

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

FLAVIA TRAMONTIN SILVEIRA SCHAFFKA

**ANÁLISE FLUIDODINÂMICA E TÉRMICA DO PROCESSO DE
SECAGEM DE SUSPENSÃO DILUÍDA EM LEITO FLUIDIZADO**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2017

FLAVIA TRAMONTIN SILVEIRA SCHAFFKA

**ANÁLISE FLUIDODINÂMICA E TÉRMICA DO PROCESSO DE
SECAGEM DE SUSPENSÃO DILUÍDA EM LEITO FLUIDIZADO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Térmica e Fluidos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Regina Parise

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Moreira da Silva

PONTA GROSSA

2017

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.41/17

S296 Schaffka, Flavia Tramontin Silveira

Análise fluidodinâmica e térmica do processo de secagem de suspensão diluída em leito fluidizado. / Flavia Tramontin Silveira Schaffka-- Ponta Grossa, 2017.

147 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Regina Parise

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Moreira da Silva

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

1. Dinâmica dos fluidos. 2. Termodinâmica. 3. Pressão. 4. Calor - Transmissão. I. Parise, Maria Regina. II. Silva, Carlos Alexandre Moreira da. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 620.1



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº 12/2017

“ANÁLISE FLUIDODINÂMICA E TÉRMICA DO PROCESSO DE SECAGEM DE
SUSPENSÃO DILUÍDA EM LEITO FLUIDIZADO”

Por

Flavia Tramontin Silveira Schaffka

Esta dissertação foi apresentada às **8 horas de 04 de julho de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, com Área de Concentração em Térmica e Fluidos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof. Dr. Guilherme José de Castilho
(DEPro-UNICAMP)

Prof^a. Dr^a. Jhon Jairo Ramirez Behainne
(DAMEC-UTFPR)

Prof. Dr. Maria Regina Parise
(DAENQ-UTFPR) – Orientadora



Visto do Coordenador:

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena
Pukasiewicz
Coordenador do PPGEM
UTFPR – Câmpus Ponta Grossa

Dedico este trabalho ao meu querido
esposo e amado filho sem os quais jamais
teria conseguido.

AGRADECIMENTOS

Provavelmente não conseguirei atender todas as pessoas que de alguma forma, me ajudaram a atingir este objetivo da minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem ter certeza que fazem parte do meu pensamento e de minha eterna gratidão.

Agradeço primeiramente a **Deus e aos Espíritos de Luz**, por ter me proporcionado esta oportunidade de vivenciar tamanha experiência, a fim de contribuir para o intelecto da humanidade. Por ter me dado forças em todas as horas que pensei em desistir. Obrigada meu Deus, por todas as dificuldades e aprendizado que adquiri durante o desenvolvimento de todo o trabalho. Gratidão a tudo e a todos.

Ao meu querido esposo **Mauro Vinícius Schaffka**, por sempre me incentivar e acreditar em mim, guiar, alegrar e ser o melhor companheiro que uma mulher um dia já sonhou em ter.

Ao amor da minha vida, meu filho **Murilo Tramontin Schaffka**, por entender que muitas vezes a mamãe teve que estar ausente nas horas em que ele mais precisava.

À minha mãe **Roselia de Lourdes Ribeiro**, pelo companheirismo, dedicação e apoio que ela sempre deu à família.

Ao meu pai **Gerveson Tramontin Silveira**, por seu exemplo que sempre me serviu de inspiração.

Aos meus irmãos **Vitor Marques Tramontin Silveira e Lauro Marques Tramontin Silveira**, pela sua compreensão e conselhos em todos os momentos de dificuldades.

Aos meus sogros **Angela Eloina Schaffka e Mariano Schaffka Filho** por sempre me apoiarem durante o desenvolvimento da dissertação.

À minha querida orientadora Professora Doutora **Maria Regina Parise**, pelos seus ensinamentos, apoio, sensibilidade e dedicação que teve comigo durante todo o desenvolvimento do trabalho. Não tenho palavras para descrever todo o aprendizado que tive com a minha eterna Mestre.

Ao meu co-orientador Professor Doutor **Carlos Alexandre Moreira da Silva**, pelos seus ensinamentos durante o desenvolvimento desta dissertação.

Ao professor Doutor **Jhon Jairo Ramirez Behaine**, pelo apoio e ensinamentos durante a execução do trabalho.

Ao professor Doutor **Frederic Janzen**, por ter me ajudado na elaboração da programação referente às propriedades psicométricas no *software* LabVIEW™ versão 10.0.

Ao meu afilhado **Heitor Dutra Naconezi**, juntamente com meus compadres **Alfredo Naconezi Junior** e **Ingrid Dutra**, por serem um exemplo de família para todos e fazerem parte dos momentos mais felizes da minha vida.

Aos meus amigos **Bruno Alves Figueroa Turini**, **Marcelo Fogiatto**, **Herik Kauê Coelho** e **Carlos Alves Ferreira Junior** por terem me ajudado na realização dos experimentos.

A **Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa** (UTFPR-PG), nas pessoas de seu corpo docente e funcionários, pelo primoroso trabalho desenvolvido na formação profissional de seus alunos.

Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)**, a **Fundação Araucária** e **Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa** (UTFPR-PG) pelo suporte financeiro para a realização de trabalho.

As minhas amigas **Tatiana Josué, Lariana Negrão Beraldo de Almeida, Mariana Nascimento, Mylena Pazinato de Souza e Aline Sá** por todo apoio e companheirismo nos principais momentos da minha vida.

A todos os **meus amigos e amigas**, pelos tempos de convivência pautada pelo companheirismo e pela amizade demonstrada durante a realização do mestrado.

Enfim, a todos que de alguma forma colaboraram no desenvolvimento desta trajetória, que proporcionou no objetivo alcançado.

Na vida, não vale tanto o
que temos, nem tanto importa
o que somos.
Vale o que realizamos com aquilo que
possuímos e, acima de tudo,
importa o que fazemos de nós!
(Chico Xavier)

RESUMO

SCHAFFKA, Flavia Tramontin Silveira. **Análise fluidodinâmica e térmica do processo de secagem de suspensão diluída em leito fluidizado**. 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

O presente trabalho teve como objetivo realizar um estudo do comportamento fluidodinâmico e térmico do processo de secagem de suspensão diluída em leito fluidizado gás-sólido. Para avaliar a estabilidade de fluidização, a fim de evitar a condição do fenômeno de defluidização, foi utilizada a análise espectral Gaussiana. Durante o processo de secagem, foi analisada a umidade relativa do ar, a umidade absoluta, eficiência de secagem e a força de secagem. Em relação ao comportamento térmico, foi analisado o coeficiente volumétrico de transferência de calor, avaliando a influência das condições experimentais. Os ensaios experimentais foram realizados em escala laboratorial utilizando-se uma coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e 1,0 m de altura. Como material inerte, foram utilizadas esferas de alumínio e esferas de vidro, ambas com diâmetro médio de 1,55 mm. Foi utilizada uma suspensão de carbonato de cálcio com concentração de 9 e 15%. A vazão de atomização da suspensão foi de 11,0; 13,0 e 15,0 mL/min. Os resultados mostraram que a transição dos regimes de fluidização durante o processo de secagem de suspensão não pôde ser nitidamente identificada pela análise espectral Gaussiana. Adicionalmente, a concentração de carbonato de cálcio apresentou pouca influência no tempo para atingir a região de defluidização. A vazão de atomização da solução influenciou na estabilidade fluidodinâmica do leito. Em relação ao tipo de material inerte, as partículas de alumínio apresentaram melhores condições no processo de secagem do ponto de vista da fluidodinâmica. O coeficiente volumétrico médio de transferência de calor obtido foi de 1,76 kW/m³.K, não variando com o tipo da partícula inerte utilizado.

Palavras-chave: Leito Fluidizado Gás-Sólido. Secagem. Suspensão Diluída. Análise de Flutuação de Pressão. Coeficiente Volumétrico de Transferência de calor.

ABSTRACT

SCHAFFKA, Flavia Tramontin Silveira. **Hydrodynamic and thermal analyses of dilute suspension drying process in fluidized bed.** 2017. 147 p. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering) - Federal University of Technology-Paraná. Ponta Grossa, 2017.

The objective of this study was to perform a study of the hydrodynamic and thermal behavior of the drying process of a dilute suspension in a gas-solid fluidized bed. To evaluate stability fluidization, in order to avoid the condition of the defluidization phenomenon, was utilized Gaussian spectral analysis, which is a technique based on pressure fluctuation measurements. During the drying process, was analyzed relative humidity, absolute humidity and a drying efficiency. In relation to the thermal behavior, the volumetric heat transfer coefficient was analyzed, evaluating the influence of experimental conditions. The experimental tests were carried out in laboratory scale using a Plexiglas column, with 0.11 m in inner diameter and 1.0 m in height. As inert material, aluminum beads and glass beads were used, both with mean diameter of 1.55 mm. It was used as suspension of calcium carbonate with a concentration of 9 and 15%. The atomization flow rates of the suspension were 11.0; 13.0 and 15.0 mL/min. The results showed that the transition of the fluidization regimes during the suspension drying process could not be clearly identified by Gaussian spectral analysis. Additionally, the solution concentration had little influence on the time to reach the defluidization region. The atomization flow of the solution influenced the fluid dynamic stability of the bed. As for the type of the inert material, the aluminum particles presented better conditions in the hydrodynamic of drying process. The average volumetric heat transfer coefficient was $1.76 \text{ kW/m}^3\cdot\text{K}$ and it not changed with the type of inert particle used.

Keywords: Gas-Solid Fluidized Bed. Drying. Dilute Suspension. Pressure Fluctuations Analysis. Volumetric Heat Transfer Coefficient.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Regimes de Fluidização - (a) Leito Fixo; (b) Mínima Fluidização; (c) Fluidização Particulada; (d) Fluidização Borbulhante; (e) <i>Slugging</i> (<i>Slugs</i> Axiais); (f) <i>Slugging</i> (<i>Slugs</i> Completo); (g) Fluidização Turbulenta; (h) Transporte Pneumático	27
Figura 2 – Mecanismo de secagem: secagem de suspensão a partir de material inerte	47
Figura 3 – Esquema Experimental - Vista Frontal	67
Figura 4 – Especificações do filtro digital de resposta de impulso infinito (IIR).	77
Figura 5 – Unidade experimental para monitoramento das propriedades psicrométricas do ar	78
Figura 6 – Fluxograma referente ao procedimento experimental.	88
Fotografia 1 – Equipamento experimental. (a) Vista Frontal. (b) Vista Lateral	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva fluidodinâmica típica para o leito fluidizado	30
Gráfico 2 – Classificação de Geldart (1973) de partículas com ar e em condições ambientais	31
Gráfico 3 – Evolução da frequência central e desvio padrão da distribuição espectral sobre a curva fluidodinâmica – CMC, $d_p=0,180$ mm, $h_L = 0,15$ m, $u_{mf}= 0,022$ m/s.....	36
Gráfico 4 – Evolução da frequência central e da curva fluidodinâmica. (a) $d_p=1,55$ mm; $h_L=0,10$ m; (b) $d_p=1,55$ mm; $h_L=0,20$ m	39
Gráfico 5 – Evolução da frequência média Gaussiana versus tempo. Condição de Operação: $m_s: 0,9$ kg, $Q_{susp}: 6$ mL/min, (a) $u_o-u_{mf}: 0,16$ m/s, (b) $u_o-u_{mf}: 0,20$ m/s.....	42
Gráfico 6 – (a) Perfil de temperatura do gás e do leito. (b) Perfil de umidade do gás. (c) Parâmetro de eficiência de secagem. Sem controle de processo. $Q_{susp} = 10,0$ mL/min.	44
Gráfico 7 – Número de Nusselt para a transferência de calor entre partícula-gás em leito fluidizado denso para $Pr=0,7$	56
Gráfico 8 – Sinal de pressão manométrica no <i>plenum</i> - Condições de Operação: $m_{esf_Al}= 1,6$ kg; $u_o/U_{mf} = 1,4$; $T_L = 70^\circ C$; $P_{atom} = 0,1$ MPa; $C_{susp} = 9\%$; $Q_{susp} = 15$ mL/min	68
Gráfico 9 – Pressão do leito centralizada na média no domínio do tempo - Condições de Operação: $m_{esf_Al} = 1,6$ kg; $u_o/u_{mf} = 1,4$; $T_L = 70^\circ C$; $P_{atom} = 0,1$ MPa; $C_{susp} = 9\%$; $Q_{susp} = 15$ mL/min.....	69
Gráfico 10 – Transformada de Fourier do sinal de pressão centralizada (espectro de pressão) - Condições de Operação: $m_{esf_Al} = 1,6$ kg; $u_o/U_{mf} = 1,4$; $T_L = 70^\circ C$; $P_{atom} = 0,1$ MPa; $C_{susp} = 9\%$; $Q_{susp} = 15$ mL/min.....	70
Gráfico 11 – Logaritmo natural da amplitude da transformada de Fourier com função de ajuste utilizando o <i>software</i> LabView 10.0 TM - Condições de Operação: $m_{esf_Al} = 1,6$ kg; $u_o/U_{mf} = 1,4$; $T_L = 70^\circ C$; $P_{atom} = 0,1$ MPa; $C_{susp} = 9\%$; $Q_{susp} = 15$ mL/min..	76
Gráfico 12 – Comportamento da frequência central em função da ordem do filtro. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $d_p=1,55$ mm, $C_{susp}=15\%$, $Q_{susp}=13$ mL/min, $T_{ar}=85^\circ C$, $u_o/U_{mf}=1,4$	77
Gráfico 13 – Curva fluidodinâmica (a) Esfera de Alumínio; (b) Esfera de Vidro	90
Gráfico 14 – Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$	93
Gráfico 15 – Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$	96
Gráfico 16 – Evolução do coeficiente de correlação (R^2) no ajuste do método da análise espectral Gaussiana em função do tempo de experimento. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $C_{susp}=9\%$ e $Q_{susp}=15$ mL/min	97
Gráfico 17 – Perfil de temperatura do ar e do leito. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$	99
Gráfico 18 – Perfil de temperatura do ar e do leito. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$	100

