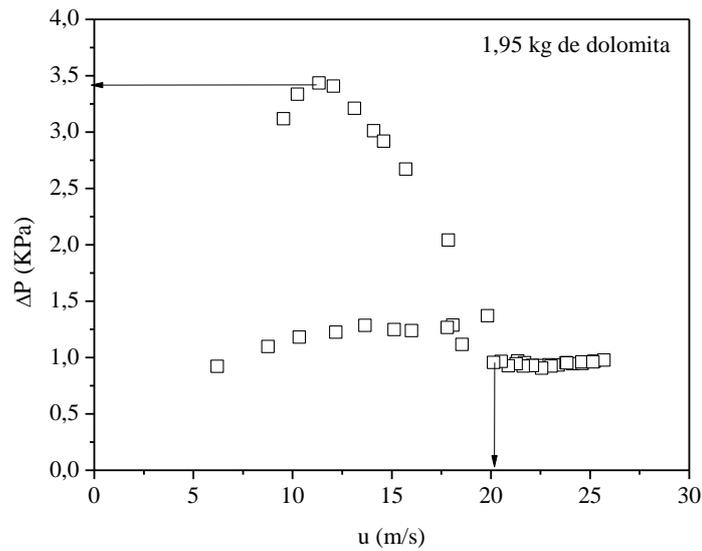
**Figura 4.11 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para as partículas de dolomita: (a) 0 minuto, (b) 510 minutos, (c) 1470 minutos e (d) 2430 minutos.**



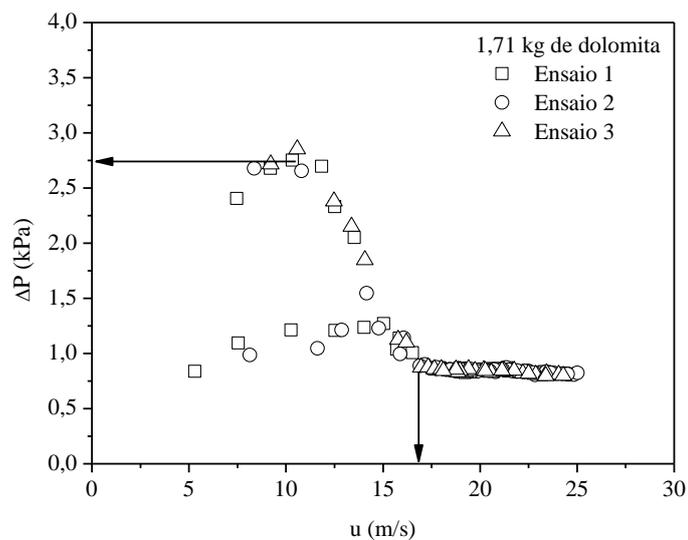
**(a)**



**(b)**



(c)



(d)

Fonte: elaborado pelo autor

**Tabela 4.3 - Dados da queda de pressão máxima e velocidade de mínimo jorro para as partículas de dolomita.**

Tempo (min)	$\Delta P_{\max}$ (kPa)	$u_{mj}$ (m/s)
0	$3,17 \pm 0,2$	$22,02 \pm 0,12$
510	3,24	20,80
1470	3,41	20,02
2250	$2,76 \pm 0,10$	$16,83 \pm 0,14$

Fonte: elaborado pelo autor

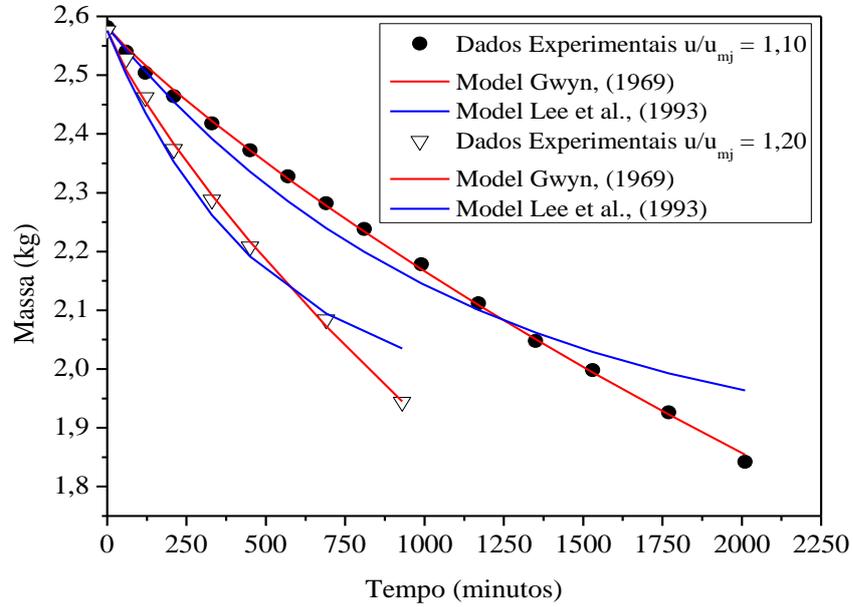
Analisando os resultados apresentados na Tabela 4.3 observa-se que o comportamento assemelha-se com o que foi observado para as esferas de alumina, ou seja, variações da velocidade de mínimo jorro e na queda de pressão máxima. De maneira análoga que foi discutido para as esferas de alumina, pôde-se justificar para esse material sólido que o comportamento observado está relacionado também com a energia necessária usada na expansão do leito, que se tornou menor visto que a concentração mássica do leito particulado diminuiu significativamente ao final da atrição ( $t = 2250$  minutos). Com uma concentração mássica menor o esforço energético para realizar o deslocamento também é menor, por consequência a velocidade de mínimo jorro e a queda de pressão máxima foram menores ao final dos experimentos.

#### 4.2.5. Simulação dos resultados da cinética de atrição

Com o propósito de identificar um modelo que melhor represente o comportamento da atrição no leito de jorro para os materiais particulados usados, foram ajustados os modelos teóricos propostos por Gwyn, (1969) e Lee et al. (1993), representados pelo conjunto de equações entre 3.4 a 3.7, considerando a carga mássica inicial (2,6 kg) e  $u/u_{mj} = 1,10$  e  $u/u_{mj} = 1,2$ , como mostram as Figuras 4.12 e 4.13.

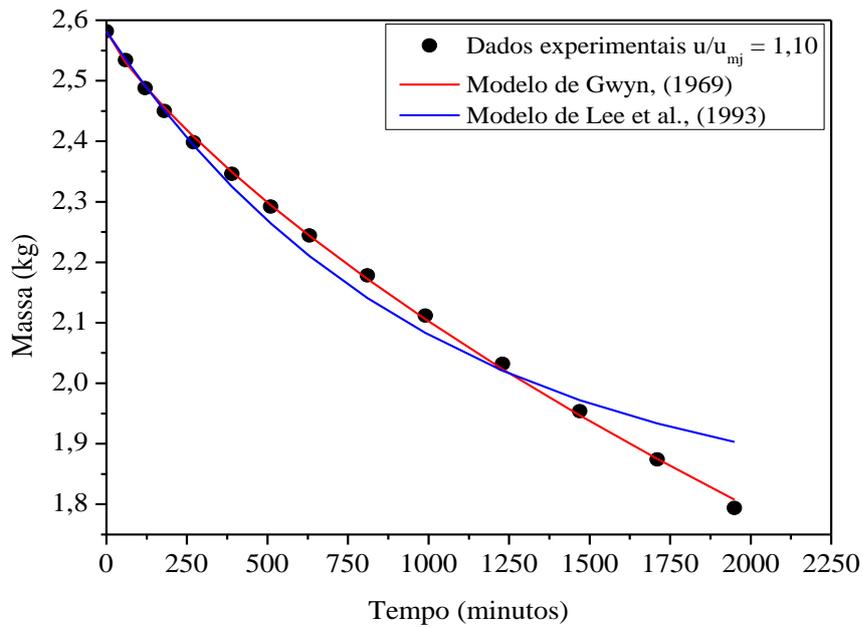
Conforme observado anteriormente nas Figuras 4.12 e 4.13 a simulação realizada permite mostrar que o modelo proposto por Gwyn (1969) forneceu o melhor ajuste aos dados experimentais tanto para as esferas de alumina quanto para as partículas de dolomita. Embora os resultados preditos do modelo proposto por Lee et al., 1993 não tenha concordado satisfatoriamente com os dados obtidos experimentalmente, o comportamento fenomenológico está coerente com a cinética de atrição com o que é visto na literatura. Neste caso é observado que a massa do material particulado decresce exponencialmente com o tempo, como foi verificado nas Figuras 4.12 e 4.13. Cabe ressaltar que foram ajustados dois modelos propostos na literatura, baseando-se em formulações matemáticas distintas, sendo o modelo proposto por de Lee et al. (1993) composto por um termo exponencial, o que certamente contribuiu com o comportamento apresentado nas Figuras 4.12 e 4.13.

**Figura 4.12 - Dados experimentais e simulados da massa das esferas de alumina em função do tempo.**



(a)

**Figura 4.13 - Dados experimentais e simulados da massa das partículas de dolomita em função do tempo.**



(b)

Fonte: elaborado pelo autor

Em relação aos parâmetros estimados do modelo proposto por Gwyn (1969), estes apresentam comportamentos físicos, pois segundo Neil e Bridgwater (1994) os parâmetros  $m$  e  $k_p$  estão relacionados diretamente com o aumento da deformação aplicada nos materiais sólidos. Estes parâmetros foram estimados tomando como critério a minimização do quadrado dos dados preditos e experimentais através de uma rotina computacional desenvolvida no software MatLab® e estão sendo apresentados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 - Valores dos parâmetros estimados  $m$  e  $k_p$**

Material	$u/u_{mj}$	$m$ (-)	$k_p$ ( $s^{-m}$ )
Esferas de alumina	1,10	0,91	$3,61 \times 10^{-004} s^{-m}$
Esferas de alumina	1,20	0,86	$9,01 \times 10^{-004} s^{-m}$
Partículas de dolomita	1,10	0,82	$8,43 \times 10^{-004} s^{-m}$

No caso do modelo proposto por Lee et al. (1993) dois parâmetros constituem o equacionamento matemático,  $k_0$  e  $k_1$ , os quais levam em consideração a velocidade do ar de entrada e a de mínimo jorro. Os valores estimados desses parâmetros são apresentados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros estimados  $k_0$  e  $k_1$ .**

Material	$k_0$ ( $s^{-1}$ )	$k_1$ ( $m^2/s^2$ )
Esferas de alumina	$5,56 \times 10^{-4}$	- 4,42
Partículas de dolomita	$1,0 \times 10^{-3}$	4,42

Tomando-se como referência os parâmetros  $k_0$  e  $k_1$  dos materiais particulados apresentados na Tabela 4.5, torna-se difícil encontrar uma justificativa para explicar a relação desses parâmetros com material sólido e/ou as condições operacionais, uma vez que são poucos os trabalhos encontrados na literatura que aplicaram esse modelo na atrição no leito de jorro. Portanto, com esses dois valores qualquer análise ficaria incompleta.

Após a análise da atrição das esferas de vidro e das partículas de dolomita no leito de jorro convencional, os resultados apresentados na seção a seguir referem-se à atrição desses materiais particulados no leito de jorro mecânico.

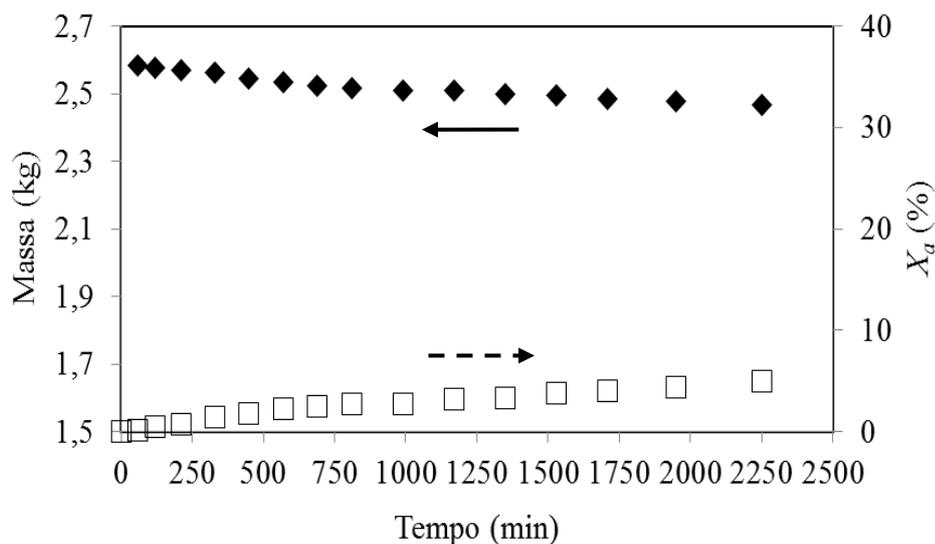
### 4.3. Análise da atrição de partículas esféricas e não esféricas no leito de jorro mecânico

Os ensaios de atrição das partículas esféricas (esferas de alumina) e não esféricas (partículas de dolomita) realizados no leito de jorro mecânico tiveram os resultados obtidos com base nas condições operacionais de 360 rpm,  $u = 09$  m/s e  $t = 2250$  minutos. Assim, mantendo-se fixa a velocidade do ar e a rotação do parafuso helicoidal, a massa do leito particulado foi pesada em intervalos de tempo previamente estabelecidos, conforme foi descrito no capítulo 3.

#### 4.3.1 Atrição em partículas esféricas

Observa-se na Figura 4.14 que a massa das partículas de alumina decresce em função do tempo. A massa inicial que era de 2,6 kg reduziu para 2,4 kg ao final da atrição. Em termos percentuais, verifica-se que o avanço da atrição não ultrapassou 6% do valor inicial. Comparando-se os resultados das duas configurações de leito de jorro, a redução observada no leito de jorro mecânico é mínima em relação ao que foi verificado no leito de jorro convencional. Tal fato pode ser comparado pela evolução dos dados de atrição apresentados em termos percentuais, enquanto no leito de jorro mecânico a atrição foi em torno de 6%, na configuração convencional esse valor foi de 32%.

**Figura 4.14 - Massa das esferas de alumina em função do tempo e evolução temporal da perda mássica ( $X_a$ ).**

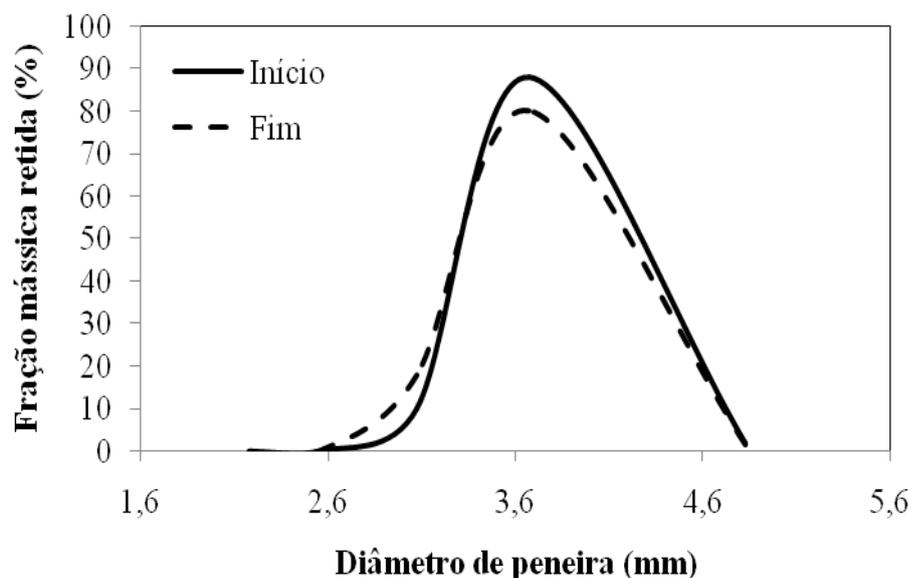


**Fonte: elaborado pelo autor**

De fato, a atrição foi inferior quando comparada com a que ocorreu no leito de jorro convencional, onde as partículas se chocam e cisalham com maiores velocidades. Isto indica que o movimento transmitido pelo meio mecânico não promove com intensidade o contato interpartícula, um dos principais motivos por causar a abrasão superficial dos materiais particulados durante sua circulação dentro do leito de jorro. Generalizar o uso do parafuso helicoidal para todos os tipos de materiais sólidos ainda não é possível, frente a diversidade de materiais sólidos que podem ser usados de diferentes tamanhos e formatos. Contudo, pode-se afirmar que, dentro das condições operacionais empregadas e os tipos de materiais sólidos selecionados no presente trabalho, o uso parafuso helicoidal no leito de jorro promoveu uma atrição menor quando comparado com o transporte pneumático das partículas.

Uma vez constatado que houve desgaste das esferas de alumina no leito de jorro mecânico, procurou-se obter a distribuição granulométrica antes e após os ensaios de atrição, como mostra a Figura 4.15. Verifica-se que as distribuições apresentam um comportamento gaussiano da fração mássica retida entre os limites do diâmetro de peneira usada nos ensaios experimentais. Diferente do que foi constatado no leito de jorro convencional, observa-se visualmente que há uma variação pequena de tamanho das partículas antes e após a atrição. Fato este comprovado através do cálculo realizado pela equação de Sauter, sendo este o diâmetro médio que corresponde a 3,61 mm no início e 3,55 mm ao final da atrição.

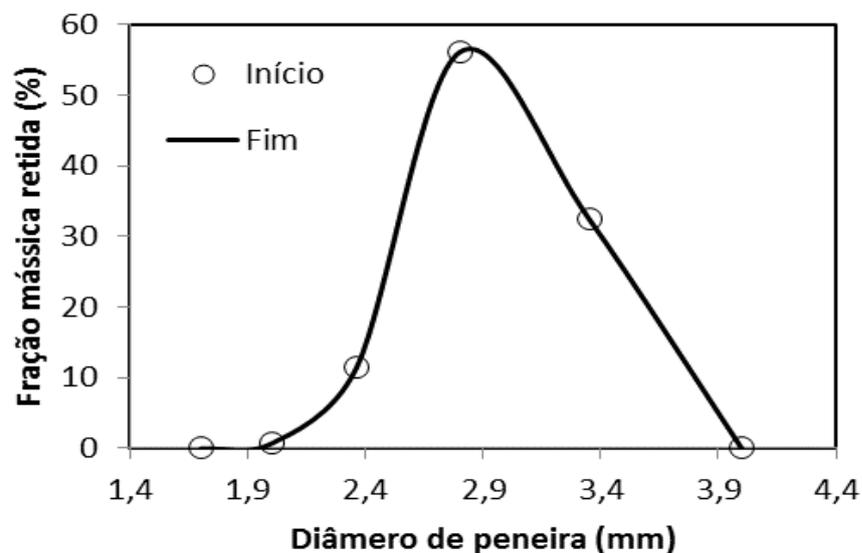
**Figura 4.15 - Distribuição granulométrica das esferas de alumina.**



**Fonte: elaborado pelo autor**

Foi visto também que as condições operacionais empregadas não foram suficientes para promover a atrição das esferas de vidro pelo fato da massa do leito particulado não ter reduzido e assim ter permanecido a mesma até o final dos ensaios experimentais. De acordo com a distribuição granulométrica obtida a partir de dados da fração mássica retida antes e após os ensaios como mostra a Figura 4.16, verifica-se a sobreposição das curvas, indicando que dentro da faixa de peneira utilizada, não houve variação no tamanho das partículas. Assim, para o tempo utilizado de 2250 minutos constatou-se que não houve desgaste das partículas utilizadas, ou seja, as esferas de vidro resistiram ao atrito no interior do leito de jorro e não se desgastaram, mesmo sobre o movimento circular promovido pelo parafuso helicoidal. Como não houve variação de tamanho, o diâmetro médio de Sauter calculado foi o mesmo, ou seja, igual a 3,20 mm.

**Figura 4.16 - Distribuição granulométrica das esferas de vidro**



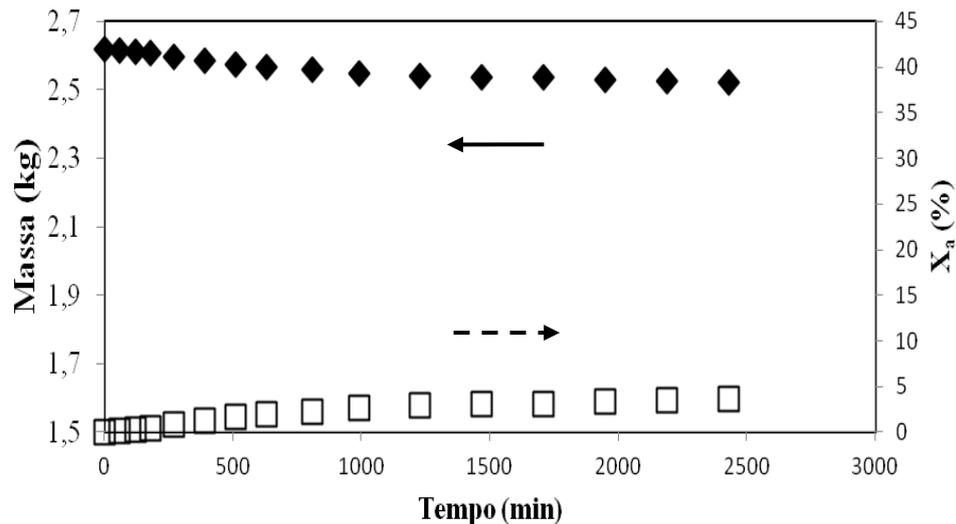
**Fonte: elaborado pelo autor**

#### 4.3.2 Atrição em partículas não esféricas

Foi analisado também se a geometria da partícula influenciava na atrição, já que a dolomita possui estrutura morfológica distinta das esferas de alumina. Como pode ser observado na Figura 4.17 não foi observado uma atrição significativa, visto que o ensaio experimental iniciou com 2,6 kg de partículas de dolomita e atingiu ao final do experimento 2,5 kg, representando uma perda que não superou 4,0 % do valor inicial. Essa pequena perda

mássica contribui para mostrar que o jorro mecânico não promove com intensidade o contato interpartícula, portanto, o modo mecânico de transportá-las não proporcionou uma significativa atrição das partículas de dolomita.

**Figura 4.17 - Massa das esferas de alumina em função do tempo e evolução temporal da perda mássica ( $X_a$ ).**



**Fonte: elaborado pelo autor**

A Figura 4.18 mostra fotografias retiradas das partículas de dolomita antes e após os ensaios de atrição. Nitidamente observa-se que a atrição concentra-se mais nas arestas das partículas, situação esta diferente quando comparada com as imagens das partículas de dolomita obtidas para o leito de jorro convencional (Figura 4.9).

Diante dos resultados obtidos nas duas configurações de leito de jorro, foi constatado que a atrição dos materiais particulados foi maior quando utilizou-se o leito de jorro convencional. Isto foi verificado com base nas condições operacionais empregadas nesse trabalho de pesquisa, bem como na estrutura morfológica do material utilizado. Para um valor mínimo de velocidade do ar, a atrição foi significativa, tornando-se ainda maior com o aumento dessa variável, conseqüentemente, dois fatores foram observados: perda mássica e redução de tamanho das partículas. Ainda é um desafio controlar esses fatores, uma vez que quanto menores forem, a eficiência do processo aumenta e a emissão de material particulado torna-se menor.

**Figura 4.18 - Imagens das partículas de dolomita: (a) antes da atrição e (b) após a atrição no leito de jorro mecânico.**



**(a)**



**(b)**

**Fonte: elaborado pelo autor**

Desta forma, com base nas condições operacionais empregadas dos ensaios experimentais realizados, pode-se concluir que as esferas de vidro foram resistentes a atrição nas duas configurações usadas de leito de jorro. Esse motivo contribuiu à continuar o presente trabalho de pesquisa utilizando esferas de vidro nos experimentos que englobam as análises de evaporação de água e da secagem do leite desnatado nas duas configurações de leito de jorro.

#### **4.4 Análise térmica e de massa na evaporação de água no leito de jorro convencional e mecânico**

A análise térmica e de massa realizada na evaporação de água foi importante no sentido de obter um conhecimento prévio do comportamento das duas configurações de leito de jorro frente à presença de uma fase líquida. Para analisar a parte térmica, foram monitorados ao longo do experimento os dados de temperaturas na saída (bulbo seco e úmido) e na entrada dos dois leitos de jorro. Com esses dados, analisou-se a eficiência térmica do processo de evaporação separadamente para cada configuração. Quanto a transferência de massa, foram analisados os dados de umidade relativa e absoluta do ar de exaustão dos equipamentos.