Gráfico 19 – Perfil de umidade do ar. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$.	102
Gráfico 20 – Perfil de umidade do ar. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$.	103
Gráfico 21 – Parâmetros da força de secagem. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$.	105
Gráfico 22 – Parâmetros da força de secagem. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$.	106
Gráfico 23 – Evolução da frequência central médio e do desvio padrão médio da distribuição espectral. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $C_{susp}=9\%$. (a) $Q_{susp}=11$ mL/min; (b) $Q_{susp}=13$ mL/min; (c) $Q_{susp}=15$ mL/min	109
Gráfico 24 – Perfil de Temperatura do ar e do Leito. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $C_{susp}=9\%$; (a) $Q_{susp}=11$ mL/min; (b) $Q_{susp}=13$ mL/min; (c) $Q_{susp}=15$ mL/min	111
Gráfico 25 – Perfil de umidade do ar. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $C_{susp}=9\%$. (a) $Q_{susp}=11$ mL/min (b) $Q_{susp}=13$ mL/min; (c) $Q_{susp}=15$ mL/min	114
Gráfico 26 – Parâmetros de eficiência de secagem e força de secagem. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $C_{susp}=9\%$. (a) $Q_{susp}=11$ mL/min (b) $Q_{susp}=13$ mL/min; (c) $Q_{susp}=15$ mL/min	115
Gráfico 27 – Calibração do transdutor de pressão relacionado ao (a) <i>Plenum</i> , (b) à queda de pressão na placa de orifício e (c) à montante da placa de orifício	129
Gráfico 28 - Calibração da bomba peristáltica com concentração da solução de $CaCO_3$ de 15%	130
Gráfico 29 – Esfera de Vidro, Condições Operacionais: $C_{susp}=9\%$ e $Q_{susp}=11$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros de eficiência de secagem e da força de secagem	141
Gráfico 30 – Esfera de Vidro, Condições Operacionais: $C_{susp}=9\%$ e $Q_{susp}=13$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros da força de secagem	142
Gráfico 31 – Esfera de Vidro, Condições Operacionais: $C_{susp}=15\%$ e $Q_{susp}=11$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros da força de secagem	144
Gráfico 32 – Esfera de Vidro, Condições Operacionais: $C_{susp}=15\%$ e $Q_{susp}=13$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros da força de secagem	145
Gráfico 33 – Esfera de Alumínio, Condições Operacionais: $C_{susp}=15\%$ e $Q_{susp}=11$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros de eficiência de secagem e da força de secagem	146
Gráfico 34 – Esfera de Alumínio, Condições Operacionais: $C_{susp}=15\%$ e $Q_{susp}=13$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros da força de secagem	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos materiais.	64
Tabela 2 – Organização Experimental no processo de secagem	85
Tabela 3 – Coeficiente Volumétrico de Transferência de Calor nas condições operacionais estáveis e estacionárias.....	116

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Área da superfície de uma única partícula	[m ²]
a_w	Área da superfície submersa ou da parede do trocador	[m ²]
A	Amplitude de modulação	[-]
$A_e(f_k)$	Amplitude espectral medida	[Pa]
A_{or}	Área do orifício da placa	[m ²]
A_{st}	Área de seção transversal do leito	[m ²]
c_p	Calor específico a pressão constante	[kJ/kg.K]
c_{p_a}	Calor específico a pressão constante da água	[kJ/kg.K]
c_{p_c}	Calor específico a pressão constante do carbonato de cálcio	[kJ/kg.K]
C_d	Coefficiente de descarga	[-]
C_{susp}	Concentração da suspensão	[%]
d_{or}	Diâmetro do orifício da placa de orifício	[m]
d_p	Diâmetro médio da partícula	[m]
D	Diâmetro da tubulação	[m]
DF	Força de secagem	[Pa]
D_{int}	Diâmetro interno do leito	[m]
e	Fator de compressibilidade	[-]
e_k	Resíduo da curva de ajuste	[-]
E	Eficiência da secagem conforme Dewettinck et al (1999)	[-]
f_c	Frequência central	[Hz]
f_k	Frequência do sinal	[Hz]
$f(T_{bu})$	Função para cálculo da temperatura de bulbo úmido	[-]
$G(f_k)$	Curva de distribuição normal	[-]
\bar{h}_a	Coefficiente volumétrico de transferência de calor	[kW/m ³ .K]
$h_{g,a}$	Entalpia do vapor saturado da água	[kJ/kg]
$h_{l,a}$	Entalpia do líquido saturado da água	[kJ/kg]
h_L	Altura do leito fixo	[m]
$h_{L,mf}$	Altura do leito na mínima fluidização	[m]

h_p	Coeficiente de transferência de calor entre partícula e fluido	[kW/m ² .K]
h_r	Coeficiente de transferência de calor por radiação na superfície da parede	[kW/m ² .K]
h_s	Altura do secador	[m]
h_w	Coeficiente de transferência de calor entre leite e superfície ou parede do trocador	[kW/m ² .K]
hI_p	Entalpia específica à pressão constante	[kJ/kg]
h_s^*	Entalpia específica do ar na saturação	[kJ/kg]
h_w^*	Entalpia específica da água líquida	[kJ/kg]
$k_{\text{alumínio},85^\circ\text{C}}$	Condutividade térmica do alumínio a 85°C	[W/m.K]
$k_{\text{vidro},85^\circ\text{C}}$	Condutividade térmica do vidro a 85°C	[W/m.K]
k_g	Condutividade térmica do gás	[kW/m.K]
K	Coeficiente de perda de carga	[-]
m_a	Massa de água na solução	[kg]
\dot{m}_{ar}	Vazão mássica do ar na entrada da tubulação	[kg/s]
\dot{m}_a	Vazão mássica da água na solução	[kg/s]
m_c	Massa de carbonato de cálcio na solução	[kg]
\dot{m}_c	Vazão mássica do carbonato de cálcio na solução	[kg/s]
\dot{m}_L	Vazão mássica de líquido	[kg/h]
m_s	Massa de sólidos	[kg]
m_{sol}	Massa da solução	[kg]
N	Número de medidas de pressão	[-]
Nu_p	Número de <i>Nusselt</i> , referente à partícula	[-]
\bar{P}	Média aritmética de N medidas de pressão	[Pa]
P_{atm}	Pressão atmosférica do ar	[kPa]
P_{atom}	Pressão de atomização	[Pa]
P_L	Pressão no leite	[Pa]
$P_{N,k}$	Pressão do leite centralizada na média	[Pa]
P_v	Pressão de vapor de água	[Pa]
Pr	Número de <i>Prandtl</i> do fluido	[-]
P_{vs}	Pressão de vapor saturado na temperatura do leite	[Pa]
P_{vs}^{bu}	Pressão de vapor de água saturado na temperatura de bulbo úmido	[kPa]

$P_{vs}(T_{bs})$	Pressão de vapor de água saturado na temperatura de bulbo seco	[kPa]
P_1	Pressão absoluta a montante da placa de orifício	[Pa]
q_{l-s}	Taxa de transferência de calor entre leito-superfície/parede do trocador	[kW]
q_{p-f}	Taxa de transferência de calor entre partícula e fluido	[kW]
q_r	Taxa de transferência de calor por radiação na superfície da parede	[kW]
\dot{Q}_a	Taxa de transferência de calor sensível da água	[kW]
\dot{Q}_c	Taxa de transferência de calor sensível do $CaCO_3$	[kW]
\dot{Q}_e	Taxa de transferência de calor latente de evaporação da água	[kW]
\dot{Q}_s	Taxa de transferência de calor no processo de secagem em leito fluidizado	[kW]
$Q_{proveta}$	Vazão de suspensão na proveta	[m ³ /s]
Q_{susp}	Vazão de atomização de suspensão	[m ³ /s]
R	Eficiência de secagem conforme Kage et al (1996)	[-]
Re_p	Número de <i>Reynolds</i> , referente à partícula	[-]
$S_{xx}(f)$	Sinal de um espectro de potência e densidade espectral de potência	[Pa ²], [Pa ² /Hz]
T_{alim}	Temperatura da suspensão a ser atomizada no leito	[°C]
T_{ar}	Temperatura do ar de entrada	[°C]
$T_{bs,o}$	Temperatura de bulbo seco na saída	[°C]
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido	[°C]
$T_{bu,in}$	Temperatura de bulbo úmido do ar na entrada do leito	[°C]
$T_{bu,o}$	Temperatura de bulbo úmido do ar na saída do leito	[°C]
T_f	Temperatura global do fluido	[°C]
T_{in}	Temperatura da entrada de ar no leito	[°C]
T_L	Temperatura do leito	[°C]
$T_{L,1}$	Temperatura do leito na posição (1)	[°C]
$T_{L,2}$	Temperatura do leito na posição (2)	[°C]
$T_{L,3}$	Temperatura do leito na posição (3)	[°C]
T_o	Temperatura de saída do ar	[°C]
T_p	Temperatura da partícula	[K]
T_{plenum}	Temperatura do ar no <i>plenum</i>	[°C]

T_w	Temperatura da superfície submersa ou da parede do trocador	[K]
UR	Umidade relativa do ar	[-]
UR_{in}	Umidade relativa na entrada	[-]
UR_o	Umidade relativa na saída	[-]
u_k	Velocidade de transição	[m/s]
u_{mb}	Velocidade de mínimo borbulhamento	[m/s]
u_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	[m/s]
u_o	Velocidade superficial do ar	[m/s]
u_{tr}	Velocidade de transporte	[m/s]
V	Volume do leito na condição de leito fixo	[m ³]
$v_{ar, t}$	Velocidade do ar na tubulação	[m/s]
V_s	Volume do Secador	[m ³]
V_{sol}	Volume da solução	[m ³]
w	Coefficiente de perda de pressão estática	[-]
W	Força peso do leito	[N]
X(f)	Sinal da Transformada de Fourier no domínio da frequência	[-]
x(t)	Sinal da Transformada Inversa de Fourier no domínio do tempo	[-]
X(k)	Sinal da Transformada de Fourier Discreta	[-]
x(n)	Sinal da Transformada de Fourier Discreta Inversa	[-]
Y	Umidade absoluta do ar	[kg _{água} /kg _{ar seco}]
$Y_{abs,in}$	Umidade absoluta do ar na entrada	[kg _{água} /kg _{ar seco}]
$Y_{abs,o}$	Umidade absoluta do ar na saída	[kg _{água} /kg _{ar seco}]
Y_s^{bu}	Umidade absoluta do ar na condição de saturação adiabática	[kg _{água} /kg _{ar seco}]
$Y_{abs,o,sat}$	Umidade absoluta do ar na condição de saturação	[kg _{água} /kg _{ar seco}]

LISTA DE SIGLAS

AR	Método de auto-regressão
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CMC	Celulose Microcristalina
DEP	Densidade Espectral de Potência
DFT	Transformada de Fourier Discreta
DP _{médio}	Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral
EP	Espectro de Potência
FC _{média}	Frequência Central Média
FCC	<i>Fluid Catalytic Cracking</i>
FFT	Transformada Rápida de Fourier
PI	Controlador proporcional integral

LISTA DE LETRAS GREGAS

α	Difusividade Térmica	[m ² /s]
β	Razão do diâmetro do orifício da placa pelo diâmetro da tubulação	[-]
ρ_g	Densidade do fluido	[kg/m ³]
ρ_s	Densidade da partícula	[kg/m ³]
ϕ_p	Esfericidade da partícula	[-]
ϵ_m	Porosidade do leito	[-]
ϵ_{mf}	Porosidade do leito na mínima fluidização	[-]
$\Delta P_{m\acute{a}x}$	Queda de pressão máxima	[Pa]
ΔP_L	Queda de pressão no leito	[Pa]
ΔP_{or}	Queda de pressão na placa de orifício	[Pa]
$(\Delta T)_{LN}$	Diferença de temperatura média logarítmica	[°C]
$(\Delta T)_{LN,S}$	Diferença de temperatura média logarítmica no secador	[°C]
σ	Desvio padrão da distribuição espectral	[Hz]
π	Número adimensional PI	[-]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[kg/m.s]
λ	Calor latente de evaporação da água na T _{bu}	[kJ/kg]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 JUSTIFICATIVA	23
1.2 OBJETIVOS	24
1.2.1 Objetivo Geral	24
1.2.2 Objetivos Específicos	24
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	24
2 REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1 FUNDAMENTOS DA FLUIDIZAÇÃO	26
2.1.1 Conceito e Características da Fluidização	26
2.1.2 Regimes de Fluidização	26
2.1.3 Curva Fluidodinâmica e Velocidade de Mínima Fluidização (u_{mf})	29
2.1.4 Classificação das Partículas Sólidas	30
2.2 ANÁLISE ESPECTRAL (TRANSFORMADA DE FOURIER)	32
2.3 TRABALHOS DA LITERATURA SOBRE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO EM LEITO FLUIDIZADO	36
2.3.1 Trabalhos relacionados à Atmosfera Seca	36
2.3.2 Trabalhos relacionados à Atmosfera Úmida	40
2.4 FUNDAMENTOS DA SECAGEM	45
2.5 TRABALHOS DA LITERATURA SOBRE SECAGEM DE PASTA EM LEITOS FLUIDIZADOS	48
2.6 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FLUIDIZADO	52
2.7 TRABALHOS DA LITERATURA SOBRE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PROCESSO COM INJEÇÃO DE LÍQUIDO NO INTERIOR DO LEITO	58
3 MATERIAIS E MÉTODOS	63
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS E SUAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	63
3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL	64
3.3 MÉTODO DE ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA	67
3.3.1 Distribuição Normal (Curva Gaussiana)	70
3.4 ESPECIFICAÇÃO DO FILTRO DIGITAL	76
3.5 MÉTODO PARA MONITORAR A EFICIÊNCIA DE SECAGEM DAS PARTÍCULAS ATRAVÉS DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS	78
3.6 CÁLCULO DO COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (ha)	81
3.7 ORGANIZAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	84
3.7.1 Organização dos Dados Experimentais	84
3.7.1.1 Obtenção da Curva Fluidodinâmica	85
3.7.1.2 Obtenção dos Resultados no Processo de Secagem	
3.7.2 Procedimento dos ensaios de secagem de pasta	
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
4.1 CURVAS FLUIDODINÂMICAS	89

4.2 ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA E DOS PARÂMETROS PSICROMÉTRICOS NO PROCESSO DE SECAGEM DE SUSPENSÃO.....	91
4.2.1 Análise dos Resultados Avaliando a Influência da Concentração de Suspensão e o Tipo de Material Inerte.....	91
4.2.2 Análise dos Resultados Avaliando a Influência da Vazão de Atomização da Suspensão	107
4.3 ANÁLISE TÉRMICA EM UM PROCESSO DE SECAGEM DE SUSPENSÃO DILUÍDA EM LEITO FLUIDIZADO	116
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	118
5.1 CONCLUSÕES.....	118
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	119
REFERÊNCIAS.....	121
APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO E DA BOMBA PERISTÁLTICA.....	127
APÊNDICE B - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS (u_o).....	131
APÊNDICE C - CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS DO AR .	135
APÊNDICE D - RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS RELACIONADOS A FLUIDODINÂMICA E BALANÇOS PSICROMÉTRICOS EM LEITO FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO	139

1 INTRODUÇÃO

As indústrias de alimentos, químicas e farmacêuticas têm usado extensivamente os equipamentos de leito fluidizado em diversos tipos de processos (SILVA, 2015), devido ao contato efetivo entre as partículas e a fase fluída, permitindo que a operação alcance altas taxas de transferência de calor e de massa (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Nas suas diversas configurações, os sistemas fluidizados podem ser aplicados na secagem de sólidos, na adsorção, em processo de aglomeração e granulação de partículas, no aquecimento e resfriamento de sólidos ou fluidos, em processo de recobrimento de partículas, em síntese e reações catalíticas, na combustão e gaseificação de carvão, no craqueamento de petróleo através do processo de Craqueamento Catalítico Fluido (*Fluid Catalytic Cracking* - FCC) e dentre outras aplicações (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

A literatura é amplamente concordante sobre os processos que utilizam o leito fluidizado gás-sólido, quanto ao aspecto de manutenção da estabilidade da fluidização durante as operações, de modo a se obter uma boa mistura das fases gasosa e sólida e, conseqüentemente, um alto desempenho (BATCHELOR, 1988; KOCH SANGANI, 1999; DIDWANIA, 2001; CHIRONE; MICCIO; SCALA, 2006; PARISE, 2007; SILVA et al, 2011; MANDICH; CATTOLICA, 2012; SILVA, 2015).

Entretanto, a qualidade da fluidização pode ser prejudicada em processos com altas temperaturas ou, até mesmo quando o conteúdo de umidade das partículas é elevado, onde a solução precisa ser atomizada diretamente no interior da coluna de fluidização (MARONGA, 1998).

Quanto aos aspectos do elevado teor de umidade do leito, Maronga (1998) afirma que as pontes líquidas entre as partículas são favorecidas, levando à aglomeração e acelerando a condição do fenômeno de defluidização, conhecido como *wet quenching* na literatura. Deste modo, identificando-se a região para a qual o leito tende, pode-se atuar no processo no momento exato em que as instabilidades aparecem, retornando o processo a condição desejada de fluidização (PARISE, 2007).

Para detectar a região de defluidização, a análise de flutuação de pressão no interior do leito pode ser utilizada. Através desta análise, é possível obter informações

importantes sobre a dinâmica do leite, além de apresentar uma natureza não-intrusiva nas medições, e ser economicamente viável (van der SCHAFF et al, 2002).

Em geral, as formas de processamento dos sinais produzem parâmetros de monitoramento que podem ser aplicáveis em uma ampla faixa de condições experimentais, informando as características de borbulhamento do leite (van der SCHAFF et al, 2002; SILVA et al, 2014, SILVA, 2015).

As flutuações de pressão são razoavelmente fáceis de serem medidas, requerendo um transdutor de pressão conectado em um ponto de medida no *plenum* que traduz a dinâmica global do leite (BROWN; BRUE, 2001).

Os sinais podem ser avaliados por três métodos: por análise de caos, utilizada em análise de séries temporais não lineares; por análise espectral, envolvendo o domínio da frequência, onde se emprega a Transformada de Fourier e pela análise estatística pura do conjunto de dados dos sinais, configurando a denominada análise no domínio do tempo.

Através dos sinais de flutuação de pressão, a metodologia da análise espectral Gaussiana desenvolvida por Parise (2007), possibilitou identificar as instabilidades no comportamento fluidodinâmico, tal como a diminuição da intensidade das bolhas, formação de canais preferenciais e aglomeração de partículas. Esta metodologia consiste na realização de uma análise estatística sobre a distribuição espectral de pressão, a qual é ajustada a uma função exponencial semelhante à função de distribuição normal Gaussiana.

Nos processos em que as partículas no leite fluidizado sofrem impactos de um sistema de atomização de líquidos, tais como para a produção de pós a partir de uma suspensão ou realização de recobrimento e granulação, os fatores que mantêm as condições estáveis no leite são dependentes da taxa de pulverização da solução líquida no leite, das temperaturas no sistema, da pressão de atomização, da umidade relativa do ar e do teor de umidade das partículas, da queda de pressão no leite e da velocidade do gás de fluidização (SILVA et al, 2011).

Diversas pesquisas têm sido realizadas nesta área, porém, até o momento, os trabalhos no contexto de secagem foram voltados em estudos que abrangem a dinâmica envolvendo apenas a queda de pressão e a qualidade do pó formado.

Adicionalmente, observou-se que a maioria dos trabalhos existentes na literatura segue o estudo da fluidodinâmica e secagem de suspensão diluída em leite

de jorro. Já em leitos fluidizados, constatou-se que existe uma certa carência em estudos usando sinais, abrindo novas possibilidades de pesquisas nesta área.

Com este intuito, a fim de contribuir nos estudos focando em secagem de suspensão diluída em leito fluidizado contendo partículas inertes (esfera de vidro e esferas de alumínio), realizou-se também um estudo dos fenômenos de transferência de calor nesta área, principalmente pelo grande número de aplicações práticas e pela necessidade de obter mais informações neste ramo.

1.1 JUSTIFICATIVA

O conhecimento do comportamento fluidodinâmico e térmico através da utilização de um sistema de monitoramento em tempo real na secagem de suspensão diluída é desejável para garantir um regime estável de fluidização e, conseqüentemente, elevar o desempenho do processo.

Durante a secagem de suspensão diluída é de grande importância manter um regime com estabilidade fluidodinâmica. Para isto, é necessário garantir a qualidade do processo, através do monitoramento dos parâmetros de queda de pressão, vazão de ar, vazão de atomização da suspensão diluída, temperaturas no sistema, umidades relativa e absoluta, com o intuito de evitar zonas de estagnação e aglomeração de partículas. Estes fatores podem comprometer a mistura entre as fases, gerando zonas com alto teor de umidade, e eventualmente, levando à condição do fenômeno de defluidização parcial ou total do leito, prejudicando a qualidade do produto final.

Portanto, a manutenção das condições estáveis do comportamento fluidodinâmico e térmico é um assunto a ser estudado, devido à complexidade e natureza imprevisível na interpretação dos regimes de leitos fluidizados.

Neste contexto, o presente trabalho foi realizado considerando a análise do comportamento fluidodinâmico e térmico em um secador em leito fluidizado gás-sólido. Para a análise da fluidodinâmica, foi utilizada a análise espectral Gaussiana, que é uma técnica baseada em medidas de flutuação de pressão no leito, visando evitar a possibilidade do fenômeno de defluidização e avaliar a influência das condições operacionais do processo. No estudo térmico, foi realizado um balanço de massa e de energia no leito, a fim de determinar o coeficiente volumétrico de transferência de calor, para as situações de fluidização estável.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Esse trabalho teve como objetivo geral realizar um estudo fluidodinâmico e térmico do processo de secagem de suspensão diluída com partículas inertes.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta dissertação de mestrado são:

- Estudar a fluidodinâmica do leito, com o intuito de avaliar a possibilidade de evitar o fenômeno de defluidização, avaliando a influências das condições operacionais como, vazão de atomização de suspensão (Q_{susp}), concentração da suspensão diluída (C_{susp}), além do tipo de material inerte no processo de secagem utilizando a análise espectral Gaussiana;
- Avaliar a influência das condições operacionais dos seguintes parâmetros psicrométricos do ar no processo de secagem: umidade relativa do ar (UR), umidade absoluta (Y), eficiência de secagem (E, R) e a força de secagem (DF);
- Determinar o coeficiente volumétrico de transferência de calor (\bar{h}_a) para as condições operacionais que permitem obter uma condição estável de fluidização.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi composto pelos seguintes capítulos:

No Capítulo 1 foi apresentada a introdução, assim como a justificativa do trabalho e os objetivos geral e específicos.

No Capítulo 2 foi realizada a revisão bibliográfica sobre o assunto dos leitos fluidizados, da análise de sinais de flutuação de pressão, do processo de secagem e da transferência de calor em sistemas gás-sólido.

No Capítulo 3 foi descrito o sistema experimental, os materiais e a metodologia utilizados nesta pesquisa.

No Capítulo 4 foram apresentados os resultados, abordando o estudo da fluidodinâmica do leito (avaliando a influências das condições operacionais como, vazão de atomização de suspensão, concentração da suspensão diluída e tipo do material inerte), a secagem (envolvendo a umidade relativa do ar, a umidade absoluta, a eficiência de secagem e a força de secagem) e a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de calor, nas condições estáveis de fluidização.

No Capítulo 5 foram apresentadas as principais conclusões e algumas sugestões para a continuação das pesquisas na área.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são descritos os fundamentos de fluidização, a análise de sinais e os trabalhos realizados na área envolvendo medidas de flutuação de pressão em leito fluidizado gás-sólido; na sequência, são apresentados os fundamentos de secagem de suspensão e estudos focando o processo de secagem; e por fim, a transferência de calor em leito fluidizado e os trabalhos envolvendo a troca térmica partícula-fluido.

2.1 FUNDAMENTOS DA FLUIDIZAÇÃO

Neste tópico abordam-se o conceito e as características da fluidização, os regimes fluidodinâmicos, a curva fluidodinâmica e a obtenção experimental da velocidade de mínima fluidização do gás. Adicionalmente, apresenta-se a classificação das partículas.