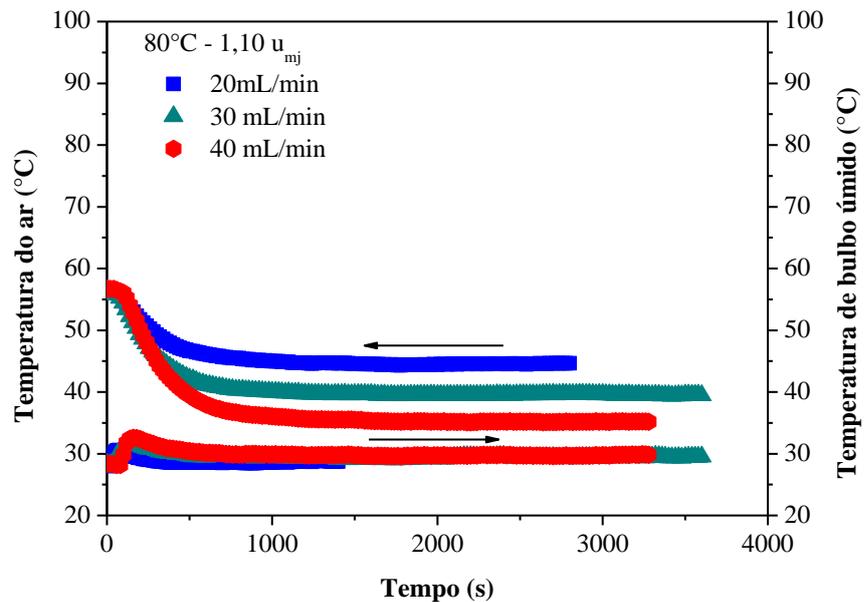
##### 4.4.1 Temperatura do ar de saída

Nas Figuras 4.19 e 4.20 são apresentados os dados referentes à temperatura do ar e de bulbo úmido, ambos medidos na saída do leito de jorro. Na Figura 4.19 os dados apresentados são do leito de jorro convencional e foram obtidos dos experimentos conduzidos nas temperaturas do ar de entrada 80 e de 100°C, velocidade 1,10  $u_{mj}$  e massa de inerte igual a 3 kg. Na Figura 4.20 os dados apresentados correspondem ao leito de jorro mecânico para a mesma quantidade de inertes usada no leito de jorro convencional (3 kg) e foram obtidos empregando temperatura do ar de entrada 80 e 100°C, rotação do parafuso helicoidal fixada em 360 rpm e a velocidade do ar empregada nos experimentos variou entre 09 e 17 m/s.

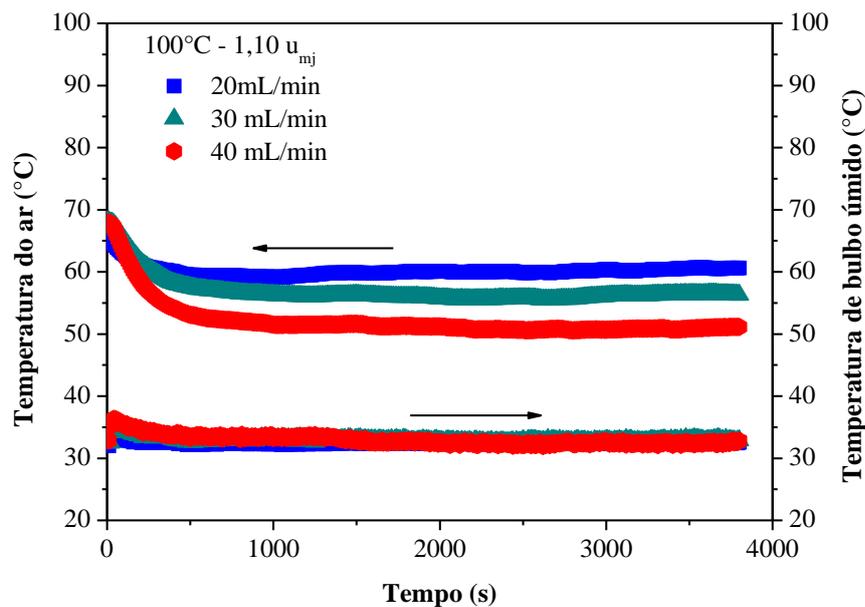
Observa-se que as temperaturas do ar de saída das duas configurações de leito de jorro apresentaram comportamentos bastante semelhantes, mostrando que a temperatura reduziu gradativamente até se estabilizar, ou seja, quando o regime permanente foi estabelecido. Esse comportamento era esperado, pois boa parte da energia da corrente gasosa passou a ser transferida na forma de calor sensível para a fase líquida. Além disso, como as partículas foram previamente aquecidas, sua energia térmica também foi transferida para a

fase líquida, contribuindo para a queda mais rápida do ar logo no início do experimento. Quando o regime permanente é alcançado, a energia perdida pelo líquido em função da evaporação deve ser reposta pela transferência de energia na forma de calor sensível da corrente de ar para a água. Por esse motivo, a temperatura do ar na saída do leito de jorro manteve-se constante até o final do experimento.

**Figura 4.19 - Temperatura do ar e temperatura de bulbo úmido em função do tempo na saída do leito de jorro convencional: (a) 80°C e (b) 100°C.**



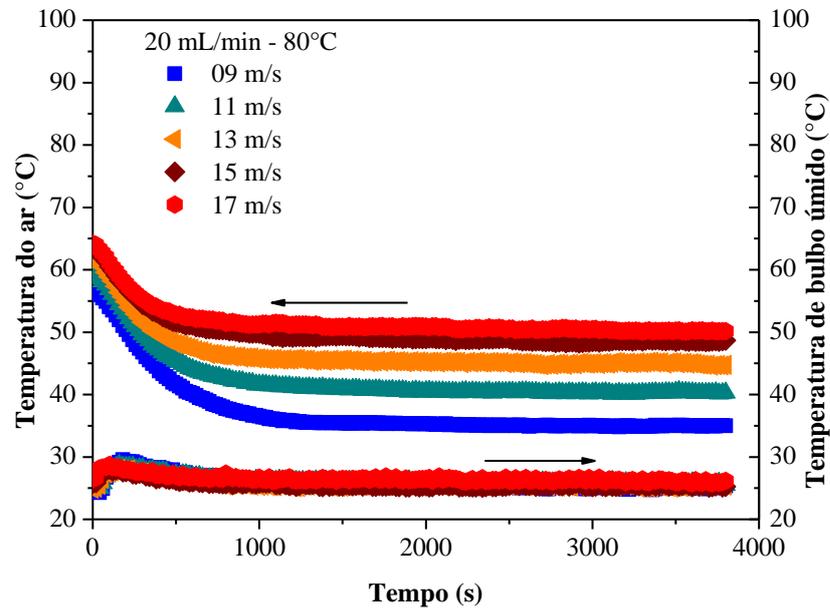
(a)



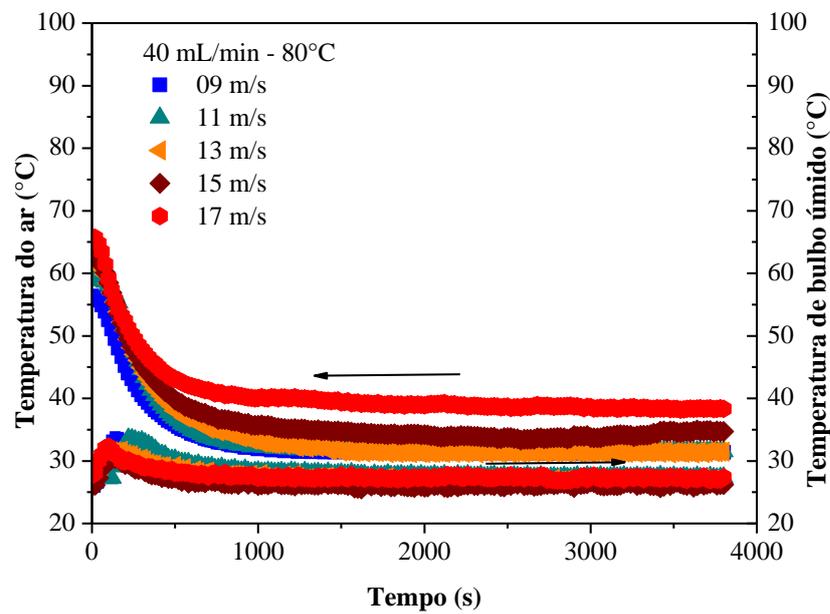
(b)

Fonte: elaborado pelo autor

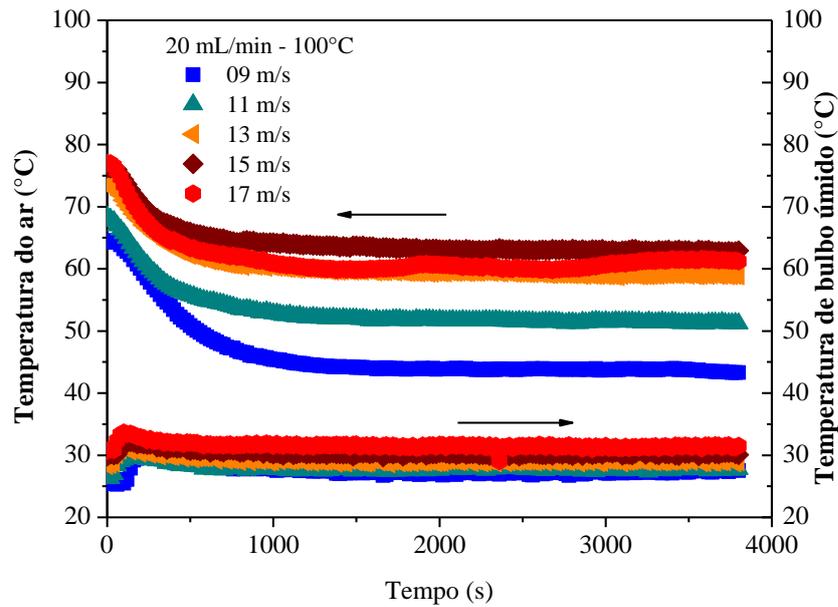
Figura 4.20 - Temperatura do ar e temperatura de bulbo úmido em função do tempo na saída do ar do leito de jorro mecânico (a) e (b) 80°C - (c) e (d) 100°C.



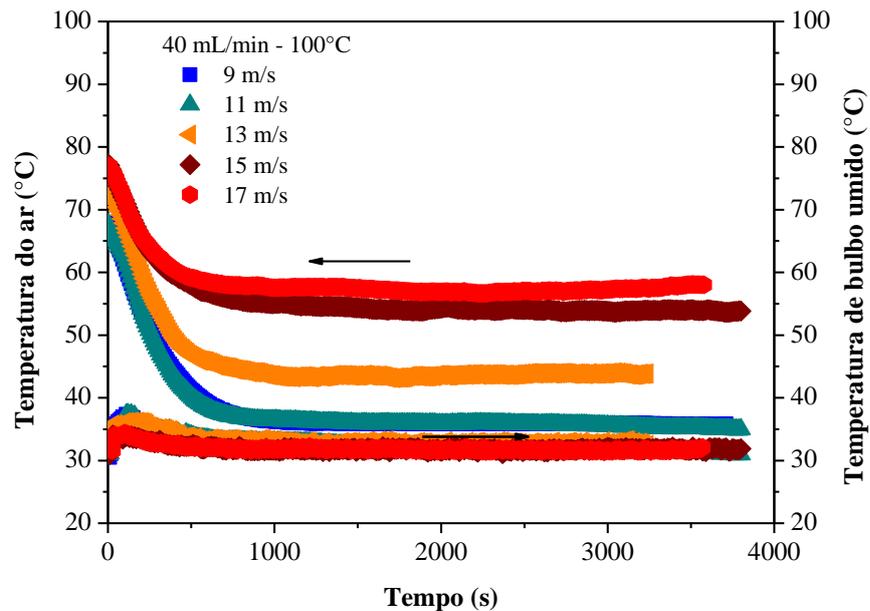
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fonte: elaborado pelo autor**

Para as duas configurações de leito de jorro, foi observado que o aumento da vazão de alimentação de pasta e da temperatura influenciaram na evaporação, conforme foi constatado pelos dados de temperatura apresentada as Figuras 4.19 (a) e (b) e as Figuras 4.20 (a) a (d). Aumentando a vazão de pasta para o sistema, nota-se que o ar de saída se aproxima mais da condição de saturação do ar (temperatura de bulbo úmido). Isto por que a demanda de energia transferida na forma de calor sensível para a fase líquida, torna-se maior com o

aumento desta fase dentro do leito de jorro, por consequência, menor será a temperatura do ar de saída do leito de jorro. Comportamento semelhante foi obtido também por Perazzini, (2015) e Vieira, (2015).

Comportamento inverso ocorre quando aumenta a temperatura do ar de entrada. Observa-se que, independente da configuração de leito de jorro, nota-se que ao fornecer uma maior quantidade de energia térmica ao sistema, a temperatura do ar de saída afasta-se da condição de saturação da corrente gasosa. De fato, durante a convecção, apenas parte da energia transferida é aproveitada na evaporação da água, o excedente é transportado juntamente com a corrente gasosa até a saída do leito de jorro. Ao aumentar a temperatura do ar de operação, a energia não aproveitada na evaporação presente na corrente de ar é maior, o que resulta em uma temperatura do ar na saída mais próxima da condição inicial na entrada do leito de jorro.

Conforme foi visto, um aumento da temperatura representa também no incremento de energia térmica fornecida ao sistema na forma de calor sensível. Isso faz com que a capacidade que a corrente de ar tem de absorver água também aumente, e portanto, maiores vazões de alimentação de pasta poderiam ser usadas para a maior temperatura do ar de entrada. Lembrando que a energia transportada pelo ar é dada pela equação  $Q = \dot{m} c_p \Delta T$ , assim, aumentando a vazão de ar ( $\dot{m}$ ) maior será também a energia transferida ( $Q$ ), o mesmo pode ser atribuído para  $\Delta T$ . Este é um fato que já foi provado por Almeida, (2009) e Nascimento, (2013) quando analisaram a evaporação da água usando o leito de jorro convencional. As vazões de água empregadas nos experimentos foram suficientes para atender os objetivos propostos desta parte do trabalho, sem que tivesse a necessidade de investigar a vazão máxima de alimentação de água em função da saturação do ar ou quando houvesse o colapso do leito particulado.

A vazão de ar também influenciou na evaporação, contudo, essa variável somente foi avaliada no leito de jorro mecânico, visto que foi somente nessa configuração de equipamento onde foram empregadas diferentes velocidade do ar nos experimentos. Nota-se que ao aumentar a velocidade do ar, menores patamares de temperaturas são alcançadas. Neste caso, provavelmente, nas condições de velocidades baixas (09, 11 m/s) a troca térmica entre a pasta e a corrente de ar aquecida foi maior durante o processo de secagem. Por outro lado, ao trabalhar com velocidades maiores (13, 15 e 17 m/s), boa parcela da corrente de ar direcionou-se pela região do jorro mecânico até sua saída, proporcionando um menor contato gás-líquido, consequentemente, resultando em menores diferenças de temperatura.

Até o presente momento, é digno de nota, dizer que o uso do parafuso helicoidal trabalhando com vazões de ar abaixo da velocidade de mínimo jorro apresentou maiores potenciais térmicos, visto que observou-se diferenças entre as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido inferiores às apresentadas no leito de jorro convencional durante a evaporação de água.

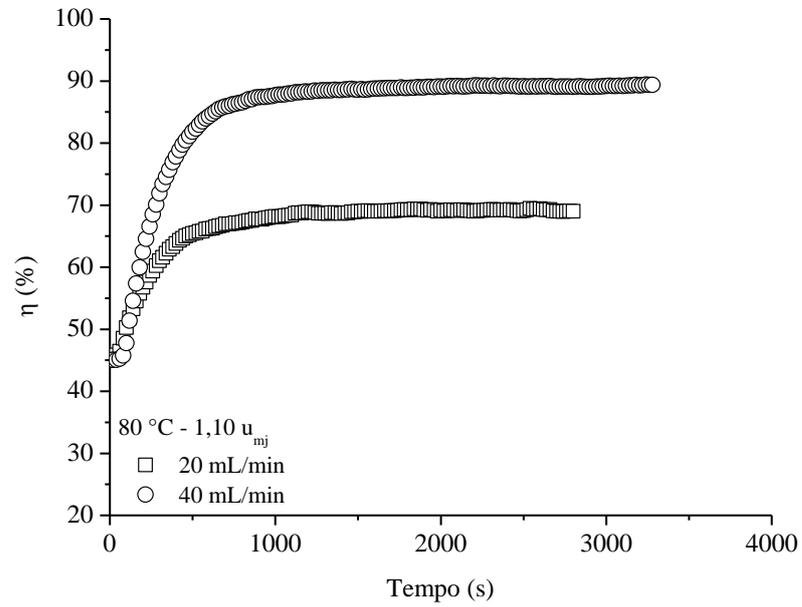
#### 4.4.2 Eficiência térmica

Com os dados das temperaturas apresentadas, avaliou-se a eficiência térmica usando a Equação 3.9 apresentada no capítulo 3 desse trabalho de pesquisa. O conhecimento dessa variável é importante para quantificar a capacidade energética de um secador convectivo, conhecendo apenas a temperatura na entrada e saída do leito de jorro durante o processo de evaporação.

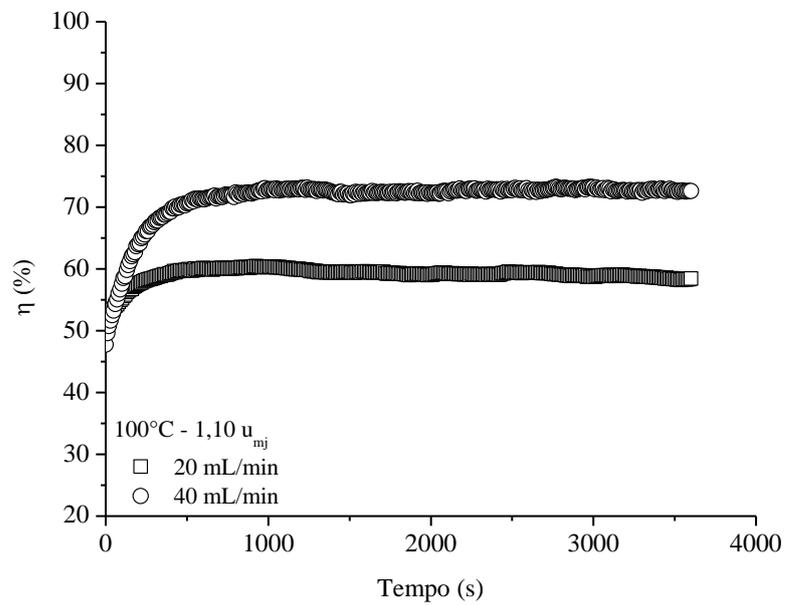
Nas Figuras 4.21 (a) e (b) são apresentados os resultados calculados da eficiência térmica máxima sob a condição de  $1,10 u_{mj}$  no leito de jorro convencional. Nas Figuras 4.22 (a) a (d) são apresentados os dados da eficiência térmica no leito de jorro mecânico, parametrizados na velocidade do ar a uma rotação fixa do parafuso helicoidal de 360 rpm.

Comparando os comportamentos vistos nas curvas da eficiência térmica, observa-se que são semelhantes do ponto de vista qualitativo tanto para a temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$  quanto para  $100^{\circ}\text{C}$ , independente da configuração do leito de jorro usada. Conforme pode ser observado a eficiência térmica aumentou até atingir um valor limite e em seguida manteve-se praticamente constante, confirmando que a partir desse ponto a eficiência máxima foi alcançada e qualquer avanço do tempo prevalece o regime permanente. Como a equação usada no cálculo da eficiência térmica está vinculada com os dados obtidos das temperaturas de entrada e saída do leito de jorro durante a evaporação ( $\eta = ((T_0 - T_{ar}) / (T_0 - T_{sat}))$ ), nota-se que, quanto maior for a diferença entre as temperaturas do ar na saída (bulbo seco) e a estabelecida na entrada do leito de jorro, desde que a temperatura de bulbo úmido mantenha-se constante durante a evaporação, maior será a eficiência térmica do leito de jorro. O ponto máximo de um processo será alcançado quando o termo numerador da equação que calcula a eficiência for constante durante toda a evaporação, regime permanente.

**Figura 4.21 - Eficiência térmica máxima em função do tempo para o leito de jorro convencional: (a) 80°C e (b) 100°C**



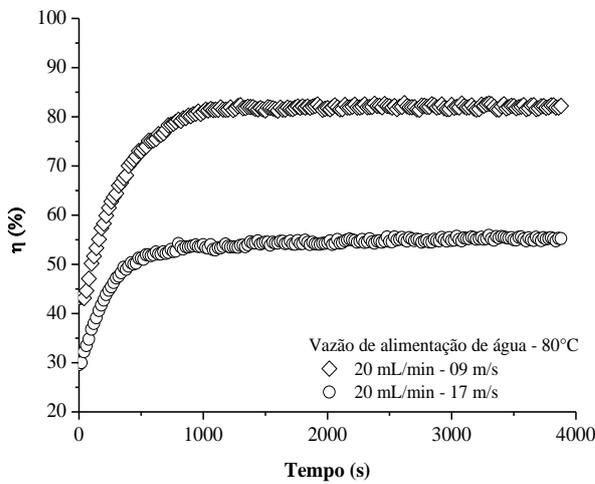
(a)



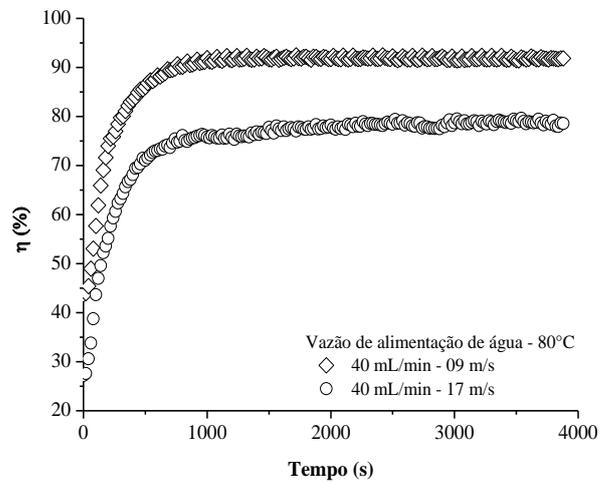
(b)

**Fonte: elaborado pelo autor**

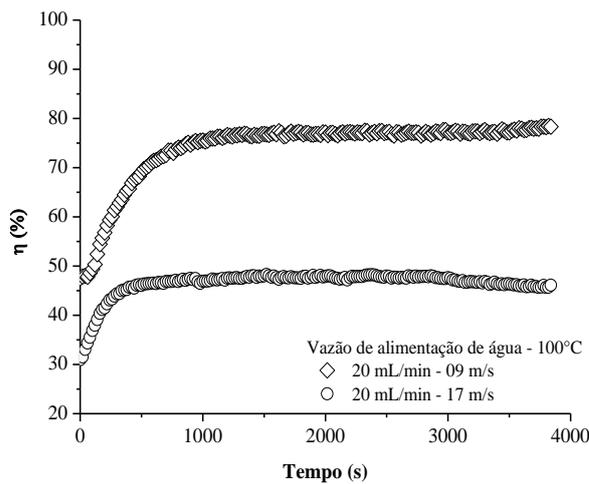
**Figura 4.22 - Eficiência térmica máxima em função do tempo para o leito de jorro mecânico: (a) e (b) 80°C - (c) e (d) 100°C**



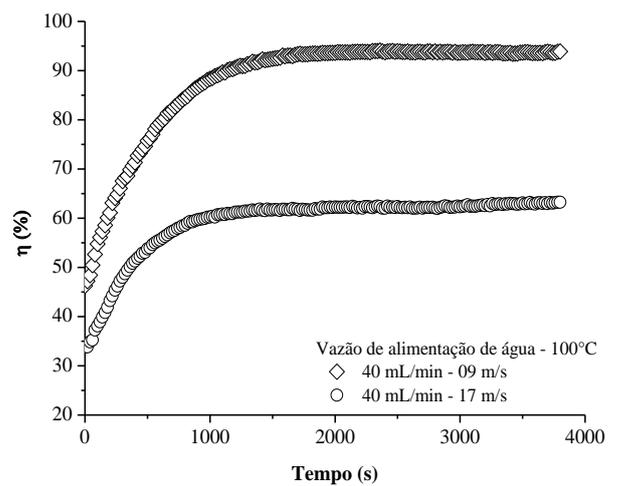
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fonte: elaborado pelo autor**

Evidentemente que por ser uma variável diretamente dependente da temperatura, o seu comportamento pode mudar para uma condição mais ou menos eficiente, dependendo das condições de entrada do leito de jorro (temperatura, velocidade e vazão de água). No caso da temperatura do ar de entrada foi visto nos gráficos de temperatura (Figura 4.19 e 4.20) que apesar do seu aumento nem toda a energia transferida da corrente de ar é absorvida pela fase líquida. Em decorrência disso, a diferença de temperatura ( $T_0 - T_{ar}$ ) é sempre menor, o que resulta em obter menores eficiências térmicas, conforme pode ser visto

na Figura 4.21 (a) e (b). Fato este que foi constatado também por Meili, (2009) na secagem de materiais líquidos usando leitos vibro fluidizados.

Com relação à vazão de alimentação de água, independente da temperatura do ar usada na entrada do leito, o que pode ser observado é uma maior eficiência térmica a medida que aumentou a vazão de água para o sistema. Considerando a temperatura de 100°C para analisar o efeito da vazão de água, verifica-se na Figura 4.21 (b) que a 20 e 40 mL/min a eficiência térmica foi de 60 e 72%, respectivamente, o que representou um aumento de 16%. Esse comportamento era esperado, pois tendo vista que a evaporação é um processo endotérmico; quanto maior for a demanda de energia térmica para evaporar a água assim será também a eficiência energética do processo, o que fará com que a diferença de temperatura ( $T_0 - T_{ar}$ ) seja maior. O resultado será uma eficiência térmica maior na proporção que aumenta a vazão de alimentação de água, desde que não sature o leito de jorro. Por esta análise isto mostra que os leitos de jorro apresentam em comum o mesmo comportamento em relação a vazão de alimentação de água.

Todavia, pode-se constatar a nítida superioridade da eficiência térmica no leito de jorro mecânico, utilizando idênticas condições operacionais de temperaturas e vazões de água avaliadas anteriormente na configuração convencional do leito de jorro, conforme mostram as Figura 4.22 (a) a (d). Os resultados apresentados nessas figuras revelaram que a eficiência térmica, além de ser dependente da temperatura do ar na entrada e da vazão de alimentação de pasta, também apresenta dependência com a velocidade do ar empregada na entrada do leito de jorro. Embora exista diferença na maneira de conduzir a circulação das partículas (modo mecânico), os resultados obtidos foram todos conforme esperavam-se, principalmente comparando-se qualitativamente com o que foi visto no leito de jorro convencional.

Analisando a Figura 4.22 (a) a (d) verifica-se que independente da temperatura do ar e da vazão de alimentação de água os comportamentos foram similares. Considerando os resultados apresentados na Figura 4.22 (c), nota-se que estabelecido a temperatura a 80°C e vazão de água a 20 mL/min a medida que emprega-se a velocidade do ar 9 e 17 m/s, a eficiência térmica aumenta de, aproximadamente, 47% para 78%, considerando esses valores nas condições de estabilidade térmica. Baseando-se no que já foi explicado anteriormente, um aumento na vazão do ar é mais canalizado para a região de jorro, influenciando pouco na região anular, conseqüentemente, o ar atravessa quase que totalmente essa região, e com isso afeta pouco a temperatura do ar de saída. O oposto ocorre para baixas velocidades do ar de entrada, pois como a troca térmica é maior, a corrente gasosa deixa o leito de jorro com uma

temperatura mais baixa. Como a eficiência térmica é avaliada em função das temperaturas do ar de saída, qualquer redução desta variável contribui com o seu aumento.

#### 4.4.3 Umidade relativa e absoluta

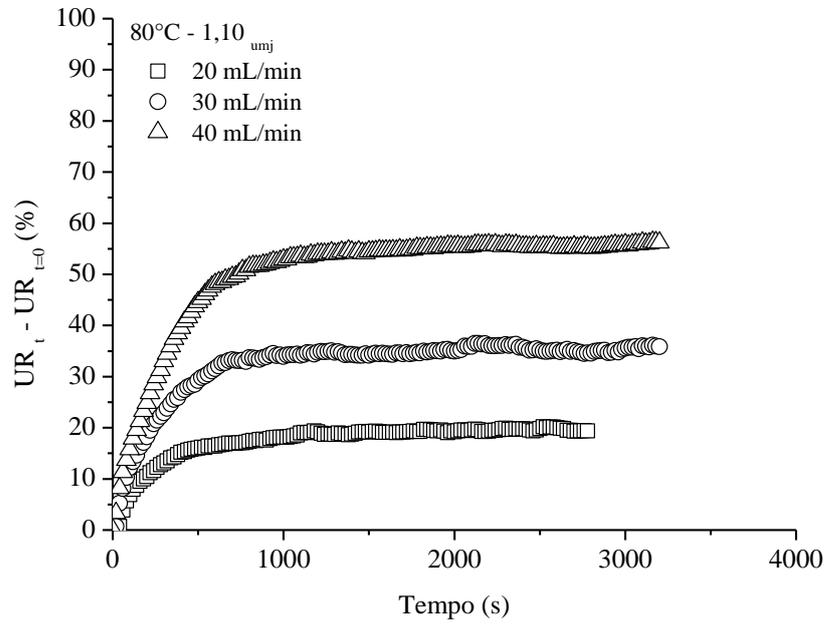
Para complementar com a parte térmica discutida nos parágrafos anteriores, a transferência de massa do processo de evaporação foi analisada com base no equacionamento proposto por Wilhelm, (1976) usado para calcular a umidade relativa e absoluta do ar. O equacionamento numérico para estimar essas variáveis foi realizado com base em rotinas computacionais construídas e desenvolvidas no software MatLab ®. Os parâmetros de entrada requeridos foram a temperatura de bulbo seco e bulbo úmido.

Desta forma são apresentados nas Figuras 4.23 (a) e (b) a umidade relativa em função do tempo de evaporação na saída do leito de jorro convencional. Posteriormente serão apresentados nas Figuras 4.24 (a) a (d) a umidade relativa obtida na saída do leito de jorro mecânico, parametrizada na velocidade do ar na entrada do leito

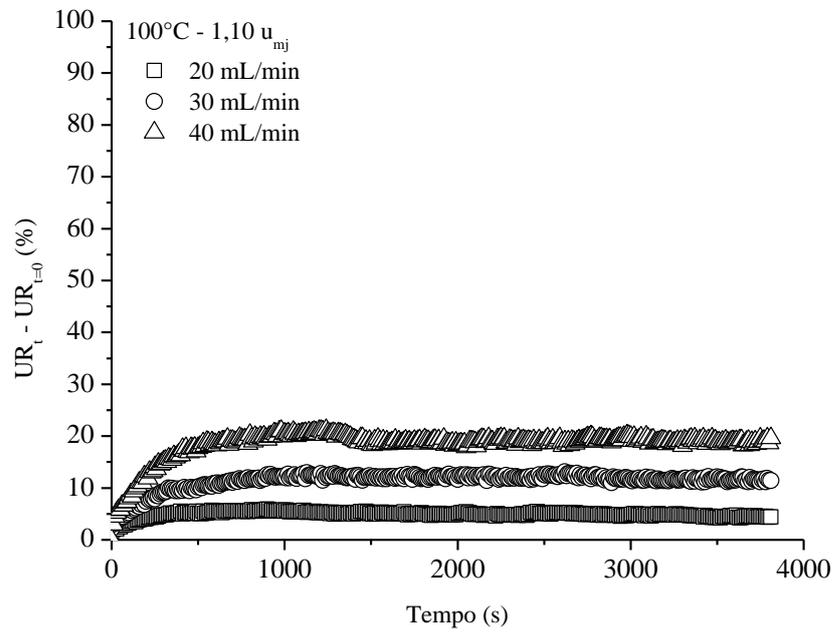
Observa-se nas Figuras 4.23 e 4.24 que a umidade relativa apresenta comportamentos similares para as duas configurações dos leitos de jorro. Esses comportamentos expressam um aumento contínuo da umidade relativa até alcançar um valor máximo, que corresponde a um tempo específico para cada curva apresentada. Depois que esse tempo é atingido, a umidade relativa prossegue na condição de regime permanente, o qual é mantido até o encerramento do ensaio experimental.

Como já era esperado, a umidade relativa apresenta estrita dependência com as variáveis operacionais (temperatura, velocidade e vazão de pasta). O mesmo pode-se dizer para o tempo que a umidade levou para alcançar o regime permanente. É válido destacar que essas dependências tanto da umidade quanto do tempo foram verificadas nos resultados nas duas configurações do leito de jorro apresentadas nas Figuras 4.23 e 4.24.

**Figura 4.23 - Umidade relativa do ar em função do tempo na saída do leito de jorro convencional – (a) 80°C e (b) 100°C**

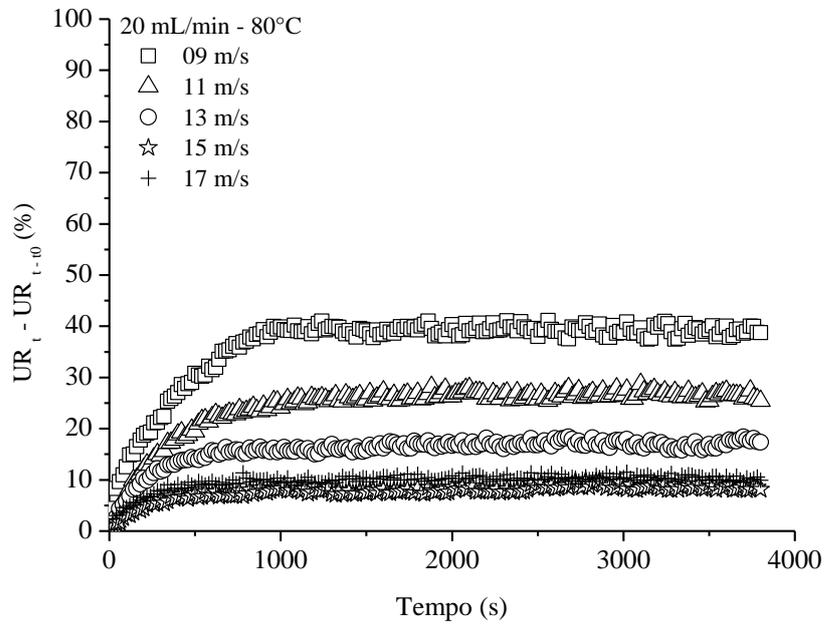


**(a)**

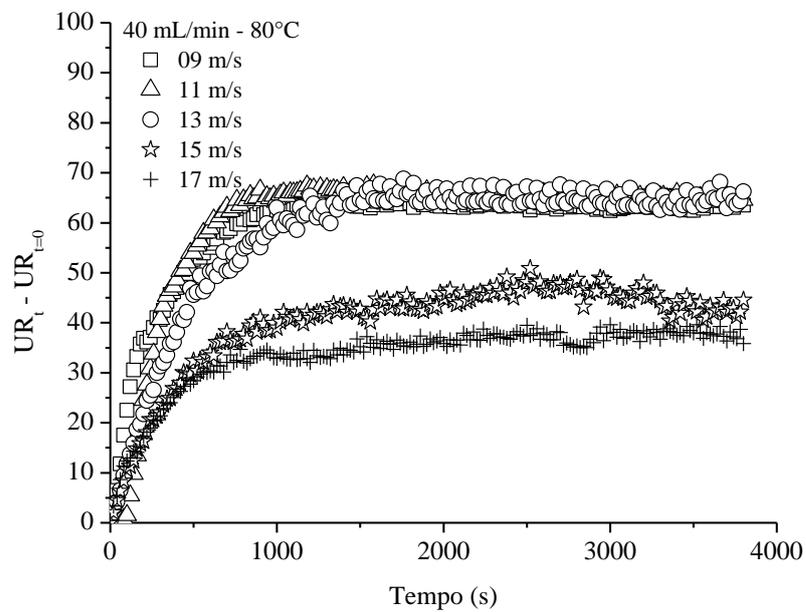


**(b)**

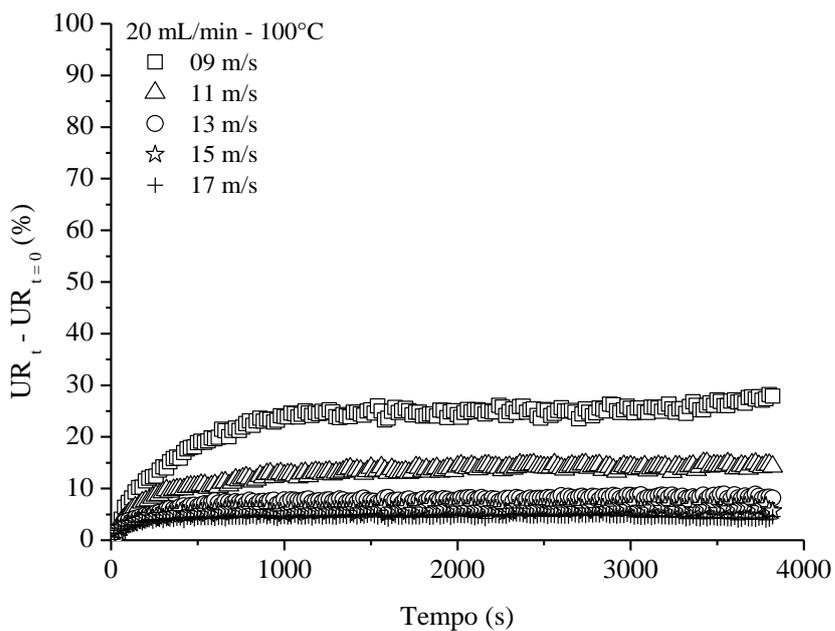
**Figura 4.24 - Umidade relativa do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico. (a) 80°C e 20 mL/min; (b) 80°C e 40 mL/min; (c) 100°C e 20 mL/min e (d) 100°C e 40 mL/min.**



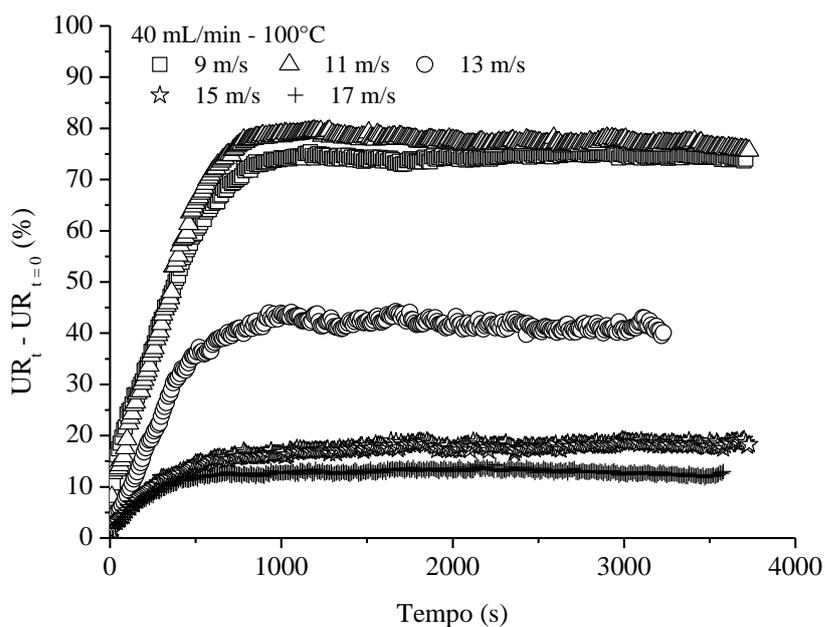
(a)



(b)



(c)

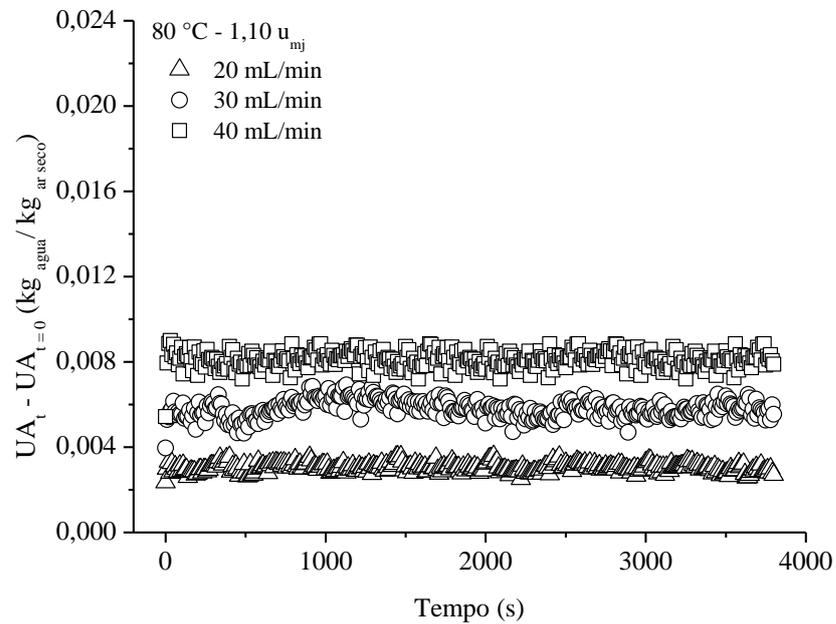


(d)

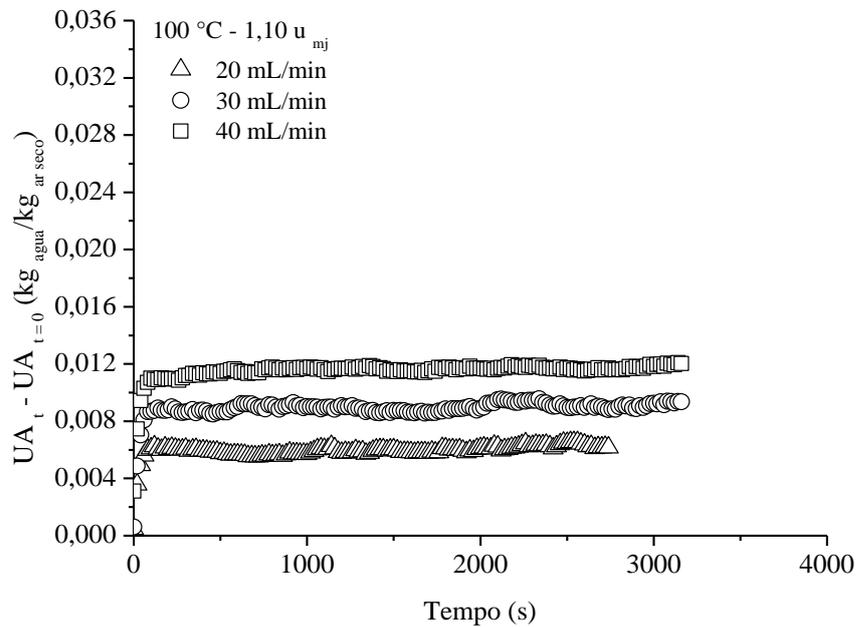
**Fonte: elaborado pelo autor**

Em termos quantitativos a fração de água evaporada pode ser conhecida com base nos gráficos de umidade absoluta construídos a partir dos dados de temperatura do ar e de bulbo úmido obtidos na saída do leito de jorro. Nas Figuras 4.25 (a) e (b) são apresentados os dados da umidade absoluta no regime transiente para o leito de jorro convencional. Para o leito de jorro mecânico, os resultados da umidade absoluta são apresentados nas Figuras 4.26 (a) a (d), parametrizada na velocidade do ar na entrada do leito.

**Figura 4.25 - Umidade absoluta do ar em função do tempo na saída do leito de jorro convencional. (a) 80°C e (b) 100°C**



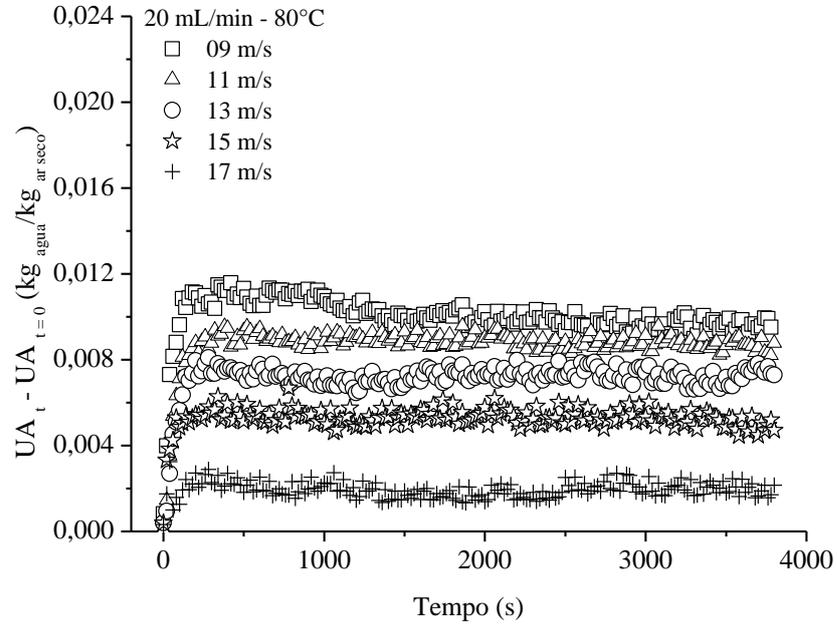
(a)



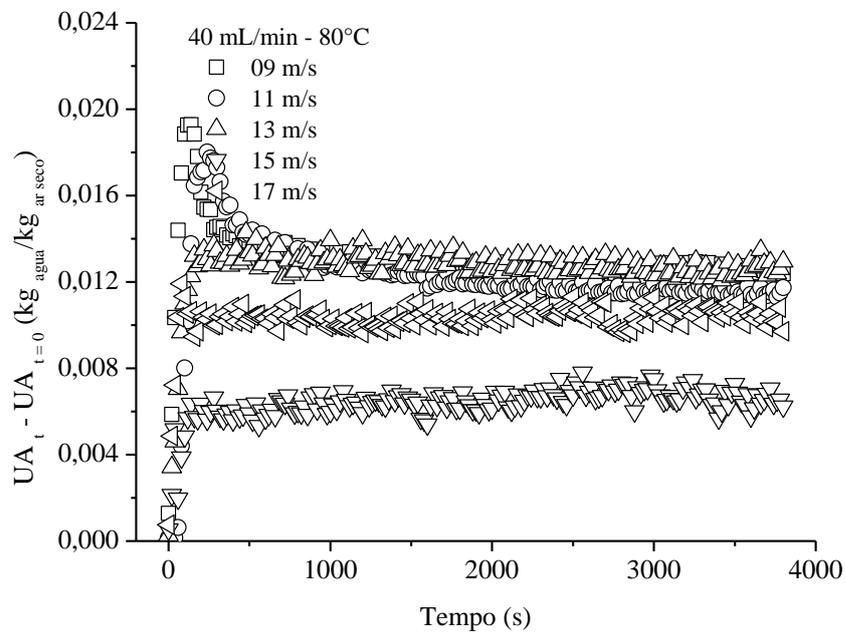
(b)

Fonte: elaborado pelo autor

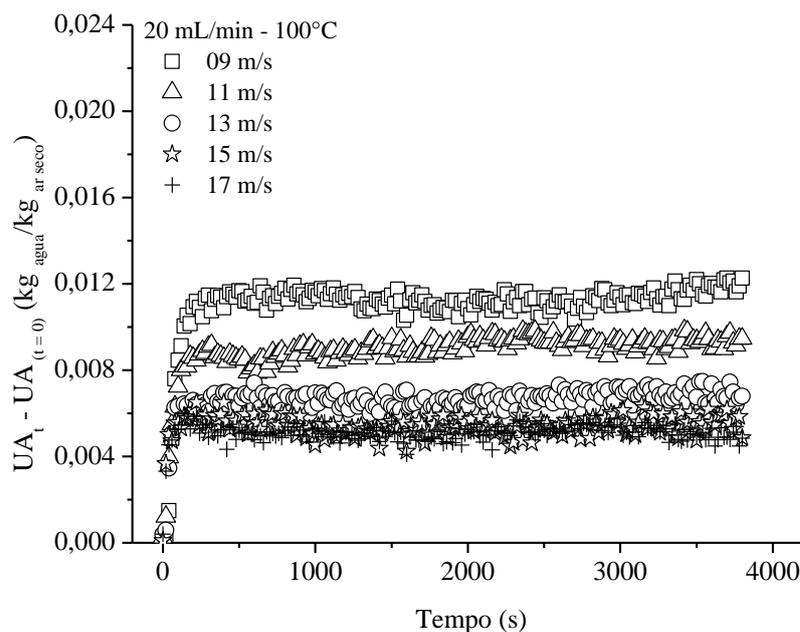
**Figura 4.26 - Umidade absoluta do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico. (a) 80°C e 20 mL/min; (b) 80°C e 40 mL/min; (c) 100°C e 20 mL/min e (d) 100°C e 40 mL/min.**



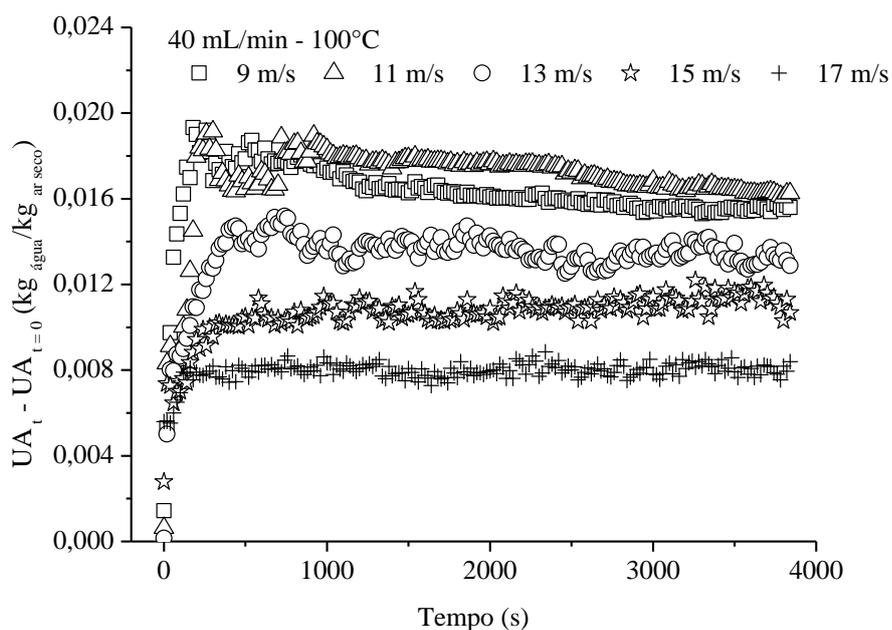
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fonte: elaborado pelo autor**

Com base nas mesmas condições operacionais que foram usadas para avaliar a umidade relativa, o que chama atenção nas Figuras 4.25 e 4.26 é a existência de uma rápida elevação da umidade absoluta evidenciada, o que levou, aproximadamente, 60 segundos. Após esse tempo a umidade absoluta não sofre variações significativas, o que possibilita considerar que permanece constante ao longo do tempo. O fato da umidade absoluta aumentar

repentinamente já foi relatado por Nascimento (2013), a qual afirma que o comportamento apresentado por esta variável está relacionado com o procedimento experimental adotado durante a condução dos experimentos. Resumidamente, pode-se dizer que a evaporação da água é rápida nos instantes iniciais devido a elevada disponibilidade de calor das partículas e da corrente gasosa que pode ser transferida para as primeiras porções de líquido no momento que são injetadas dentro do leito de jorro.