2.1.1 Conceito e Características da Fluidização

A fluidização é obtida quando um leito de partículas sólidas entra em contato com um gás, um líquido ou com ambos, adquirindo o comportamento de fluido. Sistemas de fluidização do tipo gás-sólido são caracterizados pela uniformidade de temperatura no leito e pelas altas taxas de transferência de calor e de massa, em função da intensa mistura sólido-fluido que é provocado pelo movimento das bolhas de gás (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

2.1.2 Regimes de Fluidização

Expansão do leito, formação de bolhas e de *slugs*, arraste de partículas, entre outros fenômenos, são características dos estados de fluidização, mais conhecidos como regimes fluidodinâmicos (TRNKA et al, 2000).

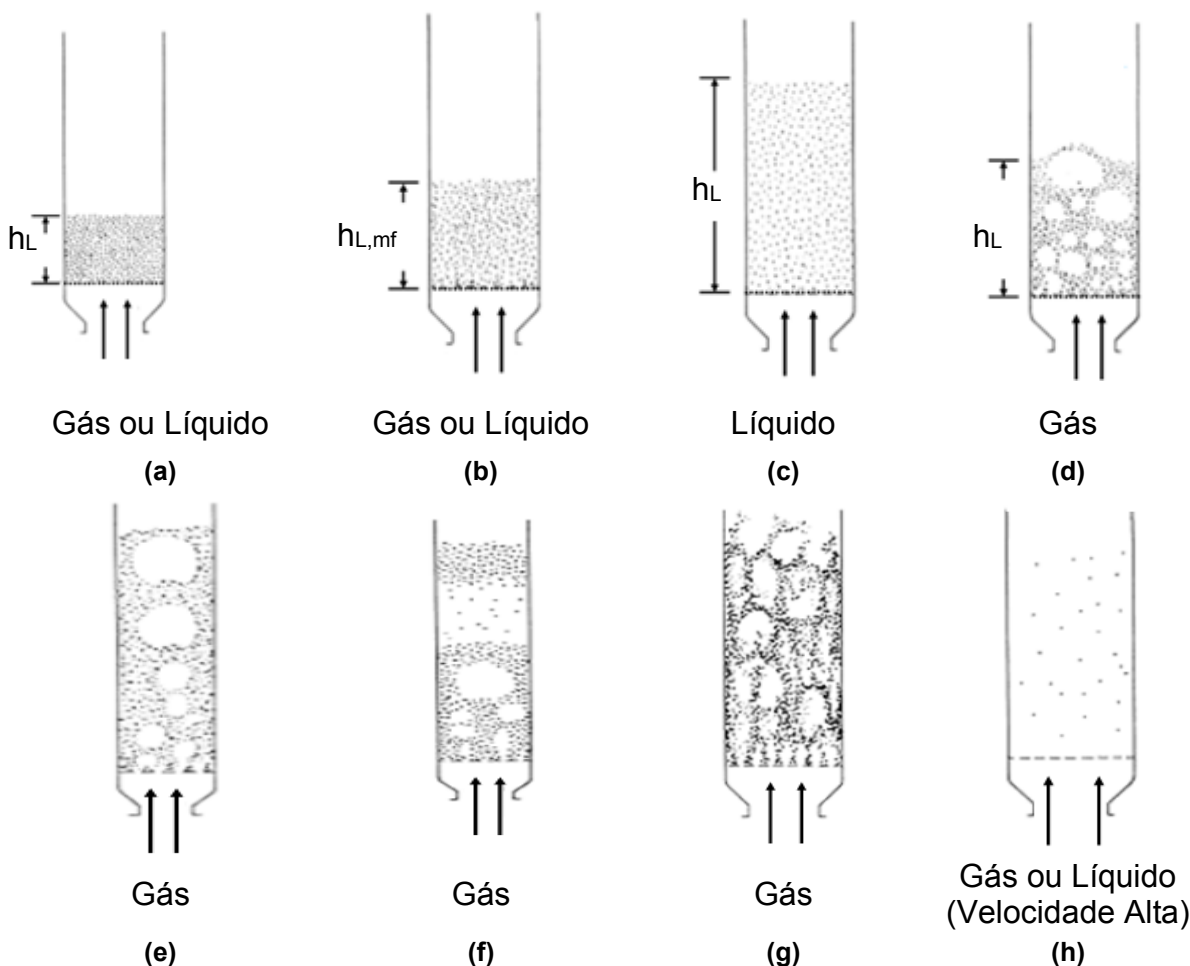
Os diversos regimes de fluidização que existem dependem das características físicas do particulado, tal como densidade aparente, esfericidade e diâmetro médio das partículas, e das características físicas do agente fluidizante, tal como a

velocidade do gás, viscosidade, temperatura, além da geometria do leito (TRNKA et al, 2000).

Considerando o escoamento de um fluido através dos espaços vazios de um leito constituído por partículas sólidas, a variação crescente de velocidade superficial do gás produz diversas configurações de movimento das partículas ou regimes de fluidização (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

A Figura 1 ilustra os tipos de regimes de contato existentes em sistemas gás-sólido, em função do aumento da velocidade superficial do fluido que proporciona o movimento.

Figura 1 – Regimes de Fluidização - (a) Leito Fixo; (b) Mínima Fluidização; (c) Fluidização Particulada; (d) Fluidização Borbulhante; (e) *Slugging (Slugs Axiais)*; (f) *Slugging (Slugs Completo)*; (g) Fluidização Turbulenta; (h) Transporte Pneumático



Fonte: Kunii e Levenspiel (1991)

Na condição de leito fixo, conforme mostrado na Figura 1(a), o fluido passa de forma ascendente através de um leito com partículas, a uma vazão baixa, apenas percolando pelos espaços vazios entre as partículas estacionadas.

Conforme há um aumento na vazão do fluido, ocorre expansão do leito com aparição de pequenas vibrações e movimentações em regiões restritas, esta configuração é conhecida como leito expandido.

Com o aumento da vazão, chega-se em uma condição em que todas as partículas são suspensas pelo fluxo ascendente do gás ou líquido. Nesta condição, as forças de arraste entre as partículas e o fluido contrabalançam o peso das partículas. Assim, a queda de pressão, ao longo de qualquer seção no leito, torna-se igual ao peso do fluido e das partículas. Neste momento, como mostra a Figura 1(b) o leito se encontra em condições de fluidização, sendo conhecido como leito fluidizado incipiente ou leito na mínima fluidização.

Em sistemas de fluidização líquido-sólido, o aumento da vazão acima da velocidade de mínima fluidização, procede em uma fluidização suave, com expansão progressiva do leito. Grandes instabilidades na vazão são amortizadas e permanecem pequenas, e a heterogeneidade, ou vazios de líquido em grande escala, não são observadas sob condições normais. Este tipo de configuração é denominado de leito fluidizado homogêneo, ou suave, ou leito fluidizado particulado, conforme visualizado na Figura 1(c).

Já as configurações de sistemas do tipo gás-sólido comportam-se de forma diferente. Com um aumento da vazão acima da mínima fluidização, como mostrado na Figura 1(d), verifica-se uma grande instabilidade do leito, com formação de bolhas e canais preferenciais de gás. Vazões de fluido ainda superiores provocam agitações mais violentas e o movimento dos sólidos torna-se mais vigoroso. Pode-se observar também que o leito não expande consideravelmente, mantendo o seu volume próximo ao volume na condição de mínima fluidização. Este tipo de configuração recebe o nome de leito fluidizado agregativo, leito fluidizado heterogêneo ou leito fluidizado borbulhante.

Em sistemas gás-sólido, bolhas de gás coalescem e aumentam conforme ascensão no leito. Em um leito com diâmetro pequeno e consideravelmente profundo, as bolhas podem, eventualmente, tornar-se grandes o suficiente para expandir-se pela coluna. Este tipo de configuração é conhecido como *slugging* ou *slugs* axiais (escoamento pistonado), como mostra na Figura 1(e).

Com partículas grandes, a porção do leito acima das bolhas é empurrada para a parte superior, como um pistão; as partículas descem, e conforme vão subindo, estas porções de sólidos desaparecem. Após este tempo, outros *slugs* formam-se, e

o movimento oscilatório instável é repetido. Esta configuração é chamada de *slug* completo (Figura 1(f)).

Quando se atinge a velocidade de transporte (u_{tr}) das partículas, têm-se a configuração denominada de leito fluidizado rápido, com região densa turbulenta, conforme mostrado na Figura 1(g).

Com um incremento adicional na velocidade do gás, as partículas são elutriadas do leito com o fluido, apresentando-se o denominado leito fluidizado disperso, diluído, ou leito fluidizado de fase leve com transporte pneumático de sólidos, conforme visualizado na Figura 1(h).

2.1.3 Curva Fluidodinâmica e Velocidade de Mínima Fluidização (u_{mf})

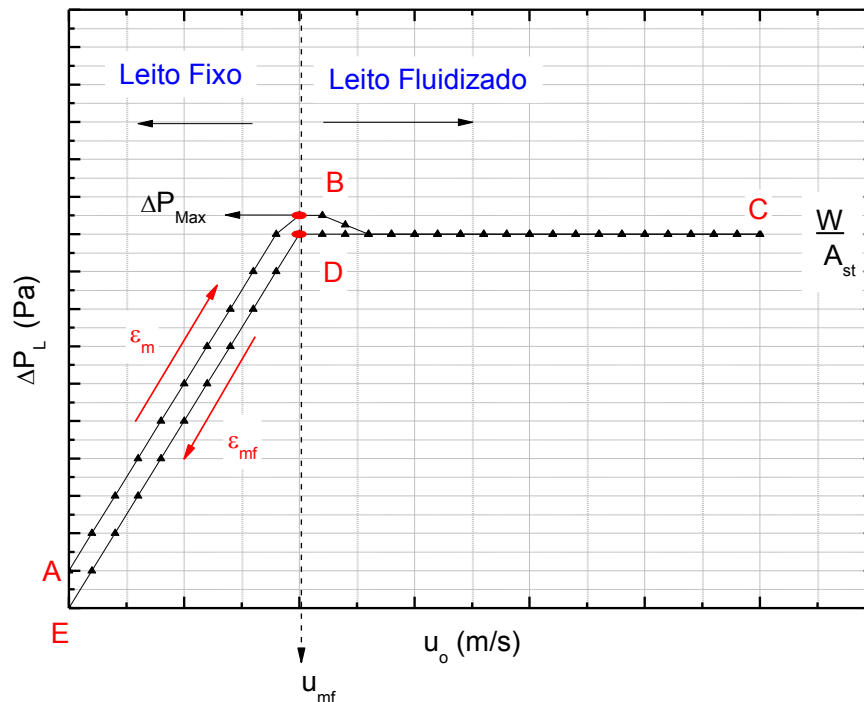
A curva fluidodinâmica (Gráfico 1) é uma forma de obtenção experimental da velocidade de mínima fluidização, que relaciona a queda de pressão no leito (ΔP_L) e a velocidade superficial do gás (u_o) em um leito de partículas.

No Gráfico 1, pode-se observar que para baixos valores de velocidades superficiais do gás, o regime de fluidização é do tipo leito fixo (região AB), e a queda de pressão do leito é proporcional à velocidade superficial do gás. Com o incremento da velocidade do gás, atinge-se uma queda de pressão máxima, identificada por $\Delta P_{máx}$.

A partir dessa condição, o acréscimo da velocidade do gás faz com que o leito fixo se expanda, aumentando a porosidade do leito (ϵ_m) para porosidade na mínima de fluidização (ϵ_{mf}). Essa ampliação provoca uma redução na queda de pressão.

A fluidização inicia-se a partir do ponto B e, com uma velocidade superficial do gás superior à de mínima fluidização, o leito expande-se e as bolhas de gás tornam-se visíveis, resultando na fluidização heterogênea, identificada na região BC. Nesta região, a queda de pressão no leito (ΔP_L) mantém-se praticamente constante, independente do aumento da velocidade superficial do gás.