Outro aspecto deve ser levado em consideração é o fato da umidade absoluta torna-se maior quando são aplicadas maiores vazões de alimentação de pasta. Este comportamento corrobora com o que foi discutido anteriormente para a umidade relativa do ar, mostrando que a quantidade de água evaporada foi maior. A umidade absoluta vem finalizar esse item, confirmando tudo o que foi apresentado e discutido anteriormente para a temperatura e a umidade relativa do ar na saída do leito de jorro.

Durante os experimentos, foi observado que para determinadas condições operacionais empregadas, houve a saturação da corrente gasosa na saída do leito de jorro mecânico. Com base nessa constatação construiu-se uma tabela com o propósito de apresentar resultados relevantes referentes às curvas de umidade e as condições avaliadas onde ocorreu a saturação da corrente de ar. Sendo assim, são apresentados na Tabela 4.6 o tempo e a umidade relativa do ar no instante que atingiu o regime permanente e se ocorreu a saturação nas condições operacionais avaliadas.

**Tabela 4.6 - Dados da umidade relativa e da saturação do ar no regime permanente.**

T(°C)	u (m/s)	Q (mL/min)	UR (%)	t (s)	Saturação
80	09	20	39,00	900	Não
	17		7,75	500	Não
80	09, 11 e 13	40	-	-	Sim
	17		36,29	900	Não
100	09	20	25,00	1100	Não
	17		5,25	320	Não
100	09 e 11	40	-	-	Sim
	17		14,25	1050	Não

**Fonte: elaborado pelo autor**

Para explicar o efeito da vazão de alimentação de água, a umidade relativa do ar na saída do leito de jorro torna-se maior, caso aumente também a energia transferida para a fase líquida. Se este aumento for atendido, ocorre então o incremento da fração mássica de água na forma de vapor saturado para a corrente do ar na saída do secador. O resultado é o aumento da umidade relativa à medida que maiores vazões de alimentação de pasta são aplicadas, por consequência, o tempo para alcançar a condição de equilíbrio também aumenta, como pode ser verificado na Tabela 4.6. Tomando como referência a temperatura de 80°C, observa-se que para a velocidade de 17 m/s e 20 mL/min a umidade relativa alcançou o valor de 7,75% em 500 segundos. Com o aumento da vazão de pasta para 40 mL/min, na mesma temperatura e velocidade do ar, a umidade aumentou para 36,29% em 900 segundos.

No caso da temperatura, seu aumento influenciou significativamente na umidade relativa no sentido de proporcionar que sejam conseguidas maiores taxas de evaporação. Segundo Nascimento (2013) isto ocorre porque a capacidade que a corrente gasosa tem de absorver água aumenta diretamente com o aumento da temperatura. Portanto, aumentando a temperatura da corrente gasosa, fixando-se a velocidade e a vazão de alimentação de pasta, maiores quantidades de água podem ser evaporadas, desde que a corrente gasosa na saída do leito de jorro não atinja a saturação ou a circulação das partículas não seja prejudicada devido à aglomeração do leito particulado. Para uma mesma vazão de pasta e velocidade do ar, 20 mL/min e 17 m/s, por exemplo, observa-se na Tabela 4.6 que a umidade relativa reduziu de 7,75% para 5,25%, mostrando que é possível evaporar uma maior quantidade de água a 100°C. Esse efeito da temperatura do ar de entrada sobre a evaporação de água foi observado também por Perazzini (2015) no leito de jorro convencional utilizando dimensões semelhantes e condições operacionais próximas das usadas nesse trabalho, reforçando a semelhança dos resultados obtidos para o leito de jorro mecânico.

Entretanto, para determinadas condições de temperatura e vazão de pasta, nota-se que houve saturação da corrente de ar quando trabalhou-se com a maior vazão de pasta e a menor velocidade da corrente gasosa. Isto reforça o que foi explicado anteriormente para as temperaturas do ar de entrada. Com a corrente de ar a baixa velocidade (09, 11 e 13 m/s) o contato fluido-líquido é maior, conseqüentemente a fração líquida evaporada na fase vapor também foi maior, levando a uma condição máxima de evaporação do sistema. Porém, com maiores velocidades, a corrente de ar deixou o leito de jorro ainda com um potencial térmico para evaporar maiores quantidade de água, o que permitiu alcançar uma umidade menor. Isso pode ser verificado para qualquer condição de vazão de água e temperatura.

Todos os resultados apresentados demonstraram coerências físicas e, sobretudo concordaram com o que já se conhece na literatura sobre leito de jorro. Na configuração convencional, os resultados eram esperados e serviram de referência para comparar qualitativamente os comportamentos quando utilizou-se o parafuso helicoidal. Este por sua vez demonstrou pontos positivos e interessantes para aplicações em secagem de pastas, como condições operacionais estáveis e maiores potenciais de evaporação à baixas velocidade do ar. Por outro lado, sua aplicação tornou-se limitada devido a saturação de vapor de água na corrente gasosa, o que o tornaria inviável do ponto de vista na secagem de materiais pastosos.

#### **4.5 Secagem do leite desnatado no leito de jorro mecânico**

Neste item são apresentados os resultados referentes ao leito de jorro mecânico, visto que na literatura podem ser encontrados inúmeros trabalhos envolvendo a secagem de materiais pastosos em leito de jorro convencional, destacando-se o trabalho realizado por Perazzini (2015) que, além das condições operacionais próximas, utilizou um leito de jorro com dimensões idênticas às que foram usadas nesse trabalho de pesquisa. Desta forma, optou-se por realizar a secagem das pastas apenas no leito de jorro mecânico.

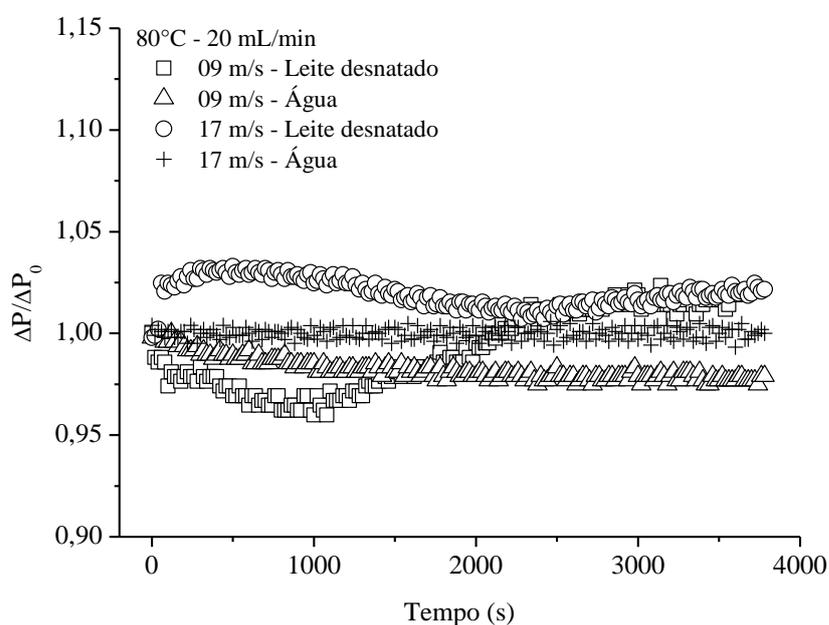
As condições operacionais empregadas na secagem do leite desnatado foram idênticas às aplicadas para analisar a evaporação da água à 80 e 100°C, conforme foram apresentadas anteriormente na Tabela 4.6. Entretanto, foram empregados somente a menor e a maior vazão de alimentação de pasta (20 e 40 mL/min), assim como as velocidades do ar de entrada de 09 e de 17 m/s, excluindo as variáveis de operação onde verificou-se a saturação da corrente gasosa. Com essas condições operacionais os dados obtidos foram suficientes para atender o propósito desse estudo, o qual teve como finalidade analisar o comportamento do leito de jorro mecânico frente à presença de uma pasta “real”.

Para tal fim, os dados de queda de pressão na entrada do leito e temperatura do ar de saída foram monitorados e utilizados, respectivamente, nos cálculos dos adimensionais da queda de pressão (razão entre a queda de pressão total do secador após a alimentação da pasta,  $\Delta P$ , e a queda de pressão total anteriormente à alimentação da pasta,  $\Delta P_0$ ) e da umidade relativa e absoluta do ar na saída do leito de jorro. Sentiu-se a necessidade de apresentar resultados obtidos dos experimentos de secagem do leite desnatado juntamente com a evaporação da “pasta padrão” objetivando identificar melhor a diferença entre os materiais pastosos na secagem. Adicionalmente a esses dados, verificou-se a umidade do pó seco recolhido na saída do ciclone durante o processo de secagem no leito de jorro mecânico.

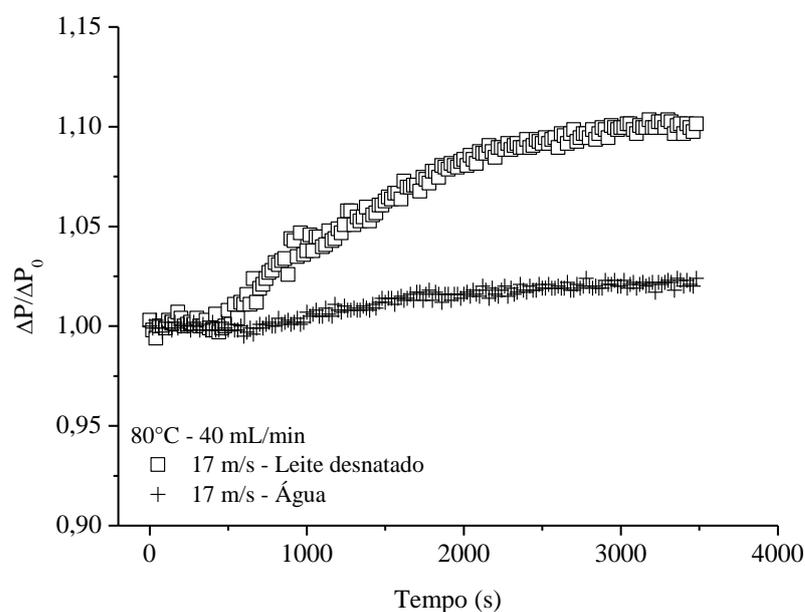
#### 4.5.1 Adimensional da queda de pressão total do leito de jorro mecânico

As Figuras 4.27 (a) a (d) apresentam os gráficos de adimensional de queda de pressão em função do tempo para a evaporação da água e a secagem do leite desnatado, parametrizados na velocidade do ar e sob as temperaturas de 80°C (Figuras 4.27 a e b) e de 100°C (Figuras 4.27 c e d).

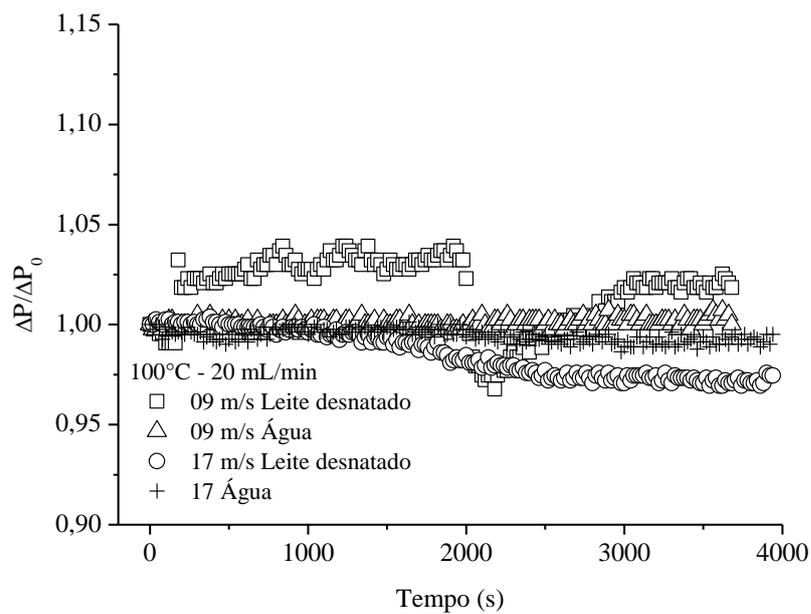
**Figura 4.27 - Adimensional de queda de pressão em função do tempo para o leito de jorro mecânico: (a) 80°C e 20 mL/min; 80°C e 40 mL/min; (c) 100°C e 20 mL/min e (d) 100°C e 40 mL/min.**



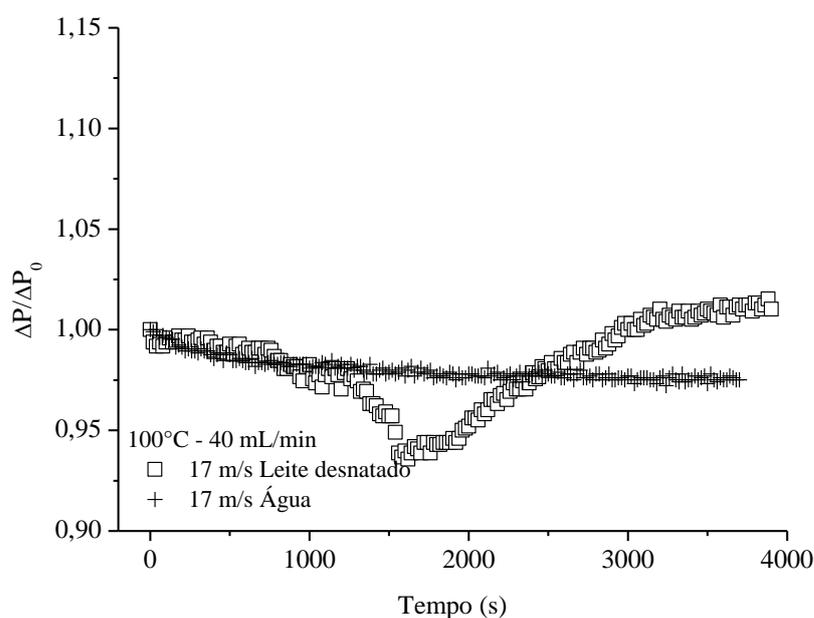
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fonte: elaborado pelo autor**

Para os experimentos de evaporação de água, verificou-se que o adimensional de queda de pressão,  $\Delta P_t / \Delta P_{t=0}$ , apresentou variações que não foram acentuadas, uma vez que foram inferiores a 3% em relação ao leito seco (início do processo), dependendo da condição operacional empregada no experimento. O mesmo aconteceu para os experimentos de

secagem do leite desnatado, contudo, variações em torno de 10% foram observadas para o adimensional de queda de pressão.

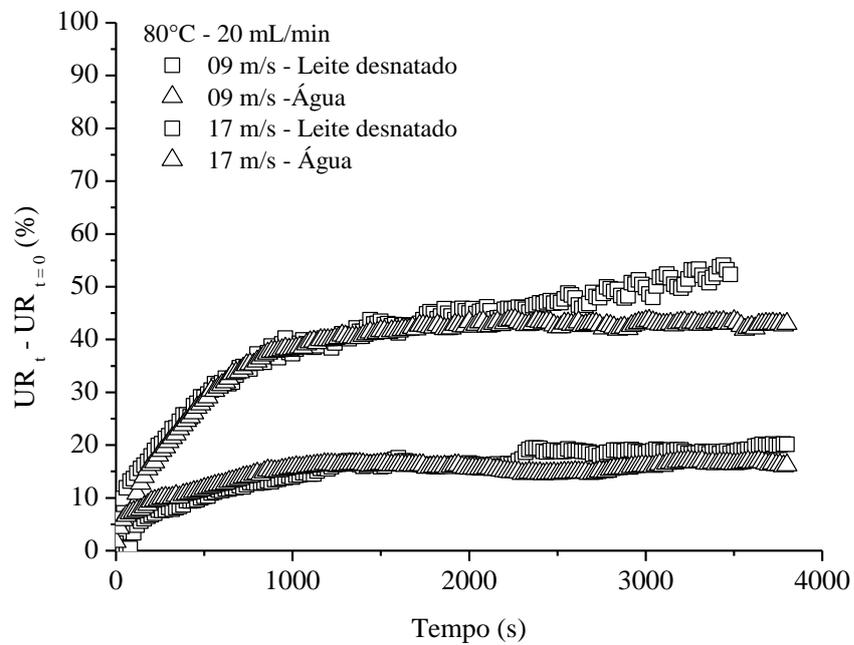
Considerando que a circulação das partículas no leito de jorro mecânico é promovida pela rotação do parafuso helicoidal, logo a velocidade das partículas na região de jorro é consideravelmente menor em relação ao leito de jorro convencional, o que favorece à elevada concentração de sólidos nessa região do leito. As partículas movimentam ascendentemente por essa região e ao atingirem a superfície do leito particulado são distribuídas na direção radial, por onde realizam o movimento contrário até que, novamente, sejam transportadas pelo parafuso helicoidal. Com a inserção das pastas ao sistema, esse movimento do material particulado pode ter sido prejudicado, levando a modificações na queda de pressão total do leito de jorro, principalmente quando utilizou-se o leite desnatado.

#### 4.5.2 Umidade relativa e absoluta em função do tempo

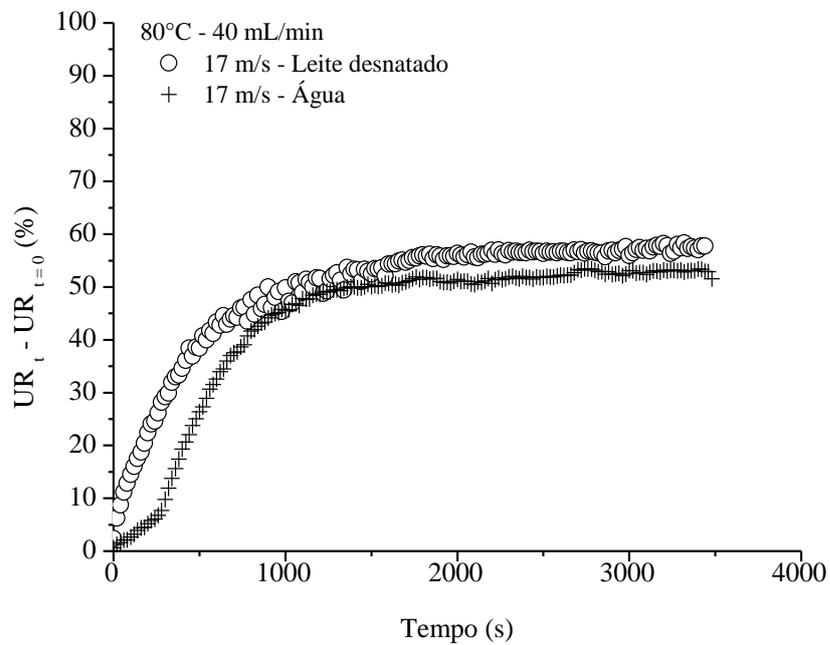
As Figuras 4.28 (a) a (d) apresentam os dados da umidade relativa do ar no regime transiente obtidos na saída do leito de jorro para a evaporação da água e a secagem do leite desnatado, parametrizadas na velocidade do ar de entrada do leito de jorro sob as temperaturas de 80°C (Figura 4.29 a e b) e de 100°C (Figuras 4.29 c e d). É válido nesse momento ressaltar que os ensaios de evaporação de água e secagem do leite desnatado foram realizados seguidamente um após o outro, assim, evitava-se ao máximo que condições externas interferissem no processo.

Analisando as curvas obtidas para os dois materiais pastosos apresentados nas Figuras 4.28 (a) a (d), verifica-se um comportamento bem definido para as curvas de umidade relativa referentes à água. Já para o leite desnatado acredita-se que sua presença prejudicou a circulação dos inertes. Com isso, a secagem provavelmente não ocorreu de forma adequada, o que poderia estar afetando também no transporte de massa para a corrente gasosa, resultando no comportamento observado para a umidade relativa, conforme nota-se para as condições de 09 m/s, 100°C e 20 mL/min (Figura 4.28c). Com exceção dessas condições operacionais, a umidade relativa apresenta comportamentos já esperados, o qual corresponde a uma elevação da umidade relativa do ar em função do tempo de secagem e das condições operacionais empregadas. Devido às transferências de calor e massa durante a secagem, a tendência é a umidade relativa alcançar um patamar máximo para cada condição avaliada.

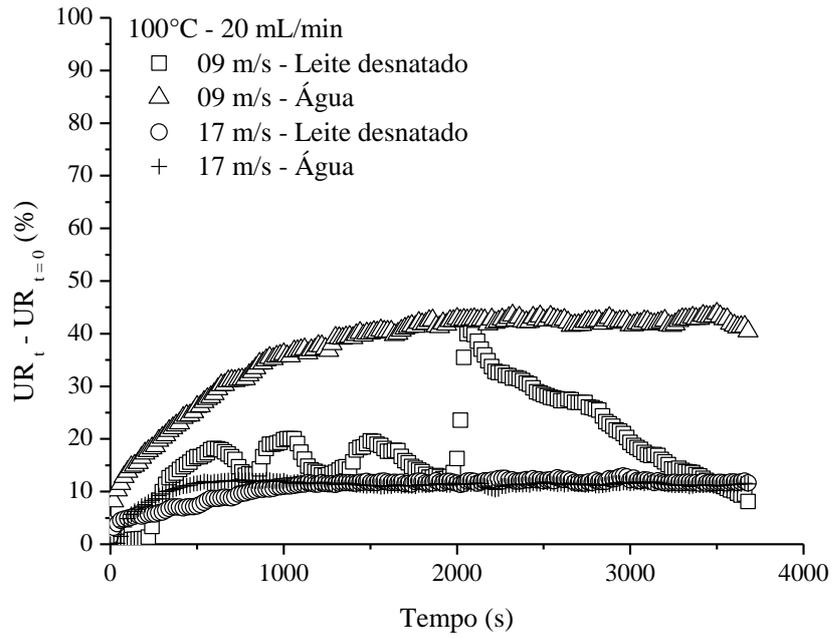
**Figura 4.28 - Umidade relativa do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico: (a) 80°C e 20 mL/min; (b) 80°C e 40 mL/min; (c) 100°C e 20 mL/min e (d) 100°C e 40 mL/min.**



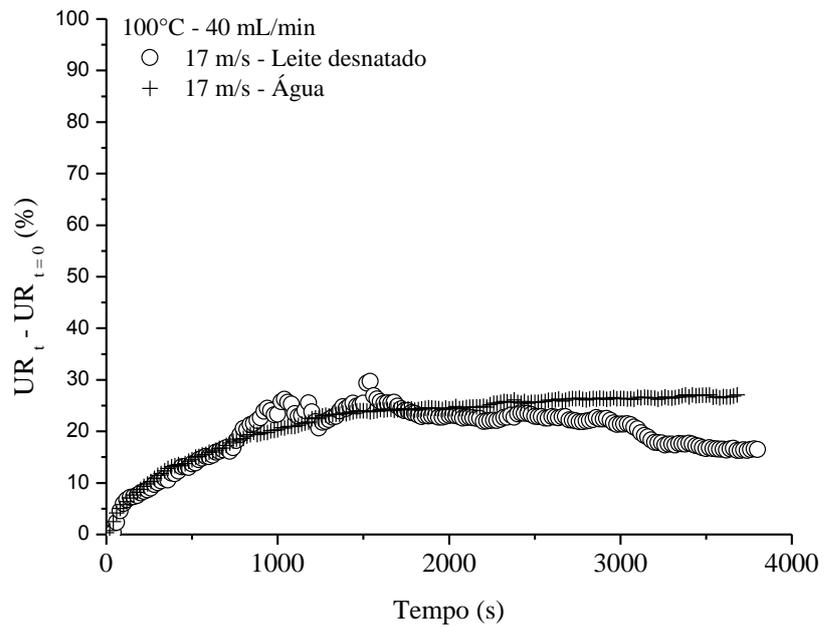
(a)



(b)



(c)



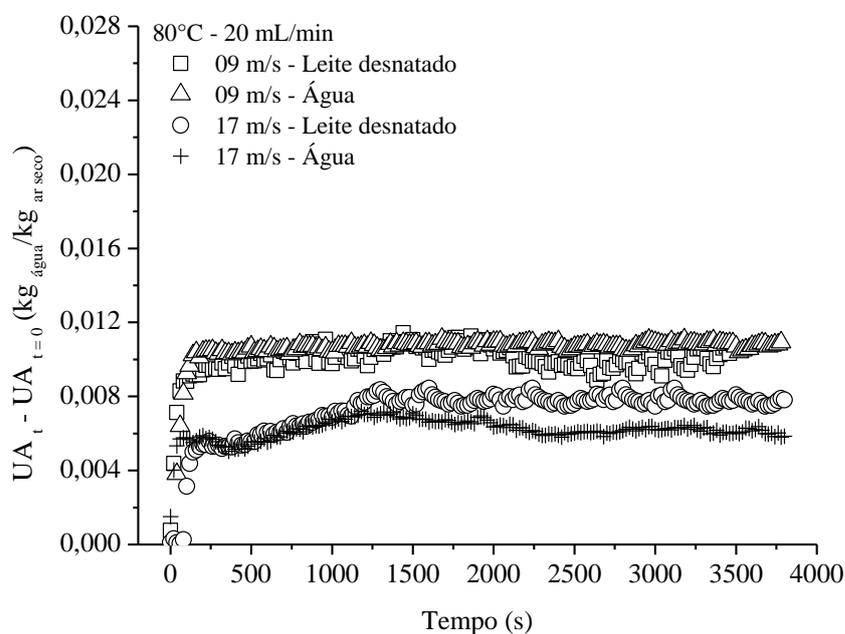
(d)

Fonte: elaborado pelo autor

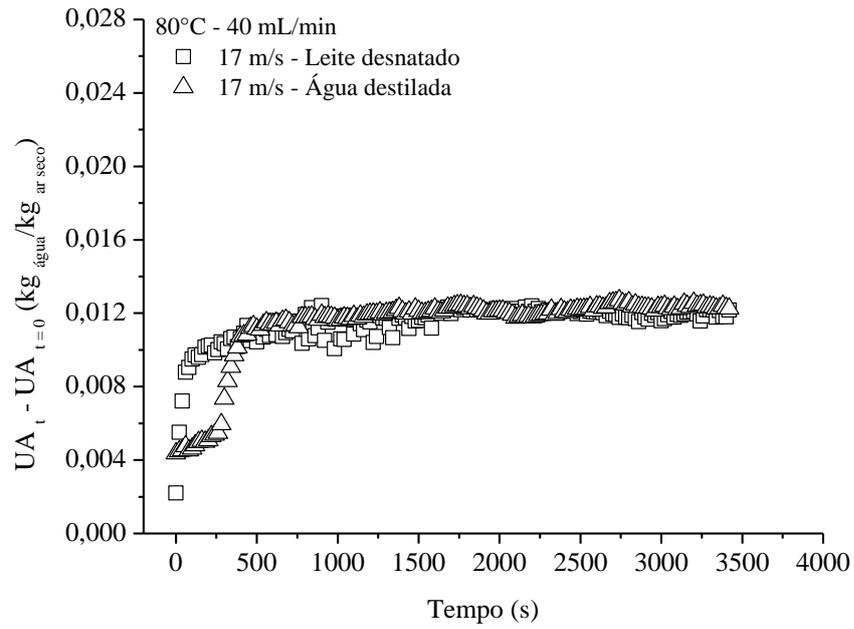
Em relação a vazão de pasta, temperatura e velocidade, observa-se que um aumento de qualquer uma dessas variáveis resultou em efeitos esperados. Como as condições operacionais empregadas na secagem do leite desnatado são as mesmas aplicadas anteriormente no item 4.4 para os experimentos de evaporação de água, os comportamentos observados são análogos e o que possivelmente influenciou na umidade relativa do ar pode estar relacionado com a circulação dos inertes no sentido de ter sido prejudicada em função das propriedades que compõe o leite desnatado. Desta forma, afim de evitar redundância das explicações e discussões dadas para o leite desnatado, toma-se como referência o que foi apresentado para a evaporação da água.

Para a umidade absoluta em função do tempo obtida na saída do leito de jorro mecânico, são apresentados os gráficos das Figuras 4.29 (a) a (d) com respeito às mesmas condições operacionais avaliadas anteriormente na umidade relativa do ar.

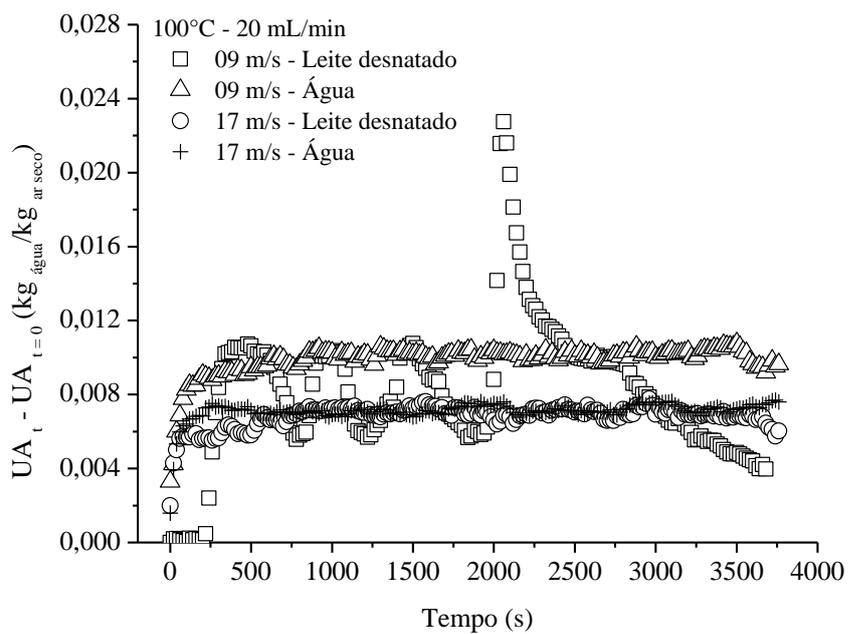
**Figura 4.29 - Umidade absoluta do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico: (a) 80°C e 20 mL/min; (b) 80°C e 40 mL/min; (c) 100°C e 20 mL/min e (d) 100°C e 40 mL/min.**



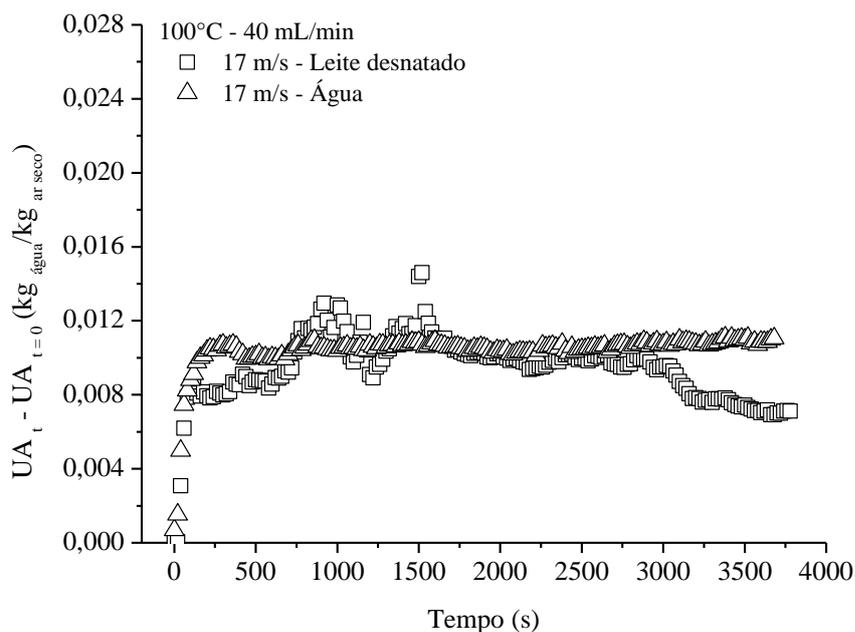
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fonte: elaborado pelo autor**

Os comportamentos observados nas Figuras 4.29 (a) a (d) já eram esperados, mostrando que os valores máximos de umidade absoluta são atingidos nos primeiros instantes iniciais do processo de secagem, em torno de 60 segundos. Após esse tempo, a umidade absoluta mantém-se praticamente constante até o final do ensaio experimental. Além disso, outro aspecto que também era esperado foi o fato da maior variação dos valores de umidade absoluta quando diminui a velocidade do ar na entrada. Com uma baixa velocidade, o contato entre a corrente aquecida e a fase líquida é maior que a elevadas velocidades, por consequência, a taxa de evaporação aumenta em função da quantidade de água transferida para a corrente gasosa, resultando em maiores valores da umidade absoluta do ar na saída do leito de jorro.

Tal como foi observado para a umidade relativa, oscilações da umidade absoluta foram identificadas para as mesmas condições operacionais, indicando que este comportamento pode estar relacionado com a transferência de massa envolvida durante a secagem.

Ao final do experimento o equipamento foi aberto para efetuar a limpeza e prepara-lo para os novos ensaios experimentais. A título de ilustração é apresentada na Figura 4.30 imagem do leito de jorro mecânico aberto após o experimento conduzido sob a

temperatura de 100°C, vazão de alimentação de pasta 20 mL/min e velocidade do ar de entrada 09 m/s.

**Figura 4.30 - Imagem da vista superior do leito de jorro mecânico após a secagem do leite desnatado**



**Fonte: elaborado pelo autor**

Após a abertura do leito de jorro, observou-se que as partículas inertes estavam aglomeradas e bastante endurecidas com formação de uma crosta pegajosa. Na superfície do leito particulado aglomerado foi possível observar a deposição de um material seco de coloração amarelado. Além disso, observou-se uma cavidade central de dimensões aproximadas do parafuso helicoidal, indicando que antes havia o canal de jorro. Possivelmente, partículas poderiam ter sido aglomeradas durante a secagem, prejudicando a circulação do leito particulado, que por sua vez, deve ter interferido na secagem da pasta, resultado nas variações bruscas observadas nos dados do adimensional de queda de pressão, e tanto na umidade relativa quanto na absoluta obtidos na saída do leito de jorro mecânico.

### 4.5.3 Umidade do pó

Na Tabela 4.7 são apresentados os dados obtidos da umidade do pó seco recolhido na saída do ciclone a cada intervalo de tempo predeterminado para o experimento de secagem. Foi possível coletar pó até o final do experimento, porém, nesta tabela serão apresentados apenas os valores da umidade durante 50 minutos e o valor médio para este tempo com seu respectivo desvio, excluindo-se as condições avaliadas que não foi possível recolher material na saída do ciclone.

**Tabela 4.7 - Umidade do pó de leite desnatado em função do tempo.**

Umidade do pó de leite desnatado em função do tempo							
Condição	Q (mL/min)	U <sub>bu</sub> (%)					$\overline{U}_{bu}$ (min)
		0 – 10 (min)	10 – 20 (min)	20 – 30 (min)	30 – 40 (min)	40 – 50 (min)	
80°C – 09 m/s	20	-	-	-	-	-	-
80°C – 17 m/s	20	26,99	22,39	24,27	20,16	21,76	22,39 ± 2,62
80°C – 17 m/s	40	-	-	-	-	-	-
100°C – 09 m/s	20	-	-	-	-	-	-
100°C – 17 m/s	20	15,50	12,84	11,86	11,48	11,81	11,86 ± 1,64
100°C – 09 m/s	40	-	-	-	-	-	-
100°C – 17 m/s	40	17,85	14,50	14,26	14,51	17,38	14,51 ± 1,76

**Fonte: elaborado pelo autor**

Para as condições em que foi possível coletar pó na saída do ciclone, observa-se na Tabela 4.7 que a umidade do pó longo do processo não sofreu aumento significativo, apresentando um baixo desvio em relação ao valor médio calculado após 50 minutos de secagem.

Um aumento tanto da vazão quanto da temperatura influenciou na umidade do pó. No caso da vazão de pasta, observa-se que ao aumentar essa variável de 20 para 40 mL/min para a temperatura de 100°C, a umidade também aumenta a partir de um valor médio de 11,86 % para 14,51 %. Baseando-se na explicação dada por Spitzner Neto (2001) que analisou a secagem do ovo homogeneizado no leito de jorro convencional, a espessura do

filme formado sobre a superfície da partícula inerte altera-se proporcionalmente em função da vazão de pasta sobre o leito particulado. O mesmo pode ter ocorrido no leito de jorro mecânico, em que o aumento da vazão de pasta resultou em um incremento da espessura do filme, por consequência, proporcionou uma maior umidade do pó recolhido na saída do ciclone.

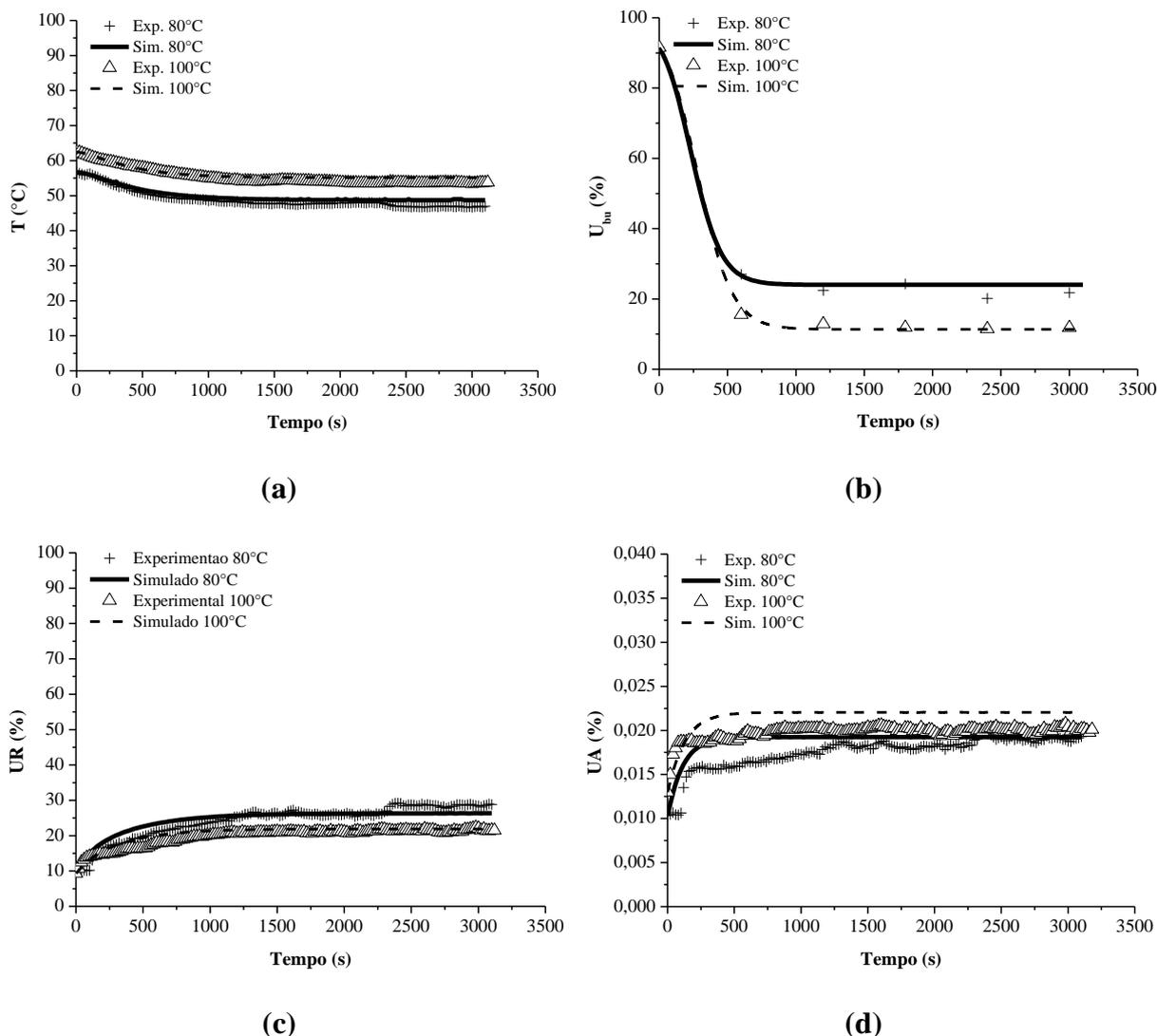
Com o aumento da temperatura de 80 para 100°C, mantendo-se a velocidade do ar de 17 m/s e vazão de pasta de 20 mL/min houve uma redução na umidade do pó recolhido na saída do ciclone devido ao maior fornecimento de energia na entrada do leito. Com isso, pode-se considerar que a medida que o filme de pasta foi sendo seco, foi se tornando quebradiço, mais friável, e a partir de uma certa friabilidade, ou certa umidade, desprende-se devido as colisões e começou a ser removido pela corrente gasosa. Porém, para a velocidade do ar de 09 m/s, nas duas temperaturas, não foi recolhido pó na saída do ciclone. Para essa condição, pode-se considerar que o arraste (elutriação) do material seco foi um fator determinante do processo, uma vez que, provavelmente a espessura aderida simplesmente continuou a crescer como num processo de revestimento de partículas, e neste caso levou ao acúmulo do material seco dentro do leito de jorro.

#### 4.5.4. Simulação da secagem do leite desnatado no leito de jorro mecânico - modelo *CST*

Conforme foi mencionado e apresentado no capítulo 2, foram realizadas simulações aplicando o modelo *CST* com o propósito de descrever o comportamento térmico e mássico do leito de jorro mecânico na secagem do leite desnatado. O sistema de equações diferenciais do modelo foi resolvido utilizando o *software* MatLab, utilizando a função *ode45*. Os valores dos parâmetros (*a* e *b*) do termo de acoplamento (*k*) e o coeficiente de convecção (*h*) foram ajustados por tentativa e erro até obter resultados preditos satisfatórios com os observados.

A Figura 4.31 apresenta os resultados preditos simulados pelo modelo *CST* comparados aos dados observados sob as condições operacionais de 80 e de 100°C à vazão de alimentação de pasta 20 mL/min e velocidade do ar de entrada de 17 m/s.

**Figura 4.31 - Dados preditos e observados para velocidade do ar 13 m/s:  
(a) temperatura do ar; (b) umidade do sólido em base úmida; (c) umidade relativa e  
(d) umidade absoluta.**



**Fonte: elaborado pelo autor**

O modelo foi capaz de descrever satisfatoriamente o comportamento obtido para as variáveis de saída do ar, como temperatura e umidade relativa. O mesmo pode-se dizer para a umidade do pó recolhido na saída do ciclone. As maiores variações entre os dados preditos e os observados foram observadas para a umidade absoluta na saída do leito de jorro.

Sobre os parâmetros do modelo, foram obtidos valores de  $a$  e  $b$ , respectivamente, 0,3025 e 0,0090 para a temperatura de 80°C e 0,3079 e 0,0090 para a temperatura de 100°C. Para o coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) a diferença foi maior, sendo 0,0025 J/s.cm<sup>2</sup> K para 80°C e 0,0035 J/s.cm<sup>2</sup> K para 100°C. Para esses dois últimos parâmetros o aumento faz sentido, tendo em vista que aumentou devido ao aumento do fornecimento de energia.

Tendo em vista que os dados preditos do modelo *CST* representaram bem os dados observados na secagem do leite desnatado, pode-se supor que o leite de jorro mecânico comporta-se como um tanque perfeitamente agitado, hipótese essa fundamental para o bom desempenho do modelo *CST*.

#### **4.6 Secagem de grãos de alumina no leito de jorro convencional e mecânico**

No item anterior, o desempenho do leite de jorro mecânico foi testado frente a secagem de materiais pastosos, desta vez essa configuração de equipamento terá novamente sua performance testada em relação a configuração convencional do leite de jorro, porém, na secagem de grãos de alumina. Para isso, foram obtidos dados de temperatura, umidade relativa do ar e umidade dos grãos. Por fim, os dados observados foram aproveitados na verificação do modelo difusivo a dois parâmetros.

A secagem dos grãos de alumina foi realizada utilizando as duas configurações de leite de jorro sob as condições de 80 e de 100°C, sendo que na configuração convencional a velocidade do ar utilizada foi 10% acima da velocidade de mínimo jorro. Para o leite de jorro mecânico, optou-se por manter fixa a rotação do parafuso helicoidal em 360 rpm e velocidade do ar de 09 e de 17 m/s. Cabe ressaltar que esses valores já foram empregados em experimentos fluidodinâmicos e de secagem de pastas, os quais permitiram trabalhar em uma condição de operação estável do equipamento.

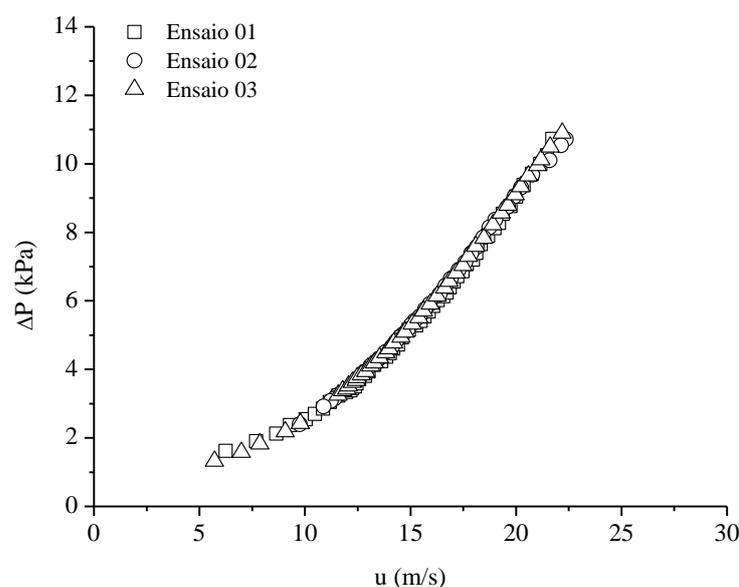
Para os grãos de alumina, antes dos experimentos de secagem, foi realizada a saturação dos grãos, conforme descrito no subitem 3.3.7 do capítulo 3. Optou-se utilizar os grãos de alumina com excesso de umidade, o que conferiu uma elevada umidade na superfície dos grãos e permitiu verificar tanto o desempenho dos leitos de jorro quanto a secagem dos grãos na condição de extrema umidade dos grãos.

Foi necessário realizar mudanças na estrutura do leite de jorro afim de adequar o equipamento ao procedimento experimental. Para isso foi instalado um coletor de partículas na região da base cônica e um alimentador tipo gravitacional. Contudo, somente a fluidodinâmica do leite de jorro convencional foi influenciada, portanto, realizou-se uma nova caracterização fluidodinâmica com o propósito de identificar novas condições de trabalho para realizar os experimentos de secagem dos grãos.