Gráfico 1 – Curva fluidodinâmica típica para o leito fluidizado



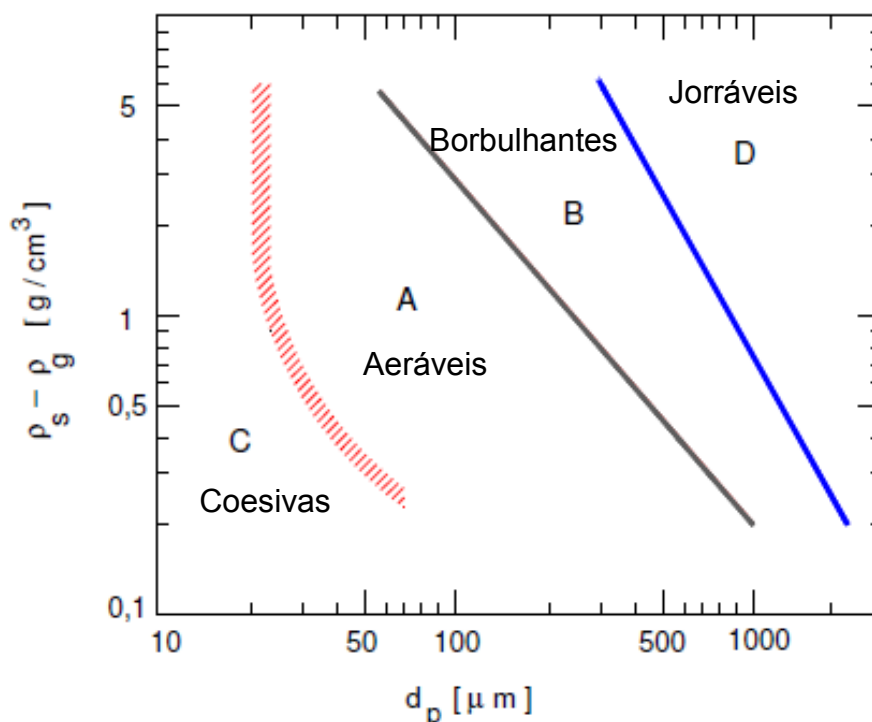
Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991)

Entretanto, quando há a redução da velocidade superficial do gás, a partir do ponto C, têm-se a variação da porosidade do leito (região DE). É nesta curva CDE que é obtida experimentalmente a u_{mf} , através do ponto de transição entre o leito fluidizado e o leito fixo na taxa decrescente de velocidade, identificada pelo ponto D.

2.1.4 Classificação das Partículas Sólidas

Em 1973, Geldart realizou experimentos que permitiram classificar as partículas sólidas em quatro categorias, quanto ao tipo de movimento que desempenham no escoamento gás-sólido. O Gráfico 2 apresenta um diagrama do diâmetro do particulado e da densidade do sólido e do gás, ambos em escala logarítmica, para determinar a que grupo o material sólido pertence, quanto ao tipo de movimento dinâmico operante no leito. As características de cada tipo de partícula são apresentadas a seguir.

Gráfico 2 – Classificação de Geldart (1973) de partículas com ar e em condições ambientais



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991) apud Parise (2007)

O Grupo C, conhecido como grupo das partículas coesivas, é formado por partículas consideradas muito finas. A fluidização dessas partículas é extremamente difícil, devido às forças interpartículas serem maiores que as forças resultantes da ação do gás. Porém, ela é possível ou aprimorada através da utilização de agitadores mecânicos ou vibração para evitar a formação de canais preferenciais. A fluidização com este tipo de partículas caracteriza-se por mistura gás-sólido muito baixa. Como exemplo de materiais sólidos pertencentes a esse grupo é possível citar o amido, a farinha de trigo e o pó facial.

As partículas pertencentes ao Grupo A, chamadas de aeráveis, possuem diâmetro médio pequeno e/ou densidade baixa (menor que 1400 kg/m^3). Quando essas partículas são fluidizadas, o leito expande consideravelmente antes do aparecimento de bolhas. Em $u_o > u_{mb}$, as bolhas de gás elevam-se mais rapidamente que o fluxo de gás e percolam pela emulsão. Um exemplo característico deste grupo são as partículas de FCC.

No Grupo B, comumente chamado de grupo borbulhante, as partículas apresentam diâmetro médio na faixa de 40 a 500 μm , e densidade entre 1400 e 4000 kg/m^3 . As forças interpartículas são desprezíveis, e a formação das bolhas é

iniciada logo acima da velocidade de mínima fluidização (u_{mf}), desse modo, a razão entre a velocidade mínima de borbulhamento e velocidade de mínima fluidização é muito próximo da unidade ($u_{mb}/u_{mf} \cong 1$). O tamanho das bolhas aumenta com a altura do leito e com a velocidade do gás em excesso ($u_o - u_{mf}$). A expansão do leito é pequena e seu colapso ocorre rapidamente quando se interrompe o fornecimento de gás fluidizante. Areia é um exemplo de material pertencente a esse grupo.

As partículas jorráveis são do Grupo D (são geralmente maiores que 1 mm e/ou densas, superiores a 4000 kg/m^3). A fluidização é dificultada caso o leito dessas partículas seja profundo. Este grupo oferece pequena expansão do leito e baixa mistura das partículas. Como exemplos podem-se citar as esferas de vidro e de alumínio, os grãos de café e de feijão.

2.2 ANÁLISE ESPECTRAL (TRANSFORMADA DE FOURIER)

A técnica que utiliza medidas de flutuação de pressão no interior de leitos fluidizados tem sido amplamente empregada em estudos do comportamento dinâmico de sistemas particulados (SCHOUTEN; van den BLEEK, 1998).

De acordo com Dhodapkar e Klinzing (1993), as flutuações de pressão em sistemas de leito fluidizado são afetadas pelo diâmetro do leito, pelas características físicas do material particulado na análise experimental, pelo tipo de distribuidor, localização das tomadas de pressão através do leito, pela altura do leito fixo e pela velocidade superficial do gás.

Estes sinais de pressão podem ser avaliados mediante três métodos: por análise de caos, utilizada em análise de séries temporais não lineares; por análise espectral, envolvendo o domínio da frequência ou Fourier; e pela análise estatística, através do domínio do tempo (SCHOUTEN; van den BLEEK, 1998).

A análise espectral que abrange a transformada de Fourier, foi utilizada para a obtenção dos dados experimentais desta dissertação. Por este motivo, esta análise será elucidada com mais detalhes a seguir.

A análise no domínio da frequência é uma ferramenta muito utilizada para a investigação de sinais de flutuação de pressão em leito fluidizado. Este tipo de análise é conduzida aplicando a transformada de Fourier. As transformadas e inversas de Fourier são definidas pelas Equações (1) e (2), respectivamente:

$$\text{Transformada de Fourier: } X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j.2\pi ft} dt \quad (1)$$

$$\text{Transformada Inversa de Fourier: } x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j.2\pi ft} df \quad (2)$$

Onde:

X(f): Transformada de Fourier de x(t).

Uma aproximação deve ser realizada, visto que, na realidade física, os sinais são processados usando a transformada de Fourier são discretos e finitos. Desta forma, o cálculo da Transformada de Fourier Discreta (*Discret Fourier Transform - DFT*) considera o sinal amostrado tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Admitindo-se um sinal discreto no tempo x(n), com duração finita para N pontos de dados, a DFT e a DFT Inversa são definidas conforme descrito nas Equações (3) e (4), respectivamente:

$$\text{DFT: } X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-\frac{j.2\pi kn}{N}}, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (3)$$

$$\text{DFT Inversa: } x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{\frac{j.2\pi kn}{N}}, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (4)$$

Além disso, o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) têm sido amplamente utilizados para fins de implementação computacional. O número de amostras no domínio do tempo é representado pela letra N (sendo esta uma potência de 2, devido ao modo de representação binário, e também porque o algoritmo da FFT opera com um número de amostras nessa potência).

Quando se utiliza a FFT no processamento de sinais, de acordo com o critério de *Nyquist*, a frequência da taxa de amostragem do sinal deve ser pelo menos duas vezes o valor da máxima frequência do sinal. Caso este critério seja violado, ocorre o chamado *aliasing*, ou seja, o fenômeno de sobreposição dos sinais. Desta forma, quando o critério de *Nyquist* é infringido, as componentes de frequência acima de metade da frequência de amostragem aparecem como componentes de frequência inferiores à metade da frequência de amostragem, resultando em uma representação errônea do sinal.

A representação dos sinais no domínio da frequência pode ser realizada através de espectro de potência (EP), ou também, através de uma densidade espectral de potência (DEP). O espectro de potência de um sinal $x(t)$ é definido conforme as expressões a seguir:

$$EP: S_{xx}(f) = X(f)X^*(f) = |X^2(f)| \quad (5)$$

$$DEP = S_{xx}(f) = \frac{1}{\Delta f} X(f)X^*(f) = \frac{|X^2(f)|}{\Delta f} \quad (6)$$

Onde $X^*(f)$ é o complexo conjugado de $X(f)$.

Em diversos casos, o principal interesse pela análise espectral se deve a estudos por frequências dominantes presentes nas séries temporais de pressão, as quais estão relacionadas na intensidade de borbulhamento do leito, por exemplo. Além disso, normalmente utiliza-se frequências dominantes a uma taxa de amostragem com 20 Hz, visto que a maior frequência de leito fluidizado observável em sistemas gás-sólido, através de medidas de flutuação de pressão, fica abaixo de 10 Hz (KAGE et al, 2000; de MARTIN et al, 2011).

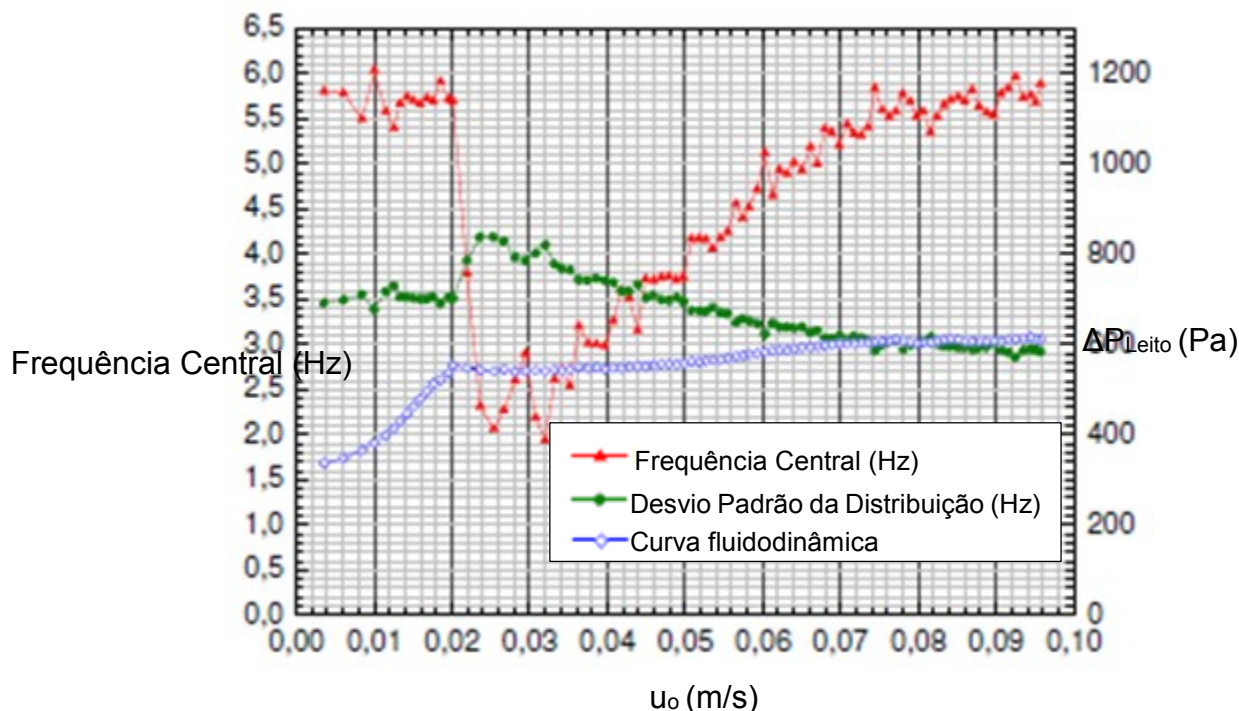
A avaliação do conteúdo de energia dos espectros de pressão, originados a partir da aplicação da transformada de Fourier sobre os sinais temporais, também tem sido estudado como uma maneira alternativa de monitoramento dos regimes fluidodinâmico, através da discretização do conteúdo de energia em faixas de

frequência (JOHNSSON et al, 2000; van OMMEN et al, 2011; GÓMEZ-HERNÁNDEZ et al, 2012).

O ajuste dos espectros de pressão às funções de distribuição com base estatística tem sido realizado para entender o comportamento médio da dinâmica do leito. Em 2007, Parise realizou um estudo com o intuito de avaliar e detectar a região de defluidização do leito, ajustando os espectros de potência à uma Curva Gaussiana, obtendo-se assim dois parâmetros, a frequência média Gaussiana (chamada também de frequência central) e o desvio padrão da distribuição espectral. Estes foram utilizados para avaliar as transições dos regimes fluidodinâmicos.

No trabalho de Parise (2007) foram realizados os experimentos em atmosfera seca, em uma coluna de acrílico de 0,143 m de diâmetro interno e 0,71 m de altura do leito. Os sólidos utilizados foram areia com diâmetro médio de partícula de 0,180; 0,325 e 0,460 mm e CMC de diâmetro médio de partícula de 0,180; 0,325 e 0,460 mm. O Gráfico 3 mostra o gráfico da frequência central juntamente com o desvio padrão da distribuição espectral sobre a curva fluidodinâmica, obtidos com a redução da velocidade superficial do ar, para as partículas de celulose microcristalina com diâmetro médio da partícula de 0,180 mm, altura do leito fixo de 0,15 m e velocidade de mínima fluidização de 0,022 m/s, identificando a região de defluidização. A queda acentuada dos valores de frequência central, comparada juntamente com o comportamento da curva fluidodinâmica, verifica a região onde o leito tende à condição do fenômeno de defluidização. Através deste método, foi possível identificar não apenas visivelmente a região onde o leito está tendendo à defluidização, mas também, determinar a região através de parâmetros espectrais das séries temporais.

Gráfico 3 – Evolução da frequência central e desvio padrão da distribuição espectral sobre a curva fluidodinâmica – CMC, $d_p=0,180$ mm, $h_L = 0,15$ m, $u_{mf}= 0,022$ m/s



Fonte: Adaptado de Parise (2007)

2.3 TRABALHOS DA LITERATURA SOBRE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO EM LEITO FLUIDIZADO

Neste item são apresentados os trabalhos relacionados à atmosfera seca (sem adição de água) e os trabalhos relacionados à atmosfera úmida (com atomização contínua de líquido no interior do secador), ambos utilizando a análise de flutuação de pressão em leito fluidizado gás-sólido.

2.3.1 Trabalhos relacionados à Atmosfera Seca

Visando a utilização de medidas de flutuação de pressão, com o intuito de estudar o comportamento dinâmico em leito fluidizado, Johnsson et al (2000) e van Ommen et al (2011) compararam a análise estatística, análise espectral e a análise de caos para verificar como se comportavam as flutuações de pressão em processos de fluidização. Os resultados mostraram que a análise de caos e frequência dominante (espectro de potência), estão em acordo entre si e podem ser empregadas para se complementar. Na análise no domínio do tempo, os autores verificaram que a

identificação das regiões não é precisa, levando a conclusões errôneas (para identificar a transição do regime borbulhante para o turbulento, nas condições específicas que os autores utilizaram) sobre as flutuações de pressão em processos de fluidização.

Bi e Chen (2003) estudaram as flutuações de pressão em leito fluidizado gás-sólido com diâmetro da coluna de 0,05; 0,1; 0,29; 0,60 e 1,56 m. Partículas de FCC com diâmetro médio de 75 μm . Os autores observaram que a máxima amplitude ou desvio padrão das flutuações de pressão foram visualizadas com o aumento da velocidade superficial do ar e da altura do leito fixo em leito fluidizado borbulhante, mas foram insensíveis com o aumento da altura do leito fixo em leitos profundos. A amplitude aumentou com a altura do leito fixo em leitos rasos, porém em leitos profundos tornou-se invariante. Desta forma, sugeriram que a flutuação de pressão global no leito fluidizado borbulhante não vem apenas de uma única fonte, mas sim, da superposição de flutuações locais, ou seja, das ondas de pressão e oscilações resultantes da formação de erupções de bolhas na região do distribuidor e da superfície superior do leito.

Felipe (2004) identificou e caracterizou diversos regimes de fluidização através de medidas de flutuações de pressão. O autor utilizou a transformada de Fourier para análise dos resultados. Foram utilizadas duas colunas de fluidização em acrílico, com diâmetro interno e altura de 0,11 m e 1,5 m (coluna I), e 0,14 m e 0,80 m (coluna II), respectivamente. Os experimentos foram realizados com 12 tipos diferentes de material sólido. A frequência de amostragem foi mantida em 100 Hz e foram adquiridas 8.192 medidas de pressão. Além disso, Felipe (2004) verificou as medidas de pressão na câmara *plenum* e em 5, 15, 25 e 35 cm acima do distribuidor de ar. O autor concluiu que a tomada de pressão localizada no *plenum* fornece dados de flutuação de pressão que refletem um somatório de todos os movimentos que acontecem no interior do leito de partículas situado na parte superior desta localização. Esses movimentos são bolhas de ar e das partículas no interior do leito, erupções destas bolhas na superfície do leito, aglomeração de sólidos, entre outros. Assim, de acordo com o autor, a tomada de pressão no *plenum* considera-se um local adequado para a aquisição dos sinais de pressão, pois o sensor não sofre qualquer tipo de interferência ocasionada por partículas finas. Em relação à identificação e distinção de regimes de fluidização, o autor observou que, para um mesmo regime de

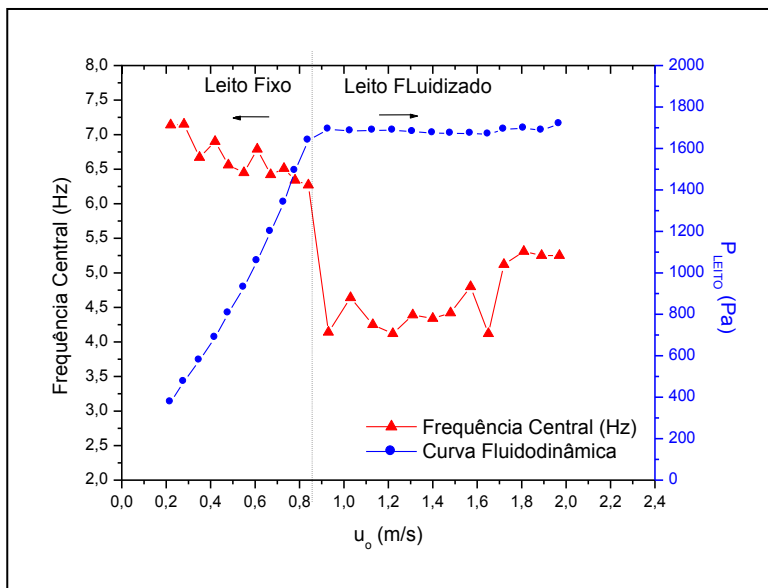
contato, os espectros de pressão obtidos com sólidos diferentes não possuem somente frequências dominantes aproximadas, mas também bandas semelhantes.

Fonseca (2009) realizou um estudo utilizando medidas de flutuação de pressão em leito fluidizado circulante com partículas de areia com classificação do tipo B de Geldart (1973). Com o aumento da velocidade superficial do gás foi possível realizar experimentos desde a condição de leito fixo até a do leito fluidizado rápido. Das leituras de pressão, as quais foram analisadas no domínio da frequência aplicando a transformada de Fourier, foi possível distinguir o comportamento dos regimes de fluidização do leito.

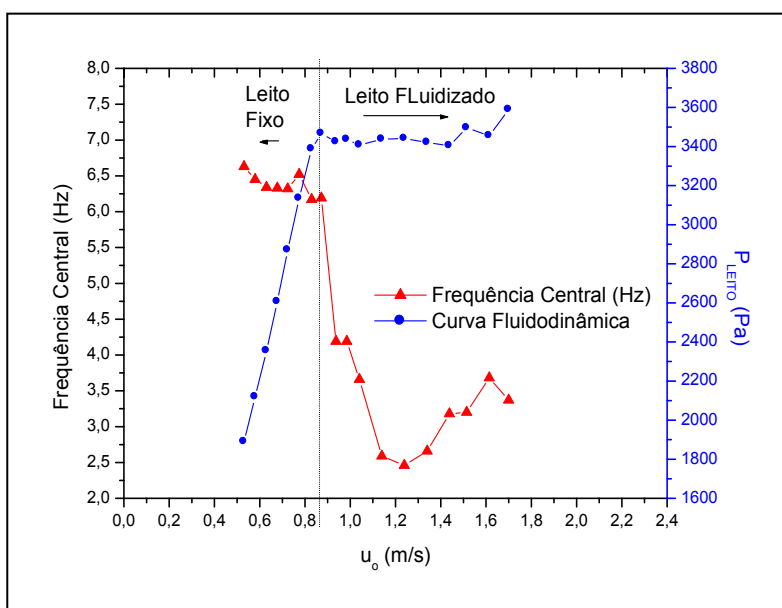
Parise et al (2013) analisaram a região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido através de medidas de flutuação de pressão no leito. Neste trabalho foi utilizada a metodologia da análise espectral Gaussiana. Os experimentos foram realizados em uma coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e 1 m de altura. O material particulado utilizado foi composto por esferas de vidro com diâmetro de 1 a 2 mm. No experimento foram observados a influência da alteração da massa de material no leito e o diâmetro das partículas. O equipamento experimental utilizado para a realização dos ensaios foi instrumentado com transdutores de pressão de resposta rápida, acoplado a um sistema de aquisição e processamento de sinais, composto por uma placa de aquisição de dados, um computador e pelo *software* LabVIEW 10.0™. Foram coletadas 2.048 medidas de pressão no *plenum* a uma taxa de amostragem de 400 Hz.

Os resultados deste estudo mostraram a evolução da frequência central sobre a curva fluidodinâmica para as esferas de vidro, obtidas através da redução da velocidade superficial do ar. Os autores verificaram que o valor da frequência central sofre um decréscimo quando o leito está tendendo à defluidização (Gráfico 4), o que pode ser verificado com o auxílio da curva fluidodinâmica. Observou-se que em ambas as condições experimentais, a região de defluidização é identificada claramente. Esta região é definida pelo valor de frequência central mínima e posteriormente ela sofre um acréscimo, até atingir o regime de leito fixo (PARISE et al, 2013).

Gráfico 4 – Evolução da frequência central e da curva fluidodinâmica. (a) $d_p=1,55$ mm; $h_L=0,10$ m; (b) $d_p=1,55$ mm; $h_L=0,20$ m



(a)



(b)

Fonte: Parise et al, 2013

He et al (2014) realizaram a análise estatística e de frequência a partir de medidas de flutuação de pressão em leito fluidizado com partículas não-esféricas, para investigar o comportamento dinâmico da transição do regime borbulhante para o turbulento. Os autores utilizaram partículas não-esféricas do Grupo B e D de Geldart, com diâmetro médio de 0,33 e 0,75 mm, e esfericidade de 0,93 e 0,71,

respectivamente. Os autores verificaram que o desvio padrão da medida de flutuação de pressão no leito aumentou com a velocidade do gás, enquanto que a medida no *plenum* manteve-se constante. As partículas finas exerceram uma maior influência sobre o comportamento dinâmico do leito fluidizado, promovendo a transição do regime borbulhante para o turbulento. O espectro de pressão foi calculado utilizando o método de auto-regressão (AR). A dinâmica do leito fluidizado foi caracterizada pela maior frequência do espectro de flutuação de pressão, observada variando na faixa de 1,5 a 3,0 Hz.

2.3.2 Trabalhos relacionados à Atmosfera Úmida

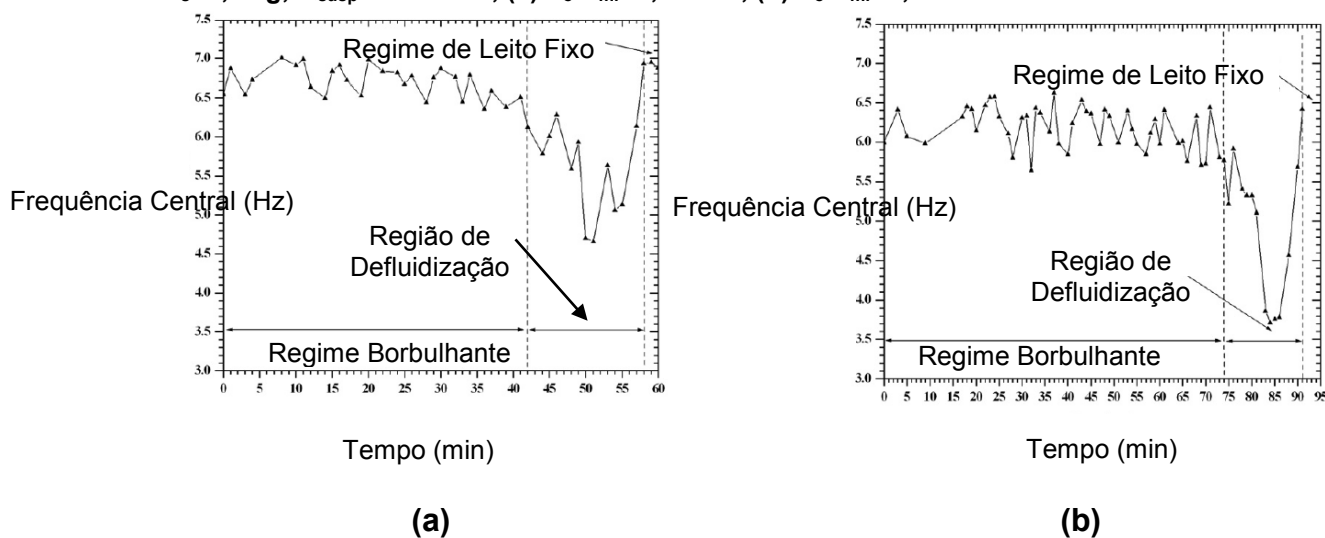
Em relação aos trabalhos com atmosfera úmida, Moris et al (2006) realizaram um estudo do monitoramento do processo de recobrimento de partículas em leito fluidizado. Neste estudo, foi utilizada a análise de frequência dominante, a partir de medidas de flutuação de pressão. Os experimentos foram realizados com CMC com diâmetro médio da partícula de 360 μm e, como pasta, foi utilizado uma suspensão polimérica a base de Eudragit®. A frequência de amostragem utilizada pelos autores foi de 400 Hz e com 8.192 medidas em cada tomada de pressão. A velocidade superficial do gás foi mantida em 0,14 m/s em todos os ensaios experimentais. Os pesquisadores observaram que a taxa de circulação das partículas, formação de canais preferenciais e pequenos aglomerados, *slug* de parede, zonas mortas e o colapso do leito resultaram em mudanças no espectro de potência, resultado da aplicabilidade da metodologia utilizada no processo de recobrimento de partículas.