#### 4.6.1 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro convencional.

A Figura 4.32 apresenta os dados da queda de pressão em função da velocidade do ar sem a presença de partículas (teste em branco).

**Figura 4.32 - Queda de pressão em função da velocidade do ar na entrada sem a presença de partículas no leito de jorro convencional - Teste em branco.**

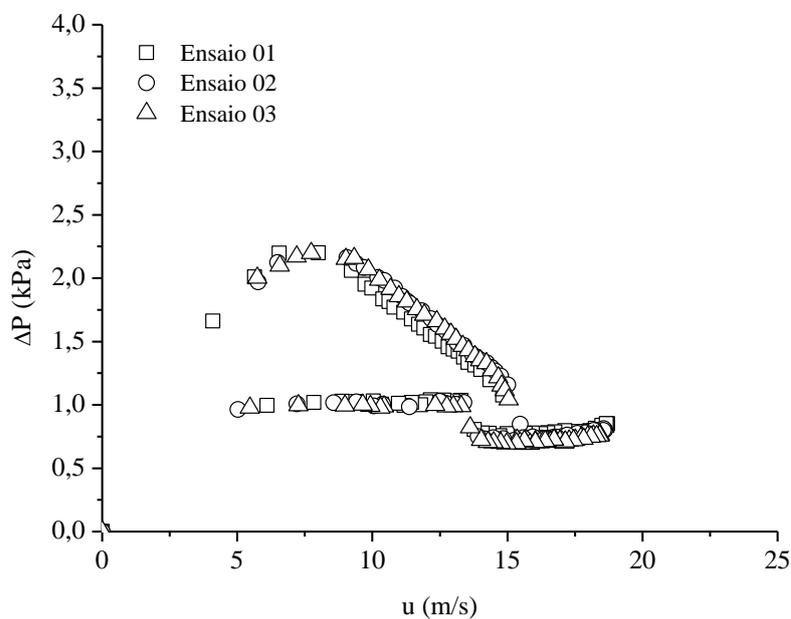


**Fonte: elaborado pelo autor**

O comportamento apresentado é similar ao que já foi apresentado anteriormente na Figura 4.2 do item 4.1.2, onde também são encontradas as discussões e explicações para o comportamento apresentado na Figura 4.32. Em seguida ajustou-se aos pontos experimentais obtidos das curvas apresentadas na Figura 4.32 a equação da função potência, a qual forneceu o coeficiente de correlação ( $R^2$ ), bem como os parâmetros de ajuste  $a$  e  $b$ . O valor para ( $R^2$ ) foi 0,999 e os valores de  $a$  e  $b$ , referentes a equação da função potência foram, respectivamente, 0,0338 e 1,8642.

Sendo assim, auxiliado pela função potência, a queda de pressão total da mistura fluido-partícula foi subtraída da queda de pressão do leito de jorro sem partículas, com a finalidade de obter apenas a perda de carga das partículas em função da velocidade do ar, conforme mostra a Figura 4.33. Para esse experimento foi empregado 4 kg de partículas de alumina.

**Figura 4. 33 – Queda de pressão do leito particulado em função da velocidade de ar na entrada do leito de jorro convencional (Curva característica)**



**Fonte: elaborado pelo autor**

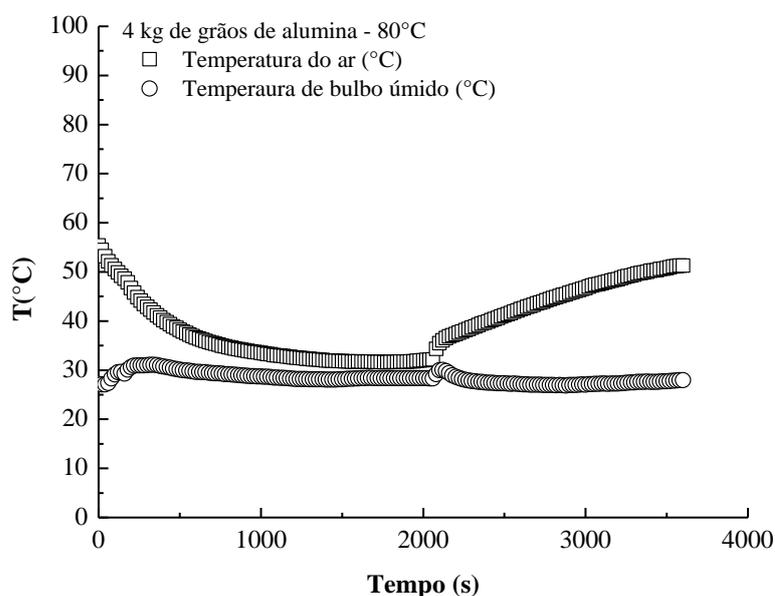
Diante dos dados apresentados para a queda de pressão em função da velocidade do ar para as partículas secas, determinou-se a velocidade do ar de trabalho usada na secagem dos grãos. Como foram realizados experimentos em triplicada, o valor médio que corresponde a velocidade de mínimo jorro foi de 14,60 m/s. A partir desse valor, admitiu-se empregar em todos os experimentos de secagem a condição de 10% acima do valor encontrado para a velocidade de mínimo jorro. Uma vez estabelecido a condição operacional, o estudo apresentando nesse item dará continuidade com a apresentação dos dados de temperatura do ar, umidade relativa e absoluta, encerrando com a umidade dos grãos de alumina. Com exceção da umidade da fase particulada, os demais dados foram obtidos nas saídas das duas configurações de leito de jorro.

#### 4.6.2 Temperatura do ar de saída

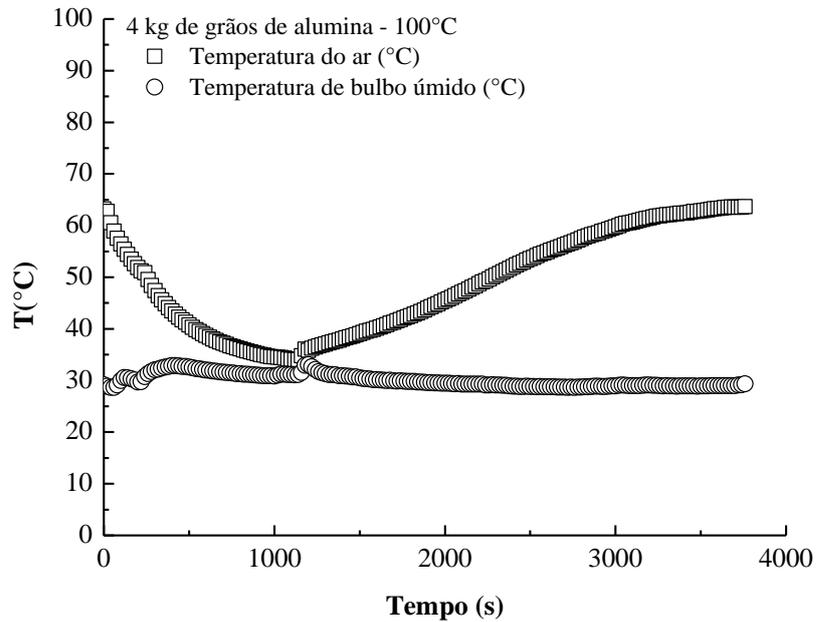
As Figuras 4.34 e 4.35 apresentam os dados obtidos para a temperatura do ar de saída em função do tempo para as duas configurações de leito de jorro. A Figura 4.34 refere-se ao leito de jorro convencional trabalhando sob as condições estabelecidas de temperatura do ar de entrada (80 e 100°C) e a velocidade na condição de 1,10  $u_{mj}$ . Na Figura 4.35 são apresentados os dados para o leito de jorro mecânico sob as condições mantidas fixas como a temperatura do ar de entrada (80 e 100°C), a velocidade do ar de entrada (09 e 17 m/s) e a rotação do parafuso helicoidal (360 rpm).

Como era esperado para os dois leitos de jorro, a temperatura decresce até próximo da condição de saturação do ar (temperatura de bulbo úmido) devido o fornecimento de energia térmica da fase gasosa para a superfície das partículas, principalmente no início do experimento, quando estão recobertas com água em excesso. Em seguida ocorre o comportamento inverso, isto é, a temperatura eleva-se até alcançar um patamar em que ocorre variação em torno de um valor médio, caracterizando o início do regime permanente. Nessa condição, a temperatura alcançada é praticamente a mesma do início da secagem, indicando que toda a energia fornecida ao sistema, no regime permanente, serviu para entrar em equilíbrio com a temperatura do grão a um baixo conteúdo de umidade.

**Figura 4.34 - Temperatura do ar em função do tempo na saída do leito de jorro convencional. (a) 80°C e (b) 100°C**



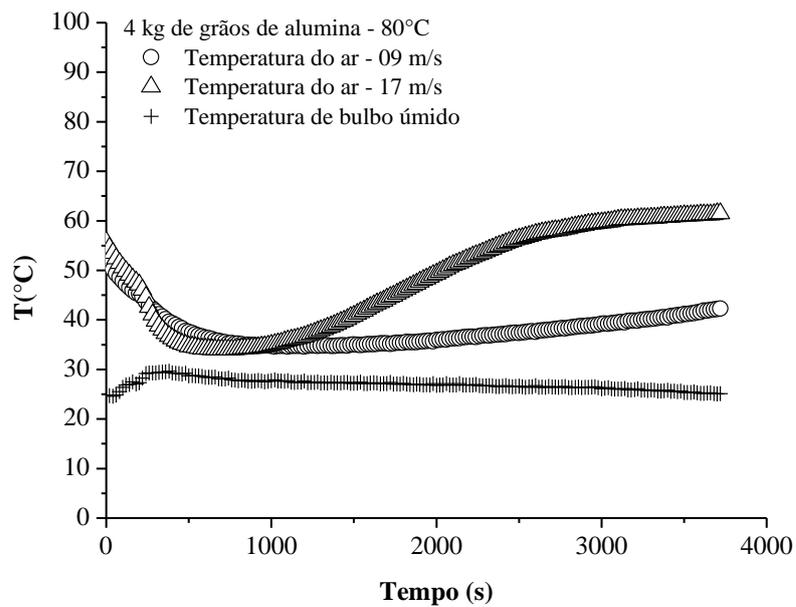
(a)



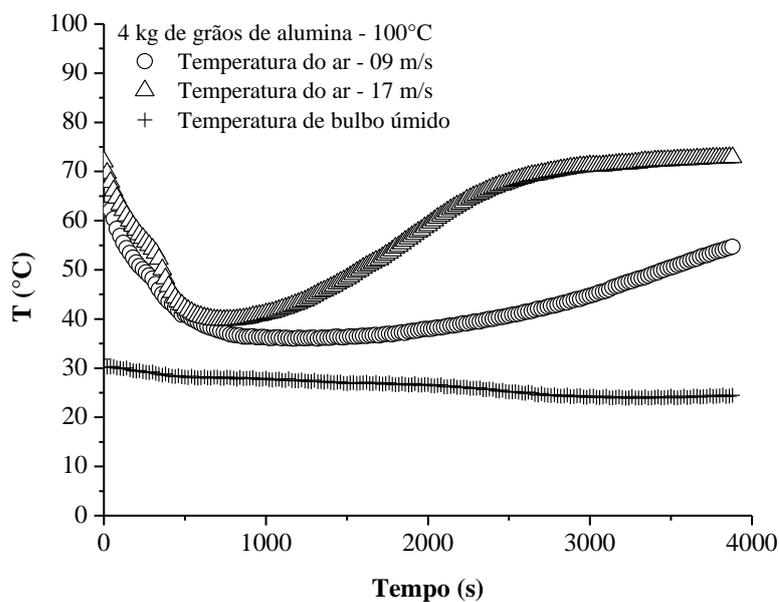
(b)

Fonte: elaborado pelo autor

**Figura 4.35 - Temperatura do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico: (a) 80°C e (b) 100°C**



(a)



(b)

**Fonte: elaborado pelo autor**

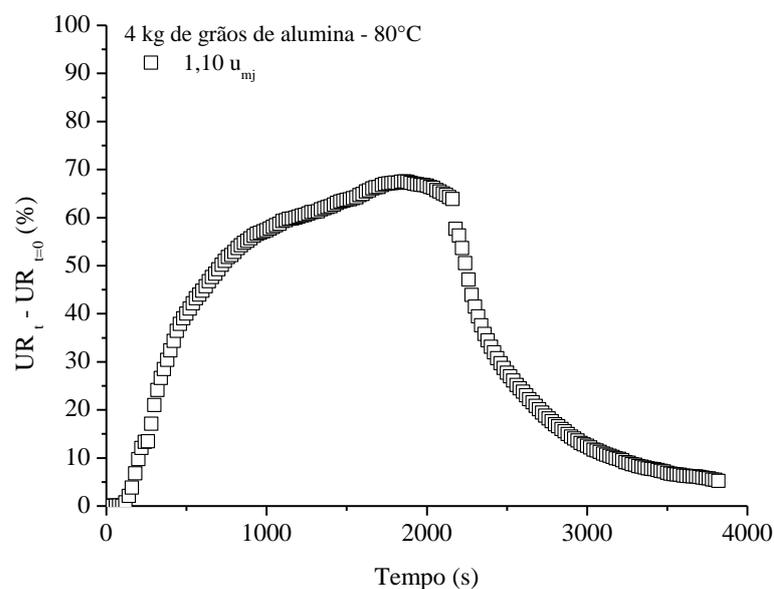
Mesmo apresentando comportamentos semelhantes para a temperatura do ar de saída, as duas configurações de leito de jorro atuaram diferentemente no sentido de realizar a secagem dos grãos. No leito de jorro mecânico, a circulação das partículas é promovida pelo parafuso helicoidal desde o início do experimento, o que contribui no sentido de facilitar a troca térmica entre a corrente de ar aquecida e o material úmido. No leito de jorro convencional, não houve circulação das partículas por um determinado período de tempo, levando a atuar em condições de leito fixo. Isto porque a vazão de ar não foi suficiente para promover a expansão do leito particulado úmido. Desta forma, pode-se dizer que houve um período de secagem onde foram observados comportamentos de leito fixo e leito de jorro, os quais influenciaram no sentido de tornar a troca térmica mais lenta que no leito de jorro mecânico.

Em relação as condições operacionais empregadas nos experimentos das duas configurações, as Figuras 4.34 e 4.35 apresentam comportamentos já esperados, visto que ao fornecer uma maior quantidade de energia ao sistema, a temperatura do ar de saída do leito de jorro alcança o regime permanente mais rápido. Da mesma forma que foi visto somente para o leito de jorro mecânico em relação a velocidade do ar, um incremento dessa variável proporcionou que a temperatura do ar de saída também alcançasse mais rapidamente o regime permanente.

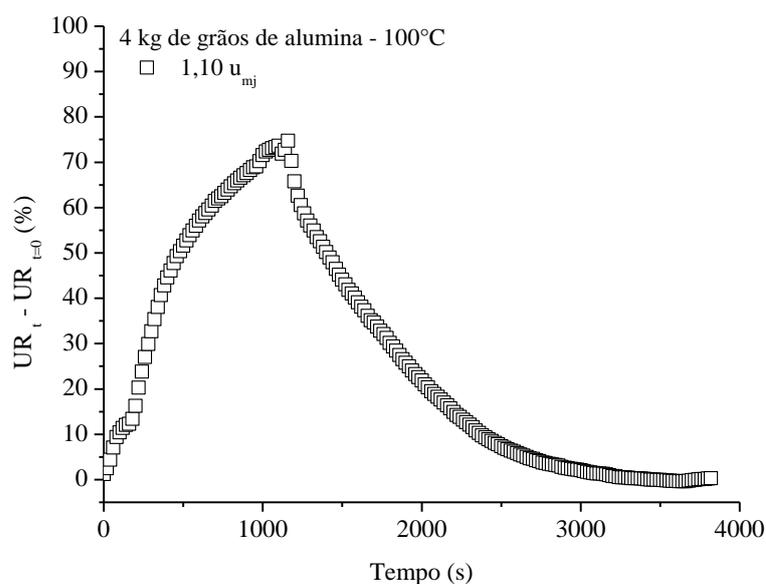
### 4.6.3 Umidade relativa do ar de saída

As Figuras 4.36 e 4.37 apresentam os dados da umidade relativa em função do tempo para as duas configurações de leito de jorro, sob as mesmas condições operacionais empregadas para os dados de temperatura apresentados na seção anterior.

**Figura 4.36 - Umidade relativa do ar em função do tempo na saída do leito de jorro convencional. (a) 80°C e (b) 100°C**



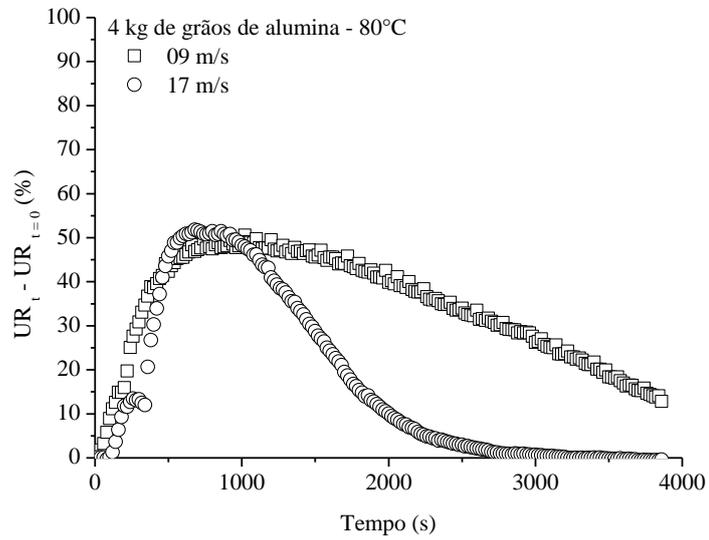
(a)



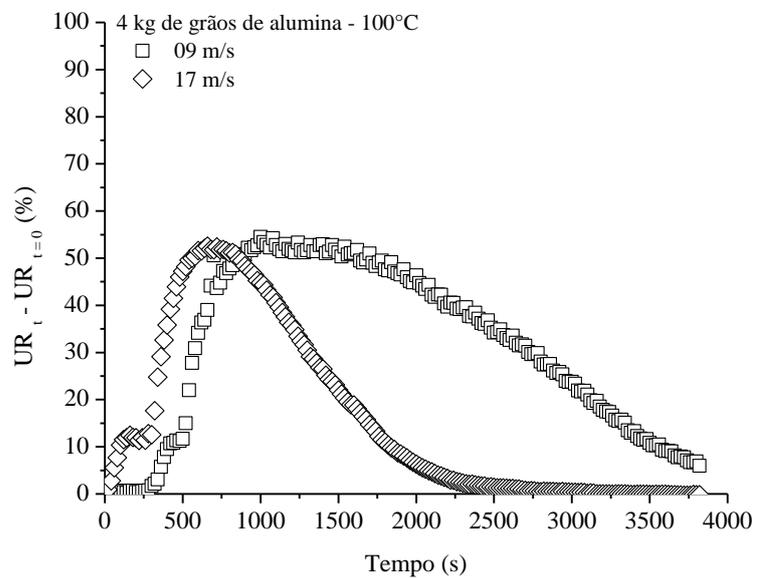
(a)

Fonte: elaborado pelo autor

**Figura 4.37 - Umidade relativa do ar em função do tempo na saída do leito de jorro mecânico. (a) 80°C e (b) 100°C.**



**(a)**



**(b)**

**Fonte: elaborado pelo autor**

Observa-se nas Figuras 4.36 e 4.37 que a umidade relativa aumenta em função do tempo de secagem até alcançar um valor máximo. Depois de alcançado, reduz significativamente. Isto ocorre porque no início do experimento, quando a umidade sobre a superfície das partículas está em excesso, a umidade relativa eleva-se até alcançar uma condição máxima. À medida que prossegue a secagem, a água na fase vapor passa a ser cada vez menos transferida da superfície dos grãos para a corrente de ar, resultando na redução da umidade relativa após alcançar o valor máximo. O processo é encerrado quando os grãos atingem o baixo nível de umidade e a taxa de evaporação tende a zero.

Para o leito de jorro convencional, o fato de ter sido realizada uma secagem entre o leito fixo e o leito de jorro influenciou também no comportamento da umidade relativa, conforme mostram os gráficos das Figuras 4.36 (a) e (b). Nesse leito de jorro, o comportamento observado foi semelhante para as duas temperaturas empregadas nos experimentos, contudo, o valor máximo de umidade relativa foi atingido em menor tempo para a maior temperatura (100°C). Já para o leito de jorro mecânico, é possível observar nos gráficos das Figuras 4.37 (a) e (b) um comportamento mais pronunciado da umidade relativa ao longo do tempo. Em relação as condições operacionais empregadas nesse leito de jorro, pôde-se constatar que o aumento da temperatura possibilitou que o maior valor para a umidade relativa fosse alcançado em menor tempo. No caso da velocidade, o mesmo foi verificado ao trabalhar sob a condição maior (17 m/s).

#### 4.6.4 Umidade dos grãos de alumina

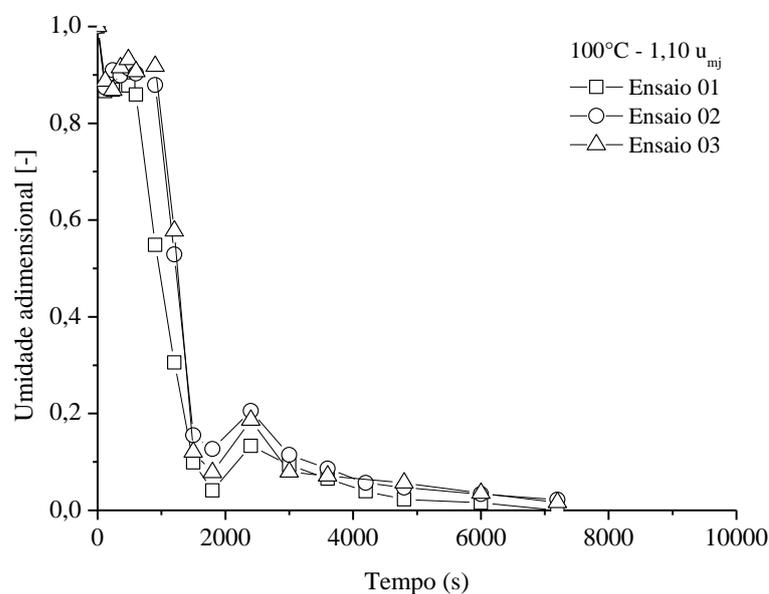
As curvas de umidade dos grãos de alumina foi representada pela umidade adimensional ( $X^*$ ) em função do tempo (t) conforme mostra a Equação 4.1.

$$X^*(t) = \frac{\overline{X}_t - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (4.1)$$

A Figura 4.38 apresenta os gráficos do adimensional de umidade em função do tempo na temperatura de 100°C e velocidade do ar na condição de 1,10  $u_{mj}$  para três repetições de experimentos realizados no leito de jorro convencional. Através desses gráficos é possível observar uma boa reprodutibilidade dos dados experimentais, face aos pequenos desvios encontrados nos valores das repetições efetuadas, possibilitando considerar que estão dentro da faixa do erro experimental.

As curvas apresentaram comportamentos similares nas condições avaliadas, contudo, são atípicos da secagem em grãos em secador convectivo. Nota-se que não existe variação significativa da umidade até aproximadamente 18 minutos, o que pode ser justificado pelo excesso de água presente no leito particulado nesse período de tempo. Depois que esse tempo é alcançado, verifica-se que a umidade decresce continuamente ao longo do tempo, indicando a presença do fenômeno de transferência de massa entre a fase vapor e a corrente de ar. O término do processo é atingido quando surge um patamar de umidade constante, resultado do equilíbrio entre um baixo conteúdo água contida no material e a umidade relativa do ar. Nitidamente, verifica-se a existência de uma variação ou oscilação acentuada da umidade em torno de 40 minutos de secagem. Nesse tempo de secagem o jorro expandiu-se e a velocidade do ar passou a aumentar gradativamente à medida que o material particulado estava sendo seco. Essa variação está relacionada com o fato de ter alternado entre o leito fixo e leito de jorro, influenciando na secagem dos grãos.