Parise et al (2011) realizaram um estudo sobre como identificar a região de defluidização em recobrimento em leito fluidizado usando a frequência média Gaussiana. Nesta pesquisa, os autores utilizaram uma coluna de acrílico de 0,71 m de altura e 0,143 m de diâmetro interno, na temperatura de 70 °C. Para a fluidização, utilizaram a celulose microcristalina com diâmetro médio de 325 μm , a qual foi recoberta por uma suspensão à base de Eudragit®. Os dados de pressão no *plenum* foram coletados com uma taxa de amostragem de 400 Hz, considerando 2.048 medidas de pressão. O *software* utilizado para todos os dados de aquisição e processamento de sinais foi o LabVIEW™ versão 7.1.

Os autores observaram que durante os primeiros 42 minutos do processo, o regime de fluidização se manteve borbulhante e o valor da frequência ficou entre 6,5 a 7,0 Hz (Gráfico 5(a)). Entre o tempo de 42 a 58 minutos de operação, ocorreu o fenômeno de defluidização e, com as observações visuais do leito, os pesquisadores puderam perceber uma diminuição da mistura das partículas, formação de canais preferenciais e aglomeração. A quantidade elevada de recobrimento de suspensão no leito, conduziu a uma diminuição acentuada na frequência central, atingindo valores de 4,7 Hz, indicando que o teor de umidade no leito aumentou e o processo de secagem do recobrimento do filme já não era eficiente. Quando alcançado o tempo de 59 minutos, o leito de partículas não apresentou movimento, levando ao regime de leito fixo, conduzindo ao aumento de frequência central com valores de aproximadamente 7,0 Hz (PARISE et al, 2011).

Comparando o Gráfico 5(a e b), os autores observaram que utilizando uma velocidade de ar excedente na fluidização ($u_o - u_{mf} = 0,20$ m/s), promoveu um maior tempo do regime borbulhante múltiplo, com tempo de 74 minutos no Gráfico 5(b). Em ambos os experimentos, os pesquisadores observaram e identificaram a transição de regimes, borbulhante ou múltiplo para a região de defluidização, e por fim, o regime de leito fixo. Além disso, os autores concluíram que com uma alta taxa de recobrimento e massa de partículas no leito, combinado com uma baixa velocidade de fluidização do ar, o regime borbulhante foi observado em um tempo menor (24 minutos) de experimento e frequência central em torno de 6,25 Hz. Os autores concluíram que a região de defluidização pode ser claramente identificada utilizando esta metodologia, a qual possui alto potencial em aplicações industriais, especialmente por se tratar de controle *online* com o objetivo de evitar a região de defluidização e conseqüentemente a perda de eficiência do processo de recobrimento (PARISE et al, 2011).

Gráfico 5 – Evolução da frequência média Gaussiana versus tempo. Condição de Operação: m_s : 0,9 kg, Q_{susp} : 6 mL/min, (a) u_o-u_{mf} : 0,16 m/s, (b) u_o-u_{mf} : 0,20 m/s



Fonte: Adaptado de Parise et al (2011)

Silva et al (2011) estudaram o fenômeno de defluidização, aplicando a metodologia da distribuição espectral Gaussiana de pressão, para o monitoramento e controle deste fenômeno em processos de recobrimento de partículas em leito fluidizado, utilizando CMC de diâmetro médio de 0,325 mm como sólido particulado. O sistema experimental era composto por uma coluna acrílica de 0,143 m de diâmetro interno e 0,70 m de altura. Todos os experimentos foram mantidos a uma temperatura do ar de entrada de 70 °C.

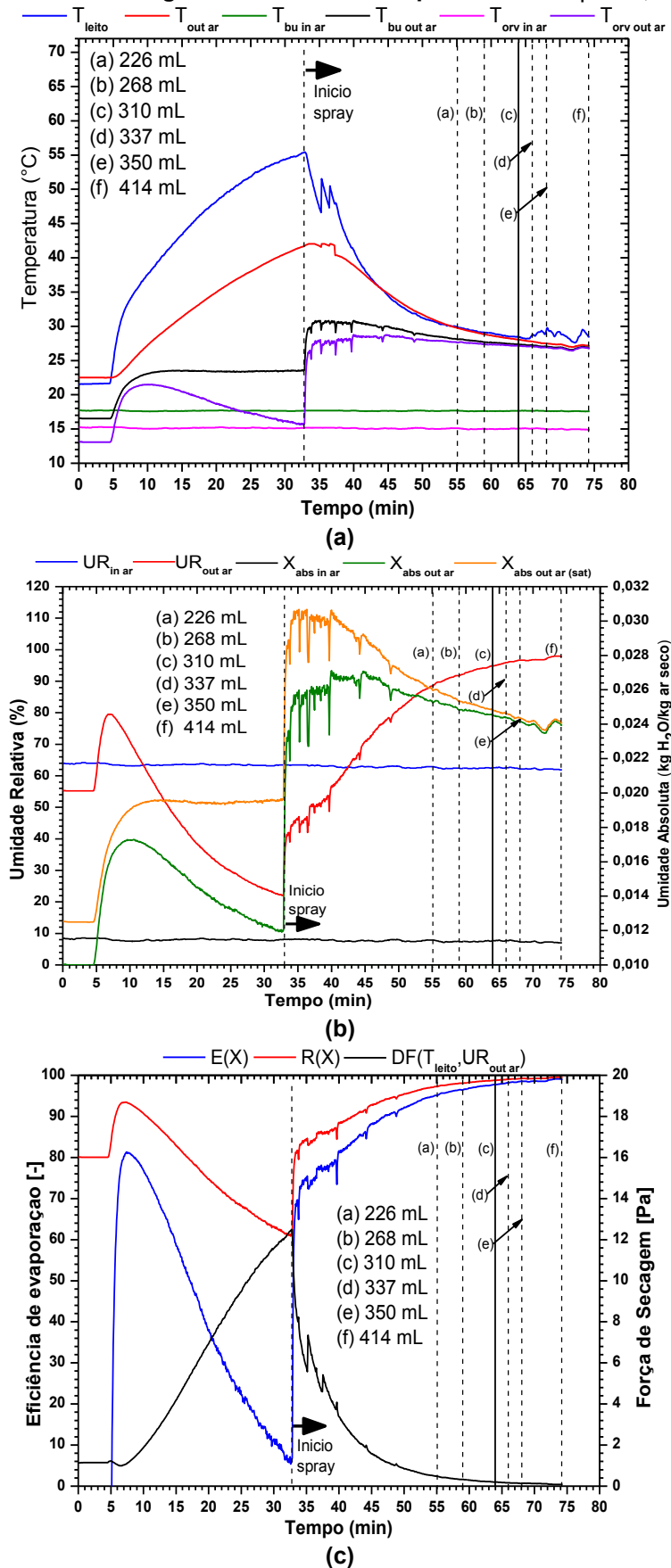
O trabalho de Silva et al (2011) foi realizado em duas etapas, em primeira estância, o monitoramento dos regimes de fluidização durante o processo de recobrimento sem controle; e em seguida, o controle da taxa de fluxo de ar e da taxa de fluxo de suspensão de recobrimento utilizando controlador Proporcional Integral (PI). Os parâmetros como fluxo de suspensão de recobrimento e a velocidade do ar em excesso em relação à velocidade de fluidização mínima com temperatura de 70°C foram alterados durante o processo. Com esta metodologia, foi possível identificar as transições dos regimes de fluidização e permitiu definir uma faixa de frequência de 6,0 a 7,0 Hz de regime estável, onde este valor foi colocado como valor de *set-point* do controlador para manipular o sinal de comando do conversor de frequência e para a bomba peristáltica. Foram coletadas 2.048 medidas de pressão no *plenum* a uma taxa de amostragem de 400 Hz. Os experimentos em malha fechada mostraram que a

utilização de um sistema de controle pode permitir a obtenção de condições melhores da fluidodinâmica do leito em relação ao processo sem controle (SILVA et al, 2011).

Em 2015, Silva aplicou tecnologias analíticas de processo e inteligência artificial para monitoramento e controle de processos de recobrimento de partículas em leito fluidizado. A fim de monitorar a estabilidade do regime de fluidização em processos de recobrimento de partículas, foi utilizado na análise fluidodinâmica, a metodologia de análise espectral Gaussiana dos sinais de flutuação de pressão (Parise (2007)), para o desenvolvimento de sistemas de controle baseados em inteligência artificial (Lógica *Fuzzy*). Como material recoberto, foi utilizado CMC MC-500. Nos ensaios de secagem, foi utilizado partículas de ácido adípico. Os experimentos foram realizados em uma coluna de fluidização de diâmetro interno de 0,143 m e altura de 0,70 m. Os dados de pressão no *plenum* foram coletados com uma taxa de amostragem de 400 Hz, considerando 2.048 medidas de pressão no *plenum*. O *software* utilizado para todos os dados de aquisição e processamento de sinais foi o LabVIEW™ versão 8.6.

O autor fez ainda o acompanhamento do perfil de temperatura do leito (Gráfico 7(a)) e das temperaturas que originaram dos balanços psicrométricos, temperatura de bulbo úmido e de orvalho da saída, além das temperaturas de bulbo seco do ar na entrada e na saída do processo. Além disso, avaliou os perfis de umidade (absoluta e relativa do ar) (Gráfico 7(b)), eficiência de evaporação e força de secagem (Gráfico 7 (c)) (SILVA, 2015).

Gráfico 6 – (a) Perfil de temperatura do gás e do leito. (b) Perfil de umidade do gás. (c) Parâmetro de eficiência de secagem. Sem controle de processo. $Q_{susp} = 10,0$ mL/min.



Fonte: Silva (2015)

No Gráfico 7(a), o autor verificou a redução da temperatura do leito e do ar de saída, logo com o início da atomização da suspensão. O leito tende a saturação de umidade, visualizado através do perfil de temperatura. As partículas tendem à temperatura de bulbo úmido do ar de saída (SILVA, 2015).

No Gráfico 7(b), os perfis de umidade indicaram a aproximação com a condição de saturação do leito pelo excesso de umidade nas partículas e no interior do leito. Um pico máximo de umidade absoluta do ar é atingido durante um período transiente decorrente ao início da atomização e da distribuição da umidade no interior do leito e sobre as partículas. Na região de defluidização, a umidade absoluta do ar da saída tende à umidade na condição de saturação adiabática e a umidade relativa aproximou-se de 100% (SILVA, 2015).

No Gráfico 7(c), quando as eficiências (E e R) aproximam-se de 100% é um indicativo de que a energia térmica do gás de entrada ($T_{plenum} = 70^{\circ}\text{C}$), não é suficiente para garantir boas condições de secagem, isto é, as partículas estão muito úmidas e existe forte tendência à aglomeração. A força de secagem (DF) é uma função altamente dependente da temperatura do leito e foi reduzida drasticamente em função do tempo de granulação (SILVA, 2015).

Adicionalmente, Silva (2015) menciona que o monitoramento simultâneo da estabilidade do regime de fluidização, permite determinar o ponto de interrupção da fase de atomização e início da fase de secagem. O autor concluiu que a defluidização foi detectada por modificações relacionados à faixa definida como estável (frequência média superior a 6,0 Hz e desvio padrão espectral inferior a 3,7 Hz).

2.4 FUNDAMENTOS DA SECAGEM

Secagem é uma operação de remoção mássica de substâncias voláteis (umidade, por exemplo) de uma matriz sólida, para a obtenção de um produto seco, através do fornecimento de energia térmica ao sistema sólido de interesse. É uma operação termofísica e físico-química que abrange a transferência de calor e de massa. Este processo está presente em quase todos os setores industriais, agrícola, farmacêutico, alimentício e entre outros (MUJUMDAR, 2006).