**Figura 4.38 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro convencional:  $u_{mj}$  1,10.**



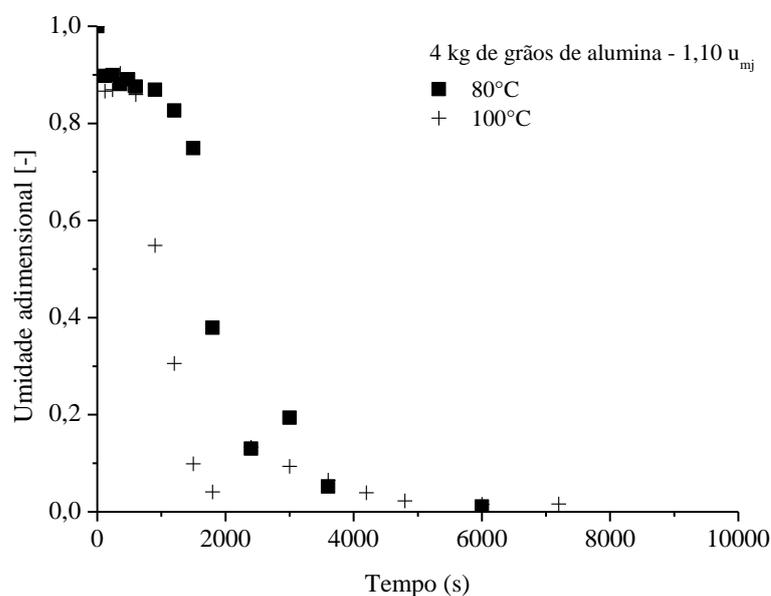
**Fonte: elaborado pelo autor**

Constatado que os experimentos foram reprodutíveis, verificou-se a influência da temperatura no processo de secagem dos grãos no leito de jorro convencional, mantendo-se constante a velocidade do ar em 1,10  $u_{mj}$  e empregando duas temperaturas na corrente gasosa,

sendo estas 80 e 100°C, como apresenta a Figura 4.39.

O comportamento observado se repete também para diferentes temperaturas do ar de entrada como mostra a Figura 4.39. Observa-se que a umidade adimensional decresce após os 18 minutos de secagem até alcançaram o equilíbrio. Fica claro ao observar que a maior variação do adimensional de umidade deve-se a maior temperatura da fase gasosa. Nota-se também que a oscilação observada em função do modo de trabalho do leito de jorro convencional depende da temperatura, uma vez que para 100°C essa oscilação ocorreu por volta de 40 minutos, enquanto que para a temperatura de 80°C esse comportamento foi visto aos 50 minutos. Isto está relacionado com o fornecimento de energia térmica transferida do ar para o sólido, a qual foi maior quando trabalhou-se com maior temperatura, e por consequência, proporcionou uma maior transferência de umidade nele contida para a corrente de ar.

**Figura 4.39 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro convencional para 80 e 100°C.**

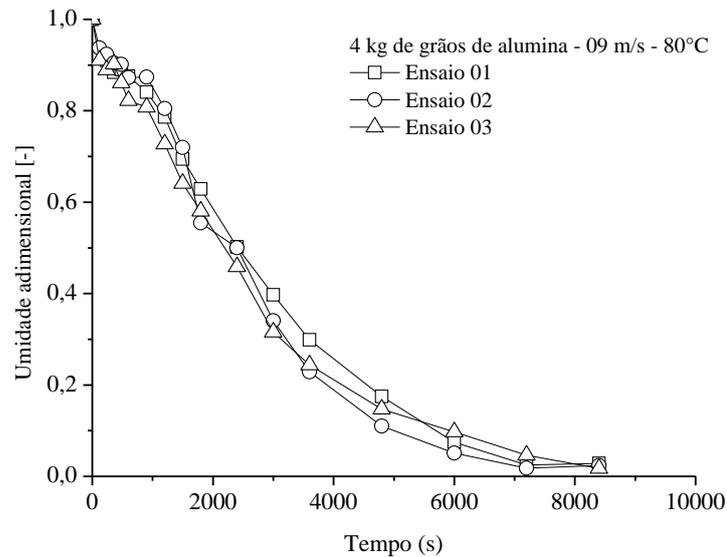


**Fonte: elaborado pelo autor**

As Figuras 4.40 e 4.41 apresentam os gráficos de umidade adimensional em função do tempo para três repetições no leito de jorro mecânico, mantendo-se fixa a rotação do parafuso helicoidal em 360 rpm, sob a condição de temperatura 80 e 100°C, velocidade do ar 09 e 17 m/s. Pelo fato de ser o primeiro estudo realizado nessa configuração de leito de jorro, sentiu-se a necessidade de repetir os experimentos para as condições experimentais

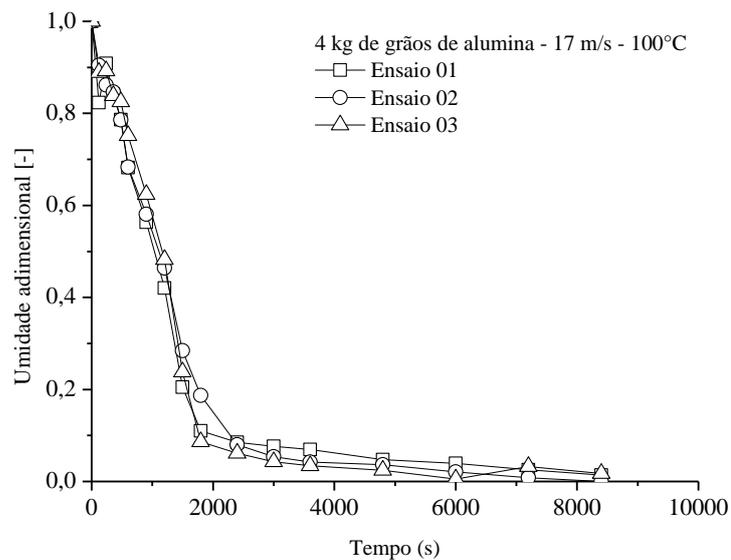
empregadas, ao invés de apenas uma como foi feito no leito de jorro convencional.

**Figura 4.40 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro mecânico sob às condições de 80°C e 09 m/s.**



**Fonte: elaborado pelo autor**

**Figura 4.41 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro mecânico sob às condições de 100°C e 17 m/s.**



**Fonte: elaborado pelo autor**

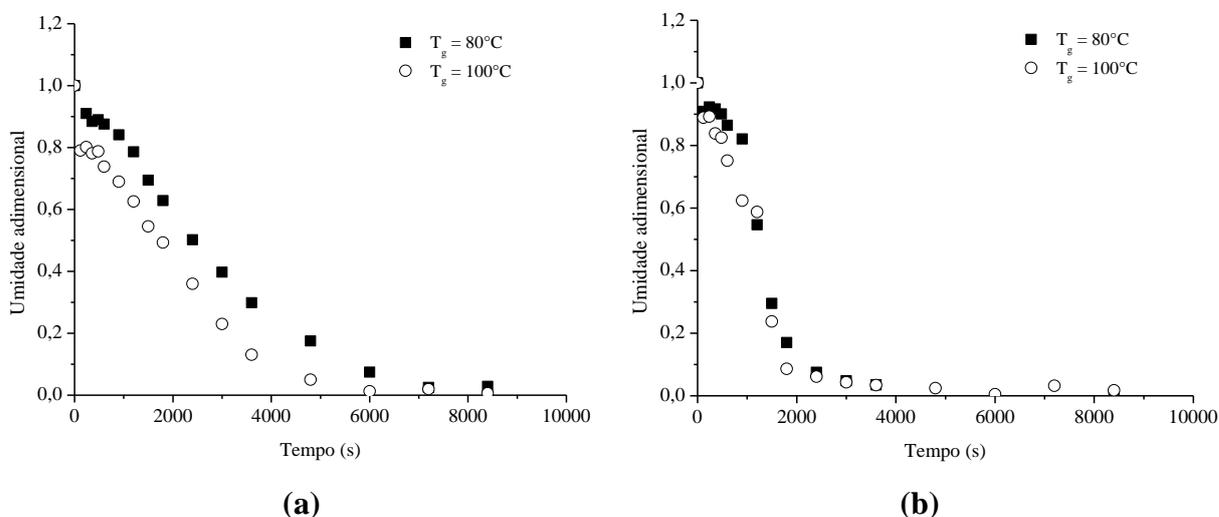
Dentro das condições avaliadas, pode-se constatar que os experimentos foram reprodutíveis, tendo em vista que os desvios observados podem ser desconsiderados devido à proximidade dos dados do adimensional de umidade. Portanto, considera-se que os pequenos desvios encontrados nos resultados estão dentro da faixa de erro experimental e comprovam a metodologia experimental usada.

Nas curvas apresentadas nas Figuras 4.40 e 4.41 nota-se que a umidade presente no material particulado decresce continuamente ao longo do tempo, indicando a presença do fenômeno de transferência de massa entre a fase vapor e a corrente de ar. O término do processo é atingido quando surge um patamar de umidade constante, resultado do equilíbrio entre um baixo conteúdo de água contida no material e a umidade relativa do ar. Fato este que concorda com a teoria de secagem, conforme apresenta Strumillo e Kudra (1986).

Os resultados observados nas Figuras 4.40 e 4.41 apresentam comportamentos semelhantes com trabalhos realizados em diferentes tipos de secadores (leito fixo e móveis) e/ou materiais de diferentes características físicas e químicas (BRUNELLO et al., 1974; LIMA e ROCHA, 1997; VITOR E MASSARANI, (1997); KUNDU et al., 2001; OLIVEIRA JUNIOR, 2003; CALÇADA et al., 2006; PASSOS et al., 2007; MAGALHÃES e PINHO, 2008; MARKOWSKKI et al., 2010; RADUNZ et al, 2010; PERAZINNI, 2014; REIS, 2015; CHIELLE et al., 2015), dentre muitos outros que podem ser encontrados na literatura.

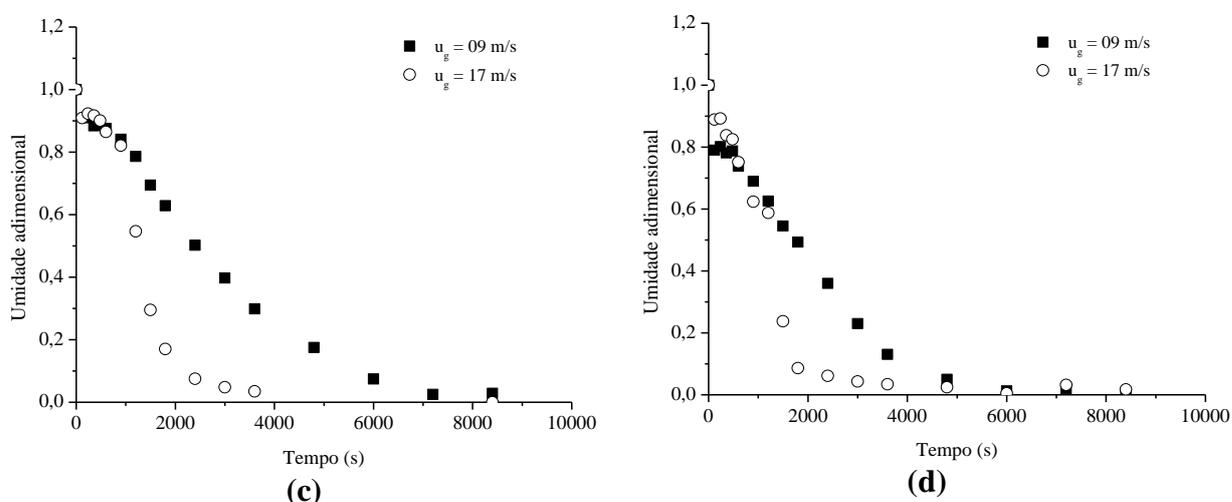
Os efeitos das variáveis operacionais sobre a umidade dos grãos de alumina obtidos do leito de jorro mecânico são visivelmente evidentes, conforme podem ser observados nas Figuras 4.42 e 4.43. No que diz respeito ao efeito da temperatura do ar de entrada, mantendo-se fixa a velocidade do ar em 09 m/s (Figura 4.42a), o aumento de temperatura facilitou a evaporação da água na superfície das partículas, uma vez proporcionada pelo incremento na transferência de energia térmica fornecida às partículas úmidas. Comportamento semelhante foi observado anteriormente para o leito de jorro convencional. Entretanto, ao trabalhar com a velocidade do ar mais elevada (17 m/s), o aumento da temperatura de 80 para 100°C não influenciou no adimensional de umidade, mostrando curvas coincidentes durante a secagem. Para esta situação em que não há distinção entre os adimensionais de umidade na velocidade do ar de 17 m/s, um incremento no fornecimento de energia significa elevar o custo energético do processo.

**Figura 4.42 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro mecânico: (a)  $u = 09$  m/s e (b)  $u = 17$  m/s.**



Fonte: elaborado pelo autor

**Figura 4.43 - Umidade adimensional da alumina em função do tempo obtida no leito de jorro mecânico: (a)  $80^{\circ}\text{C}$  e (b)  $100^{\circ}\text{C}$ .**



Fonte: elaborado pelo autor

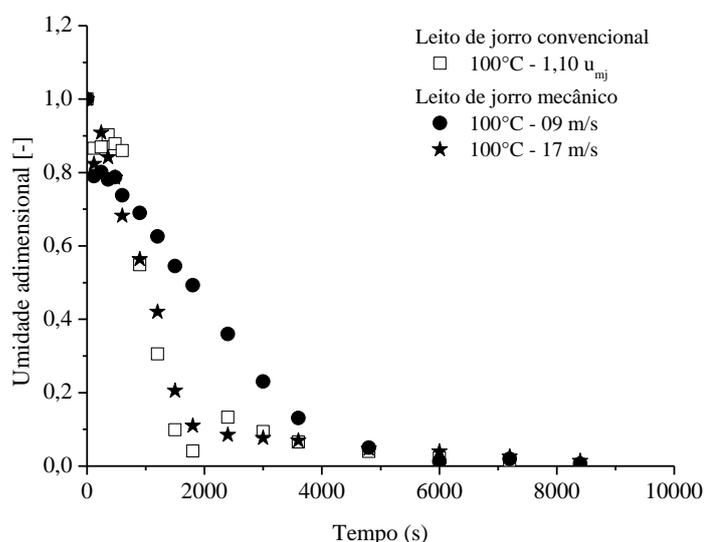
Assim como a temperatura, a velocidade do ar também exerceu influência na secagem dos grãos de alumina para as temperaturas do ar de entrada avaliadas. Nota-se nas Figuras 4.43 (a) e (b) que, com o aumento da velocidade do ar, a umidade adimensional e o tempo para alcançar o equilíbrio são reduzidos significativamente. Este fato pode ser explicado pela teoria da camada limite e a transferência de vapor da superfície das partículas úmidas para a corrente gasosa aquecida. Um aumento da velocidade proporciona a redução da espessura da camada limite, por consequência, a resistência externa à transferência de calor e

massa também torna-se menor. Desta forma, com uma resistência menor, o transporte de vapor da interface líquido-gás aumenta, resultando em uma secagem mais rápida e maiores variações do adimensional de umidade, conforme foi observado através dos gráficos apresentados nas Figuras 4.43 (a) e (b). Nessas figuras é possível notar também que aumentando o fornecimento de energia para as duas velocidades testadas, a transferência de massa aumenta e uma secagem ainda mais rápida pode ser conseguida, o que já era esperado.

#### 4.6.5 Avaliação do leito de jorro convencional e mecânico na secagem dos grãos de alumina.

Para avaliar a performance do leito de jorro mecânico na secagem dos grãos de alumina, buscou-se verificar os dados dos adimensionais de umidade em função do tempo para a temperatura do ar de 100°C para as duas configurações de leito de jorro, conforme apresenta a Figura 4.44. No que se refere ao leito de jorro mecânico, a velocidade do ar utilizada para realizar a comparação foi de 09 e 17 m/s, enquanto no leito de jorro convencional, manteve-se a estabelecida desde o início da secagem, que foi de 1,10  $u_{mj}$ .

**Figura 4.44 - Adimensional de umidade da alumina em função do tempo para o leito de jorro convencional e mecânico.**



**Fonte: elaborado pelo autor**

Comparando-se a curva do adimensional de umidade do leito de jorro convencional com a curva obtida para o leito de jorro mecânico referente a velocidade do ar

de 17 m/s, observa-se que as curvas são praticamente coincidentes, sendo a diferença mínima, impossibilitando indicar o secador mais adequado. Contudo, esperava-se que o leito de jorro mecânico trabalhando com a velocidade mais baixa (9 m/s) proporcionasse uma secagem mais eficiente, correspondendo à níveis de umidade dos grãos mais próximos dos que foram obtidos para a condição mais elevada de velocidade do ar de entrada (17 m/s). Considerando as condições avaliadas, o leito de jorro mecânico apresentou desempenho semelhante com o leito de jorro convencional quando aplica-se a velocidade do ar de 17 m/s.

Os dados experimentais referentes aos dados dos adimensionais de umidade dos grãos de alumina apresentados anteriormente nas Figuras 4.42 e 4.43 foram utilizados para testar o modelo difusivo a dois parâmetros no leito de jorro mecânico.

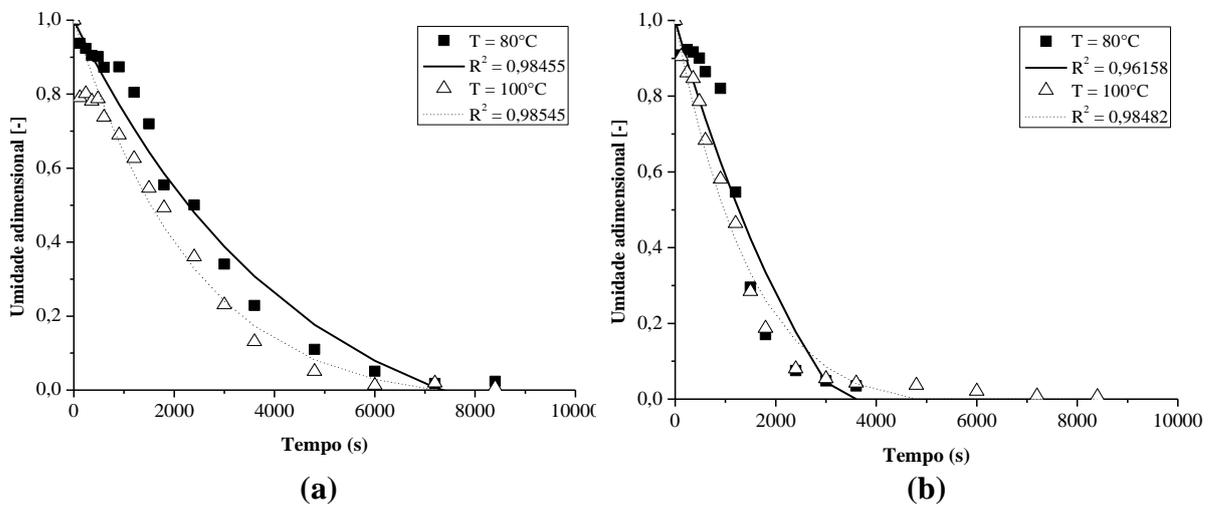
#### 4.6.6 Simulação do modelo difusivo a dois parâmetros

A simulação do modelo difusivo apresentado no capítulo 3 desse trabalho de pesquisa foi realizada considerando os dados experimentais obtidos do leito de jorro mecânico sob às condições de quantidade de partículas de 4 kg, temperaturas do ar de entrada de 80 e 100°C, como também velocidade do ar 09 e 17 m/s. A série infinita do modelo (Equação 3.17) foi resolvida em uma rotina computacional desenvolvida no software MatLab®, modelo R2007b ao mesmo tempo em que os parâmetros do modelo difusivo foram estimados com base no critério dos mínimos quadrados.

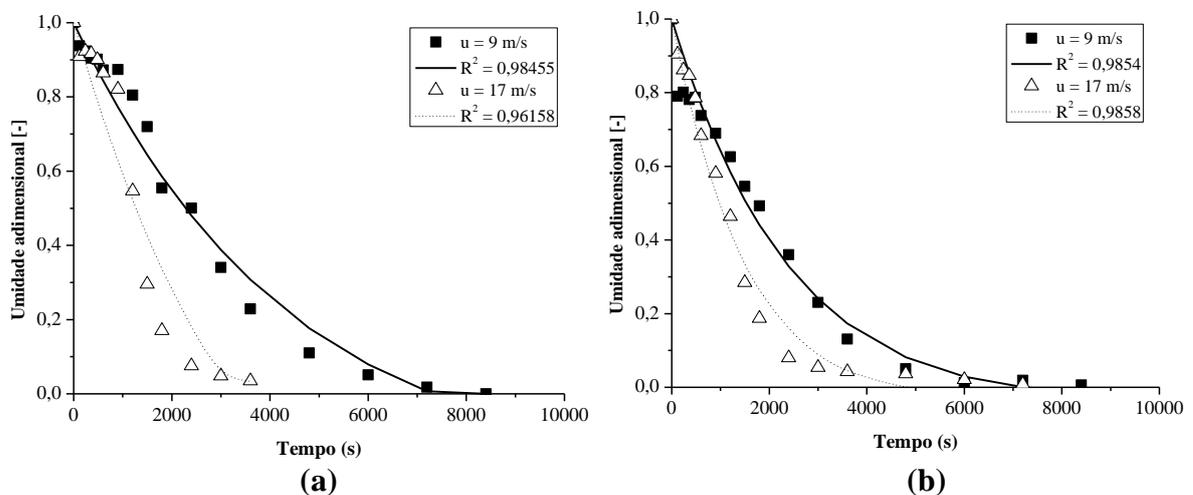
Nas Figuras 4.45 e 4.46 são apresentadas as comparações entre os dados observados e os preditos pelo modelo difusivo considerando os dez primeiros termos da série. Ao analisar os resultados apresentados verifica-se que existem desvios significativos entre os dados experimentais e os preditos pelo modelo. Em princípio, poderia-se supor que os desvios observados estariam relacionados com o número de termos empregados, uma vez que poderia ser dado como insuficiente para propor melhores ajustes aos dados do experimento. Testes preliminares foram realizados para maiores números de termos, porém apresentaram desvios maiores dos que foram observados quando utilizou-se os dez primeiros termos. Essa quantidade não aparenta ser pouca, tendo em vista que Perazzini et al. (2014) observou que com apenas 16 termos os dados de umidade foram melhor simulados para a secagem de alumina em um leito de jorro vibro fluidizado. Descartando a possibilidade da quantidade de termos usada, acredita-se que os desvios estão relacionados com o número de pontos agrupados no instante inicial da secagem devido a umidade em excesso, bem como o procedimento experimental adotado. Analisando do ponto de vista de aplicação, pode-se dizer

que, apesar dos desvios observados, os dados preditos apresentaram comportamentos que concordam qualitativamente com trabalhos da literatura. Cabe ressaltar que esse modelo deve ser aplicado em mais estudos da secagem de materiais granulares, bem como para uma gama de condições operacionais, visto que um simples parâmetro de ajuste ( $\gamma$ ) adicionado na condição de contorno, pode proporcionar bons ajustes e valores estimados de consistência física frente a outros modelos difusivos.

**Figura 4.45 - Dados observados e preditos de umidade dos grãos em função do tempo obtidos da secagem no leito de jorro mecânico: (a) 09 m/s - (b) 17 m/s.**



**Figura 4.46 - Dados observados e preditos de umidade dos grãos em função do tempo obtidos da secagem no leito de jorro mecânico: (a) 80°C - (b) 100°C.**



Fonte: elaborado pelo autor

As simulações permitiram estimar os parâmetros dos modelos para cada experimento realizado, bem como os coeficientes de correlação. Nesse sentido, afim de analisa-los, construiu-se a Tabela 4.9.

**Tabela 4.8 - Coeficientes de difusão efetiva,  $R^2$  e  $\gamma$  estimados do modelo difusivo**

T°C	80		100	
	09	17	09	17
$D_{\text{eff}} \text{ (m}^2\text{s}^{-1})$	$2,61 \times 10^{-13}$	$8,93 \times 10^{-13}$	$7,23 \times 10^{-13}$	$1,16 \times 10^{-12}$
$R^2 \text{ (-)}$	0,98	0,96	0,98	0,98
$\gamma \text{ (-)}$	0,02	0,03	0,02	0,03

**Fonte: elaborado pelo autor**

Analisando o parâmetro  $\lambda$  estimado, observa-se que os valores apresentados na Tabela 4.8 foram coerentes do ponto de vista matemático, uma vez que a condição de contorno na superfície das partículas úmidas, representada pela Equação 3.18, possui um termo exponencial que não pode ser nulo, justamente, para garantir que a concentração de água na forma líquida sobre a superfície da partícula seja sempre maior que no estado de equilíbrio. Quanto ao coeficiente de correlação, a grande maioria foi superior a 0,98, exceto para condição de 80°C e 17 m/s, o que pode ser explicado pela quantidade de dados observados utilizados na simulação. Ainda assim, os valores de  $R^2$  deveriam ser maiores 0,98 afim de contribuir para justificar um bom ajuste dos dados preditos aos observados.

Em relação aos coeficientes de difusividade efetiva apresentados na Tabela 4.9, observa-se que os valores aumentam tanto com a temperatura quanto com a velocidade. Esse aumento era esperado, tendo em vista que houve maiores transferências de massa com aumento dessas duas variáveis, conforme mostraram os dados do adimensional de umidade em função do tempo. Entretanto, condições similares com as que foram empregadas nos experimentos de secagem, bem como configurações de equipamentos semelhantes utilizando o parafuso helicoidal ainda não foram encontradas na literatura, e portanto, a difusividade aqui determinada não pôde ser comparada. Sendo assim, um estudo mais detalhado sobre os fenômenos de transferência de calor e massa envolvendo estruturas sólidas granulares ainda é pertinente e necessário para que o modelo torne-se mais real da secagem a ser feita.

## 5. CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho com respeito à caracterização fluidodinâmica, atrição no leito de jorro, evaporação de água e secagem de materiais pastosos e granulares. Serão apresentados também as conclusões referentes a análise dos modelos matemáticos.

A caracterização fluidodinâmica do leito de jorro convencional apresentou boa concordância com o que se observa na literatura para essa configuração de equipamento. Para o leito de jorro mecânico, a queda de pressão teve um valor praticamente constante, não apresentando uma dependência significativa com a velocidade do ar. Além de constante, o valor da queda de pressão foi próximo do que foi constatado para o jorro estável no leito de jorro convencional.

Não houve atrição das esferas de vidro nas duas configurações de leito de jorro, contudo, para as esferas de alumina e as partículas de dolomita houve reduções lineares da massa em função do tempo. Por outro lado, os efeitos da atrição influenciaram na fluidodinâmica do leito de jorro convencional. Quanto aos modelos matemáticos, o modelo proposto por Gwyn (1969) forneceu previsões aceitáveis em relação aos resultados observados nesse trabalho.

O leito de jorro mecânico apresentou comportamentos semelhantes ao do leito de jorro convencional quando testado para a evaporação de água, conforme mostraram os dados obtidos para temperatura, eficiência energética e umidades relativa e absoluta na saída dos equipamentos.

A presença do leite desnatado influenciou na queda de pressão do leito de jorro mecânico. O mesmo foi constatado em relação a transferência de massa para os dados da umidade relativa e absoluta obtidos na corrente gasosa que deixa o leito de jorro. Para a umidade do pó, a mesma variou de acordo com a condição operacional empregada no experimento.

O modelo *CST* permitiu descrever os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorreram durante a secagem do leite desnatado no leito de jorro mecânico. Os maiores desvios entre os resultados observados e os preditos foram para estimar os valores da umidade absoluta. Confirmando, que o leito de jorro mecânico apresenta comportamento muito próximo de um tanque perfeitamente agitado. O mesmo ocorreu para o leito de jorro convencional, conforme foi verificado por Almeida (2009) e Nascimento (2013).

No que diz respeito a secagem dos grãos de alumina no leito de jorro mecânico, verificou-se a circulação do material particulado desde o início do experimento, independente da temperatura e da velocidade do ar utilizadas nos ensaios. Já no leito de jorro convencional, para as temperaturas do ar e a condição de  $1,10 u_{mj}$  (10% acima da velocidade de mínimo jorro) a secagem foi realizada como leito fixo por um período e posteriormente com a circulação característica dessa configuração, promovendo uma secagem homogênea dos grãos.

Para o leito de jorro convencional, a temperatura do ar influenciou na secagem dos grãos de alumina, ocasionando em uma secagem mais rápida e atingindo o equilíbrio dinâmico da umidade em menor tempo conforme a temperatura era aumentada. Por outro lado, no leito de jorro mecânico, na maior parte das condições empregadas, tanto a velocidade quanto a temperatura do ar, influenciaram na secagem dos grãos de alumina. Esse comportamento era esperado para os dois equipamentos.

O modelo a dois parâmetros mostrou-se consistente, concordando com o que se observa em trabalhos da literatura. Todavia, a comparação entre os resultados preditos e observados para as condições avaliadas neste trabalho permitiu mostrar que o modelo não simulou com precisão os dados experimentais.

Por fim, conclui-se que o sistema experimental construído e utilizado para a realização desta tese de doutorado foi adequado para cumprir com o que foi proposto neste trabalho. Ficou nítido que a presença do parafuso helicoidal modifica o comportamento fluidodinâmico em relação a configuração convencional e possibilita realizar operações sem gerar um grande desgaste do material particulado. Na presença da fase líquida atua como se fosse um leito de jorro convencional, contudo, no caso do leite desnatado, mesmo operando com o transporte mecânico, a presença dessa pasta interfere na circulação das partículas inertes. Na secagem dos grãos de alumina, o leito de jorro mecânico obteve um bom desempenho, mostrando ser viável do ponto de vista operacional e de secagem. No que condiz à aplicação dos modelos matemáticos, os modelos propostos apresentaram simplicidade, em termos de implementação e aplicabilidade para estimar satisfatoriamente os dados obtidos dos experimentos realizados nesta tese de doutorado.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma vez colocado que o objetivo principal deste trabalho foi verificar o comportamento do leito de jorro mecânico em relação à configuração convencional, cabe ainda dar continuidade à linha de pesquisa a partir de estudos experimentais e numéricos utilizando o leito de jorro mecânico. Desta forma, sugere-se:

Avaliação da taxa de circulação das partículas, do tempo de residência, da altura máxima de leito particulado, da influência do diâmetro das partículas no comportamento fluidodinâmico, térmico e de massa;

Continuação com a secagem utilizando diferentes tipos de pastas, no sentido de investigar a capacidade máxima de evaporação do sistema, a queda de pressão, as variáveis do ar na saída do leito de jorro e o efeito das propriedades do material pastoso no desempenho do leito de jorro mecânico, bem como ampliar o banco de dados das condições operacionais já avaliadas no trabalho que foi realizado;

A investigação do desempenho do leito de jorro mecânico com parafuso helicoidal e aeração complementar na secagem de resíduos, como por exemplo, laranja, limão, acerola, dentre outros de materiais heterogêneos, utilizando linhas independentes da vazão de ar;

A verificação da eficiência energética do processo de secagem usando o leito de jorro convencional e o mecânico, levando em consideração a rotação do parafuso helicoidal e diferentes condições operacionais, com o propósito de avaliar a viabilidade do leito de jorro mecânico; e

A realização de experimentos de secagem, visando a obtenção de dados para comparação de modelos propostos na literatura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABARCA, A. **Modelagem, simulação e verificação experimental da secagem de pastas em leito de jorro**. 2001. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010
- ALMEIDA, A, R, B. **Análise da secagem de pasta em leito de jorro**. 2009. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- ALMEIDA, A, R, F; FREIRE, F, B; FREIRE, J, T. Análise do regime transiente na secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes através do modelo CST. In: FREIRE, J, T; FERREIRA, M, C. **Aplicações em sistemas particulados**. São Carlos: Suprema, 2009, v. 1, cap. 3, p. 74-93
- ALMEIDA, A, R, F; FREIRE, F, B; FREIRE, J, T. Transient analysis of pasty material drying in a spouted bed of inert particles. **Drying Technology**, v. 28, p. 330-340, 2010
- BACELOS, M, S. **Análise do comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro com misturas de tamanho de partículas**. 2006. 113 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.
- BACELOS, M, S; PASSOS, M, L; FREIRE, J, T. Effect on interparticle forces on the conical spouted bed behavior of wet particles with size distribution. **Powder Technology**, v. 174, p. 114-126, 2007.
- BARRET, N.; FANE, A. Drying liquid materials in a spouted bed. In: MUJUMDAR, A, S; ROQUE, M, A. **Drying'89**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1990. p. 415-420.
- BECKER, H, A; SALLANS, H, R. Drying wheat in a spouted bed. **Chemical Engineering Science**, v. 13, p. 97-112, 1960.
- BIE, W, B; SRZEDNICKI, G; DRISCOLL, R, H. Study of temperature and moisture distribution in paddy in a triangular spouted bed dryer. **Drying Technology**, v. 25, p. 177-183, 2007.
- BRUNELLO, G; PECK, R, E; NINA, G, D. The drying of barley malt in the spouted bed dryer. **The canadian journal of chemical engineering**, v. 52, p. 201-205, 1974.
- CALADO, V, M, A; BISCAIA JR, E, C; MASSARANI, G. Secagem de grãos em leito de jorro: aplicação de um modelo de difusão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 15, 1987, Uberlândia. **Anais...Uberlândia**: MG, 1987.
- CALÇADA, L, A; MANCINI, M, C; WILDHAGEN, G, R, S. Drying of inorganic particulate compounds. **Drying technology**, v. 24, p. 349-358, 2006.

CANESIN, J, M; MASSARANI, G; Secagem de arroz em leito de jorro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 1984, Viçosa. **Anais...**Viçosa: MG, 1984.

CHIELLE, D, P; BERTUOL, D, A; MEILI, L; TANABE, E, H; DOTTO, G, L. Spouted bed drying of papaya seeds for oil production. **Food science and technology**, v. 65, p. 852-860, 2016.

CUNHA, F, O. **Contribuições à análise da secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes**. 1999. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1999.

DA ROSA, C, A; **Estudo experimental e numérico da fluidodinâmica e das transferências de calor e massa em um leito de jorro contínuo: uso da técnica do CFD**. 2010. 97 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

DEVAHASTIN, S; Flow and drying **characteristics of a novel rotating jet annular spouted bed**. 1997. 202 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade McGill, Montreal Quebec – Canadá, 1997.

EPSTEIN, N; GRACE, J, R. Spouting of particles solids. In FAYED, M, E; OTTEN, L. **Handbook of Powder Science & Technology**. 2 ed. Chapman & Hall, New York, 1997. p. 532-562.

EVANGELISTA NETO, A, A. **Secagem de grãos de girassol em leito fixo e leito de jorro**. 2013. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

FERNANDESC, F. **Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leito de jorro**. 2005. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

FERNÁNDEZ-AKARREGUI, A. R., MAKIBAR. J., ALAVA, I., DIAZ, L., CUEVA, F., AGUADO, R., LOPEZ, G., OLAZAR, M. Sand attrition in conical spouted beds. **Particuology**. v. 10, p. 592- 599, 2012.

FINZER, J, R, D. **Desenvolvimento de um secador de leito vibro jorrado**. 1989. 277p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1989.

FREIRE, F, B; ATXUTEGI, A; FREIRE, F, B, FREIRE, J, T, AGUADO, R, OLAZAR, M. An adaptive lumped parameter cascade model for orange juice solid waste drying in spouted bed. **Drying Technology**, v. , p. 577-584, 2016.

FREIRE, J, T. Secagem de pastas em leito de jorro. In: FREIRE, J, T; SARTORI, D, J, M. **Tópicos especiais em secagem**, São Carlos, ed. UFSCAR, 1992. 41-85.

FREIRE, J, T; FERREIRA, M, C; FREIRE, F, B. Drying on solutions, slurries and pastes. In: Epstein, N. and Grace, J. R. Spouted bed spouted-fluid beds: fundamentals and applications. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 206-221.

FREIRE, J. T. *et al.* A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium. **Drying Technology**, v. 30, p. 330–341, 2012.

GWYN, J, E. On the particle size distribution function and the attrition of craking catalysts. **AICHE Journal**, v. 15, p. 35-39, 1969.

GYENIS, J; PALLAI, TÓTH, J. Drying of heat sensitive materials of high moisture content in mechanically spouted bed of inert particles. In: CONFERENCE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNIQUE IN THE AGRI-FOOD BUSINES, 10, 2008, SZEGED, HUNGARY, **Proceedings...**, 2008. p. 243-247.

KALWAR, M, I; **Aerodynamics and drying characteristics of grains in two dimensional spouted beds.** 1991. 202 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Pós Graduação e Pesquisa, Universidade Sainte Anne De Bellevue, Canadá, 1991.

KALWAR, M, L; RAGHAVAN, G, S, V. Spouting of two dimensional beds with draft plates. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 70, p. 887-894, 1992.

KUDRA, T. Energy aspect in drying. **Drying Technology**, Canadá, v.22, n. 5, 917-932, 2004.

KUDRA, T. Energy aspects in drying. **Drying Technology**, v. 22, p. 917-932, 2004.

KUDRA, T; MUJUMDAR, A, S; RAGHAVAN, G, S, V. Gas to particle heat transfer in two dimensional spouted beds. **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, v. 16, p. 731-741, 1989.

KUNDU, K, M; DATTA, B, A; CHATTERJEE, P, K. Drying of oilseeds. **Drying technology**, v. 19, p. 343-358, 2001.

LEE, S. K., JIANG, X., KEENER. T. C., KHANG, S. J. Attrition of lime sorbents during fluidization in a circulating fluidized bed absorber. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 32, p. 2758 – 2766, 1993.

LIMA, A, C, C. **Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado.** 1995. 172p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

MAGALHAES, A; PINHO, C. Spouted bed drying of cork stoppers. **Chemical engineering and processing**, v. 47, p. 2395-2401, 2008.

MAIALLE, K, G. **Construção de um secador de jorro fluidizado bidimensional e análise da sua fluidodinâmica.** 1996. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

MARKOWSKI, A, S. Drying characteristics in a jet spouted bed drier. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 70. p. 938-944, 1992.

MARKOWSKI, M; BIALOBRZEWSKI, I; MODRZEWSKA, A. Kinetics of spouted bed drying of barley: diffusivities for sphere and ellipsoid. **Journal of food engineering**, v. 96, p. 380-387, 2010.

MARKOWSKI, M; SOBIESKI, W; KONOPKA, I; TANSKA, M; BIALOBRZEWSKI, I. Drying characteristics of barley grain dried in a spouted bed and combined IR- convection dryers. *Drying Technology*, v. 25, p. 1621-1632, 2007.

MATHUR, K. B., EPSTEIN, N. **Spouted beds**. New York: Academic Press., 1974.

MEDEIROS, M, F, D. **Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro**. 2001. 274p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

MEDEIROS, U, K, L. **Estudo da secagem de feijão verde**. 2004. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, Natal, 2004.

MEILE, L. **Contribuição aos estudos da fluidodinâmica e da secagem de pasta em leitos fluidizado e vibrofluidizado**. 2009. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

NASCIMENTO, B, S. **Análise do efeito da composição química na secagem de pasta em leito de jorro**. 2013. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

NEIL, A, U; BRIDGWATER, J; Attrition of particulate solids under shear. **Powder Technology**, v. 80, p. 207-219, 1994.

NÉMETH, J; PALLAI, E; PÉTER, M; TOROS, R. Heat transfer in a novel type spouted bed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 61, p. 406-410, 1983.

NGUYEN, L, H; DRISCOLL, R, H; SRZEDNICKI. Flowing performance and drying characteristics of paddy in a triangular spouted bed. In: INTERNATIONAL WORKING CONFERENCE ON STORED PRODUCT PROTECTION, Australia, **Proceedings...**Department of Food Science and Technology, 1997. p. 1016-1024.

NIAMMUY, C; DEVAHASTIN, S; SOPONRONNARIT, S; RAGHAVAN, V, G, S. Modelling coupled transport phenomena and mechanical deformation of shrimp during drying in a jet spouted bed dryer. **Chemical Engineering Science**, v.63, p. 5503-5512, 2008.

OCHOA-MARTINEZ, L, A; BRENNAN, J, G; NIRANJAN, K. Spouted bed dryer for liquid foods. **Food Control**, v. 4, p. 41-45, 1993.

OJALVO, J, G, O; GUBULIN, J, C. Leito de jorro com aeração complementar – testes de secagem em operações contínua. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMA PARTICULADOS, XIX, Campinas, 1991. **Anais...**Campinas, Ed. UNICAMP, 1991, v.1, p. 396-405.

OLAZAR, M; LOPEZ, G; ALTZIBAR, H; BILBAO, J. Modelling batch drying of sand in a draft tube conical spouted bed. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 89, p. 2054-2062, 2011.

OLIVEIRA JUNIOR, A, B. **Estudo da transferência de calor e massa no processo de secagem em leito vibro-fluidizado**. 2003. 202 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

OLIVEIRA, C, A; ROCHA, S, C, S. Intermittent drying of beans in a spouted bed, **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 24, p. 571-585, 2007.

OLIVEIRA, W, P. **Estudo da secagem de pastas em leito de jorro cônico**, 1996. 200p, Tese (Doutorado em engenharia química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.

OLIVEIRA, W, P; SILVEIRA, A, M; FREIRE, J, T. Transferência simultânea de calor e massa nas três regiões do leito de jorro durante a secagem de pastas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 22, 1994, Florianópolis. **Anais...**Florianópolis: SC, 1994.

OSÓRIO-REVILLA; LÓPEZ-SUARÉZ; GALLARDO-VELÁZQUEZ. Simultaneous drying and cleaning of guava seeds in a spout-fluid bed with draft tube, **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 82, p. 148-153, 2004.

PALLAI E, V; TÓTH, J; GYENIS, J. Drying of suspensions and solutions on inert particle surface in mechanically spouted bed dryer. *China Particuology*, v. 5, p. 337-344, 2007.

PALLAI, E; SZENTMARJAY, T; MUJUMDAR, A, S; Spouted bed drying. In: MUJUMDAR, A, S. **Handbook of industrial drying**. 3. Ed. Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2006. Cap. 14, p. 363-384.

PASSOS, M, L; MUJUMDAR, A, S; VIJAYA, G; RAGHAVAN, V, G, S. Spouted bed: principles and design considerations. In A. S Mujumdar. **Advances in Drying**, vol 4, ed. New York: Hemisphere, 1987, p. 359-397.

PASSOS, M, L; MUJUMDAR, A, S; VIJAYA, G; RAGHAVAN, V, G, S. Spouted bed and spout fluidized beds for gram drying. **Drying Technology**, v. 4, p. 663-696, 1989.

PASSOS, M, L; MUJUMDAR, A, S; MASSARANI, G. Scale up of spouted bed dryers: criteria and applications. **Drying Technology**, v.12, p. 351-391, 1994.

PASSOS, M, L; MUJUMDAR, A, S. Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles. *Powder Technology*, v. 110, p. 222-238, 2000.

PASSOS, M, L; COSTA JR, E; MUJUMDAR, A, S; Drying of particulate solids. In: Epstein, N. and Grace, J. R. **Spouted bed spouted-fluid beds: fundamentals and applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 188-205.

PATEL, et al. Spouting behavior of wet solids. In: MUJUMDAR, A.S.; ROQUE, M.A. **Drying'86**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1986. p. 183-189.

PERAZZINI, H. **Secagem de sólidos porosos granulares**. 2014. 170 p. Tese (Doutorado em engenharia química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

PERAZZINI, H; FREIRE, F.B; FREIRE, J.T. Secagem de partícula porosa em leito vibrofluidizado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2014, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: UFCE, 2014.

PERAZZINI, M, T, B. **Análise do efeito das condições operacionais e características geométricas do leito de jorro na secagem de pastas**. 2015. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

PERAZZINI, M, T, B; FREIRE, F,B; FREIRE,J,T. Influence of Bed Geometry on the drying of skimmed milk in a spouted bed, **Advances in chemical engineering and science**. v. 5, p. 447-460, 2015.

PÉTER, H, M; PALLAI, V, E; VARGA, V. Spouted bed drying in a closed system. **Heat Recovery Systems**, v. 5, p. 445-449, 1985

PETERSON, W, S. spouted bed drier. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, p. 226-230, 1962.

PHAM, Q, T. Behavior of conical spouted bed drier for animal blood.. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 6. p. 426-434, 1983.

PORTO, P, S, S. **Investigações sobre a secagem de partículas de xisto**. 2005. 198 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

PRACHAYAWARAKORN, S; RUENGNARONG, S; SOPONRONNARIT, S. Characteristics of heat in two dimensional spouted bed, **Journal of Food Engineering**, v. 76, p. 327-333, 2006.

RAY, Y.C; JIANG, T.S. Particle attrition phenomena in a fluidized bed. **Powder Technology**, v. 49, p. 193-206, 1987.

RÉ, M, I. **Secagem de sangue animal em leito de jorro**. 1986. 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1986.

REIS, T, G. **Análise da secagem de partículas de alumina em secador vibrofluidizado**. 2015. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

REVILLA, G, O; SUÁREZ, T, L; VELÁZQUEZ, T, G. Simultaneous drying and cleaning of guava seeds in a spout fluid bed with draft tube. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 82, p. 148-153, 2004.

REYES, A.E., MASSARANI, G. Secado de pastas em lecho de chorro. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2014, Campinas. **Anais...** São Paulo: UNICAMP, 1991.

RODRIGUES, C, C. **Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes**. 1993. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1993.

ROMANKOV, P, G; RASHKOVSKAYA, N.B. Drying in a suspended state. In: Chem. Publ. House, Leningrad Branch, 1968. In MATHUR, K, B; EPSTEIN, N. **Spouted Bed**, Academic Press, New York, 1974.

RUDOBASHTA, S, P et al., Kinetic Relationship in the drying of materials from solvent which are reactive towards them. *Int. Chem. Eng.*, v. 26, p. 374-377, 1987

SANTANA, E, B, **Análise experimental do comportamento fluidodinâmico e de secagem de sementes da linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em leito de jorro**. 2011. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SANTANA, J, D, A; CHARBEL, A, L, T; PASSOS, M, L; MASSARANI, G. Effect of interparticles forces on the spouted bed flow behavior. In: INTER AMERICAN DRYING CONFERENCE, 97, 1997, Itu, SP, **Proceedings...** UNICAMP, 1997. p. 50-62.

SCHNEIDER, T., BRIDGWATER, J. Drying of solutions and suspensions in spouted beds. In MUJUMDAR, AS., ROQUE, M.A. **Drying 89**, eds. Hemisphere Publishing Corporation, New York, p. 421-425, 1993.

SOUSA, R, C; FREIRE, F, B; FREIRE, J, T. Atrição de partículas esféricas e irregulares em leito de jorro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2015, São Carlos. **Anais...** São Carlos: SP, 2015.

SPITZNER NETO, P, I. **Estudo da secagem de pastas e da fluidodinâmica do leito de jorro na presença de pastas e líquidos**. 2001. 283 p. Tese (Doutorado em engenharia química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

SPREUTELS, L; HAUT, B; CHAOUKI, J; BERTRAND, F; LEGROS, R. Conical spouted bed drying of bakers yeast: experimentation and multi modeling. **Food Research International**, v. 62, p. 137-150, 2014.

STRUMILLO, C., KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design**. 1 ed. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448 p.

SZENTMARJAY, T.; PALLAI, E. Drying of suspensions in a modified spouted bed dryer with an inert packing. **Drying Technology**, v. 7(3), p. 523-536, 1989.

SZENTMARJAY, T.; PALLAI, E; REGÉNYI, ZS. Short time drying of heat sensitive biologically active pulps and pastes. **Drying Technology**, v. 9, p. 2091-2115, 1996.

SZENTMARJAY, T.; SZALAY, A. PALLAI, E; BENCZE, T; VASS, J. Control of drying process mechanically spouted bed dryer. **Drying Technology**, v. 14, p. 501-512, 1996.

SZENTMARJAY, T.; SZALAY, T; PALLAI, E. Hydrodynamical measurements in mechanically spouted bed. **Hungarian Journal of Industrial chemistry veszprém**, v. 20, p. 219-224, 1992.

SZENTMARJAY, T.; SZALAY, T; PALLAI, E. Scale up aspects of mechanically spouted bed dryer with inert particles. **Drying Technology**, v. 12, p. 341-350, 1994.

TARANTO, O, P. **Estudo experimental da dinâmica em um leito de jorro bi dimensional: aplicação em recobrimento de comprimidos**. 1992. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

TARANTO, O, P. **Monitoramento de regimes e recobrimentos de partículas em leitos de jorro bidimensionais**. 1996. 186p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

VELASQUEZ, H, J, C; **Secagem de sistemas biopoliméricos em jorro fluidizado bidimensional**. 2009. 162p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

VIEIRA, G, N, A. **Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos pela secagem de pastas em leito de jorro**. 2015. 111 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

WELTMAN, R, M, **Rheology**, v. 3, New York, Academic Press, 1960.

WERTHER, J., REPPENHAGEN, J. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.

WILHELM, L, R, Numerical calculation of psychrometrical properties in SI units. **Trans. of the ASAE**, v. 19, p. 318-325, 1976.

XU, H; ZHONG, W; YU, A; YUAN, Z. Spouting characteristics of wet particles in a conical cylindrical spouted bed. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 54, p. 9894-9902, 2015.

ZANOELO, E, F. **Modelagem e simulação hidrodinâmica de um leito de jorro bi dimensional**. 1994. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.