De acordo com Mujumdar (2006), quando uma partícula fica exposta ao processo de secagem, ocorrem dois fenômenos simultâneos, a transferência de

energia, normalmente na forma de calor, onde ocorre a evaporação da umidade superficial na partícula para o ambiente circundante (através do mecanismo de convecção) e a transferência de massa, que se refere à umidade do interior da partícula para a sua superfície desta, e subsequente à evaporação referente ao primeiro processo.

A remoção da umidade é função da natureza física do sólido, da temperatura e do conteúdo de umidade. Desta forma, a umidade contida no sólido é classificada em umidade superficial, que se refere à quantidade de água líquida que forma um filme externo recobrendo o material referente aos efeitos de tensão superficial; umidade ligada, que é a quantidade de água exercendo uma pressão de vapor menor que a do líquido puro, em uma determinada temperatura. Essa ocorrência pode ser relativa ao fato da umidade estar entre os poros capilares finos, com superfícies fortemente curvas; conter uma grande proporção de sólidos dissolvidos, ou pode estar em combinação física numa estrutura orgânica natural. Já a umidade não-ligada é a umidade limite no sólido particulado, sendo a quantidade de água na partícula que está em excesso, ou seja, é a quantidade a mais de líquido em relação à umidade de equilíbrio correspondente ao ar saturado; e pela umidade de equilíbrio que é a umidade limite a que um sólido pode ser seco para uma determinada condição de temperatura e umidade do ar (MUJUMDAR, 2006).

Descrição do Processo de Secagem de Suspensão Diluída

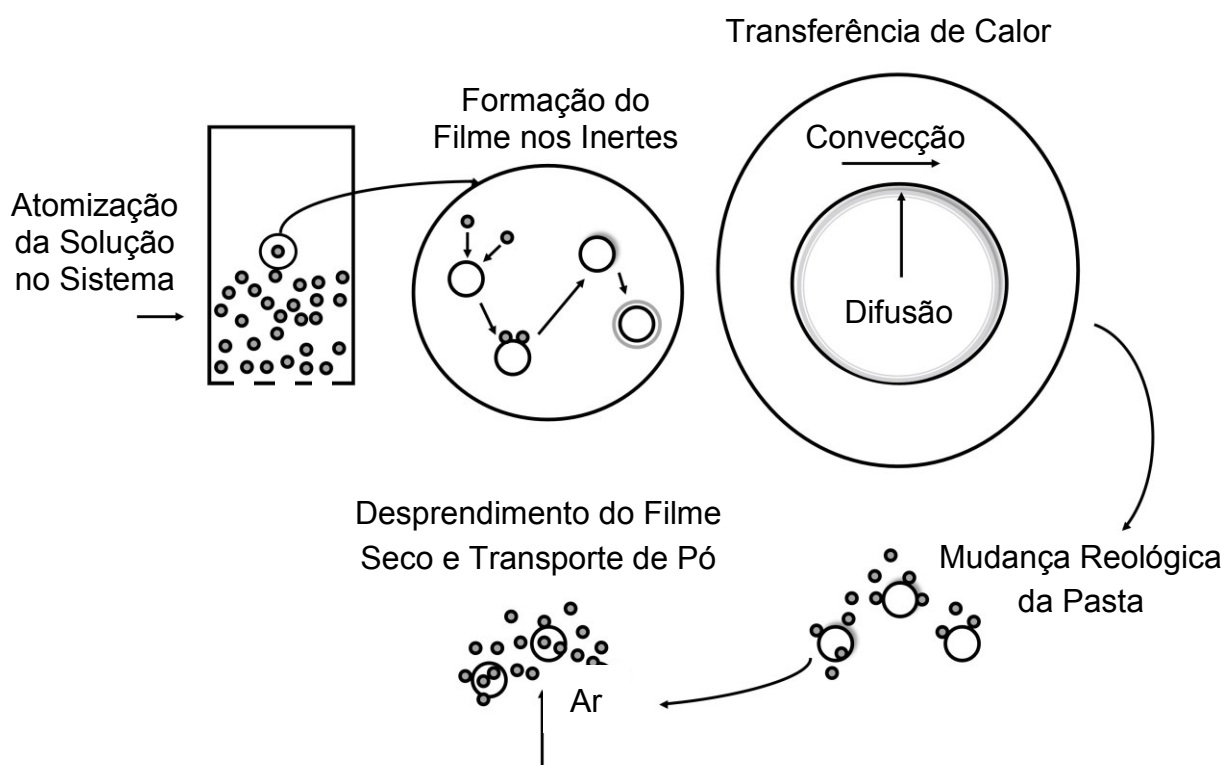
Suspensão diluída, soluções ou pastas são misturas homogêneas compostas por uma pequena quantidade de soluto dissolvida em relação a uma quantidade de solvente. A secagem de suspensões, soluções ou pastas é caracterizada por um processo de produção de pós ou grânulos em diversos setores industriais, como alimentícia, química, agrônômica e farmacêutica (RUSSEL, 1994).

A partir do processo de secagem, as soluções diluídas recobrem as partículas inertes no leito através de uma fina camada de pasta. Esta técnica é uma forma atraente de produção de pós, pois este sistema alcança altas taxas de transferência de calor e de massa. Nesta técnica, o leito é formado por partículas inertes e pela suspensão diluída. As partículas inertes agem como um suporte para as pastas, onde são suspensas com ar aquecido, fornecendo uma fase auxiliar para a fluidização e uma fonte de calor para a secagem (BRAGA; ROCHA, 2015). Já a solução, é

pulverizada para o interior do leito, sendo rapidamente e homogeneamente dispersa, formando-se o revestimento das partículas com uma fina camada deste material úmido (FREIRE et al, 2012).

Neste método, o mecanismo de secagem, ilustrado na Figura 2, depende das condições fluidodinâmicas, sendo que o revestimento líquido sobre a superfície da partícula seca ocorre por transferência de calor por convecção de ar quente e também pelo contato de transferência de calor devido ao calor sensível armazenado nas partículas inertes (FREIRE et al, 2012).

Figura 2 – Mecanismo de secagem: secagem de suspensão a partir de material inerte



Fonte: Adaptado de Grbavcic et al (2004)

À medida que a pasta é alimentada continuamente, as fases de formação da camada de suspensão, secagem, fratura do filme e elutriação do pó ocorrem simultaneamente. O tempo necessário para um ciclo completo dependerá das características reológicas da pasta, características de adesão, taxas de desgaste, entre outros fatores (FREIRE et al, 2012).

As taxas de remoção e de secagem da camada de suspensão devem ser altas o suficiente para evitar a aglomeração, devido ao acúmulo de suspensão no leito. Para pastas de alto teor de umidade, a evaporação da água é a fase limitante da secagem, a qual vai ocorrer a uma taxa constante. Para as fases que envolvem camada de adesão e quebra subsequente, a frequência de colisões e a taxa de secagem são os principais fatores que influenciam no processo (FREIRE et al, 2012).

A energia de colisão é afetada por um número de variáveis, incluindo as taxas de circulação de sólidos, a massa proporcional de pasta e partículas inertes, e a taxa de secagem. A taxa de circulação de sólidos inertes regula o tempo necessário para um ciclo completo de "revestimento-secagem-remoção" do filme a partir de uma partícula. Um aumento na taxa de secagem irá favorecer um aumento na friabilidade do filme e um efeito positivo do processo (FREIRE et al, 2012).

A principal desvantagem desta técnica é manter a fluidodinâmica do processo em condições estáveis e padrões de circulação (FREIRE et al, 2012). Por exemplo, quando se tem a injeção de líquido no interior do leito, a quantidade de substância introduzida deve ser controlada para evitar o colapso do leito, causando instabilidade fluidodinâmica, crescimento de partículas e aglomeração (MARONGA, 1998).

2.5 TRABALHOS DA LITERATURA SOBRE SECAGEM DE PASTA EM LEITOS FLUIDIZADOS

Muitos pesquisadores têm focado os estudos da secagem de suspensão diluída na avaliação da qualidade do produto final e da eficiência de secagem. Segundo Freire et al (2012), uma das maneiras de aumentar a eficiência no processo de secagem consiste em usar materiais inertes. Porém, os efeitos das propriedades das partículas inertes no processo de secagem, revestimento e fases de remoção do filme não tem sido claramente abordado.

As forças de adesão que atuam sobre a interface entre o revestimento e as partículas inertes estão intimamente relacionadas com as características destas partículas. O aumento do tamanho das partículas inertes afeta positivamente as taxas de secagem e o desempenho do secador (PASSOS; MUJUMDAR, 2000).

Grbavcic, Arsenijevic e Grulovic (2000) realizaram um estudo de secagem de suspensão e pasta em leito fluidizado contendo partículas inertes. Os autores analisaram os efeitos das condições de operação no secador avaliando a qualidade

do produto. Como material inerte, foram utilizadas esferas de vidro e, como suspensão, foram utilizados fungicida *Cineb*, hidróxido de cobre e água pura. Os autores observaram que a utilização de partículas inertes representa uma alternativa simples e efetiva para secagem de suspensões, soluções e pastas. Comparado a outros sistemas, este possui vantagens, como a alta capacidade por unidade de volume do secador, baixo consumo de energia e baixo consumo de calor específico. A alta eficiência de secagem resulta em elevada área de contato a partir da diferença de temperatura entre a entrada e a saída do ar. A alta mistura das partículas, devido à fluidização agregativa, através de um agitador mecânico, leva a condições isotérmicas em todo o leito. Eles verificaram que a suspensão e retenção do produto no leito varia entre 6 e 8%, em massa, e o produto seco possui o mesmo tamanho inicial de partícula como matéria-prima.

Em 2004, Grbavcic, Arsenijevic e Grulovic estudaram a secagem de pasta em leito fluidizado composto por esferas de vidro com diâmetro médio de 0,93 e 1,94 mm como partículas inertes. Foram utilizados pasta de fungicida *Zineb*, hidróxido de cobre e carbonato de cálcio e água pura como material de alimentação no leito. As concentrações dos materiais de alimentação variaram de 0,4 a 0,75 kg de água/kg de suspensão. Os autores avaliaram a qualidade do produto através dos efeitos das condições de operação na secagem. Foram quantificados a taxa de evaporação da água, o consumo do calor específico e o consumo do ar específico, além de ser mapeado o perfil de temperatura ao longo do leito e determinado o tempo de residência do material. Os pesquisadores concluíram que a secagem de pasta com a presença de partículas inertes em leito fluidizado é uma opção simples e efetiva para suspensões que não aderem permanentemente nos sólidos. Afirmam ainda que, a alta eficiência de secagem é resultante de uma maior área de contato e pelas altas diferenças de temperaturas entre a entrada e saída de ar. A mistura intensa das partículas conduz a processos isotérmicos ao longo do leito.

Meili (2009) realizou um estudo da fluidodinâmica e secagem de pasta em leito fluidizado e vibrofluidizado. O pesquisador utilizou partículas de esferas de vidro como partículas inertes com diâmetro médio da partícula de 463 μm , 780 μm e 2,19 mm e como suspensão usou água destilada (nos ensaios de evaporação) e lodo de esgoto doméstico, leite desnatado e carbonato de cálcio (em três concentrações de sólidos diferentes) no processo de secagem de pasta. Os experimentos foram realizados em uma coluna de acrílico de 0,114 m de diâmetro e 0,50 m de altura,

variando as condições vibracionais (0,0 a 3,0), sendo que cada uma delas foi obtido com quatro diferentes combinações de frequência de vibração e amplitude. O processo foi realizado em diversas vazões de alimentação da pasta e sob duas condições de velocidade do ar de secagem (1,33 e 1,55 m/s), além disso, foi trabalhado em duas temperaturas (80 e 100°C) e com duas condições vibracionais, para um mesmo adimensional de vibração, 400, amplitude igual a 0,003 e 0,015 m e com frequência de 18,20 e 8,14 Hz, respectivamente. O pesquisador ressaltou que referente ao processo de evaporação e secagem de pasta, quando se aplica acréscimo na velocidade superficial do ar e da temperatura, ocorre uma ampliação na vazão máxima de alimentação da pasta e diminuição no tempo necessário para que o sistema atinja o estado estacionário.

A respeito da umidade absoluta, o autor afirma que sempre há uma quantidade total máxima de água que pode ser retirada do ar de secagem para uma determinada temperatura, não importando o valor da vazão de ar de secagem introduzida no leito. O comportamento da umidade relativa referente a maior amplitude de vibração foi diferente do observado para o leito fluidizado e vibrofluidizado na menor amplitude, ou seja, a capacidade evaporativa do leito na maior amplitude e menor frequência é maior, devido a curva da umidade relativa se encontrar em um grau inferior às demais, mesmo com a vazão máxima de alimentação da suspensão, velocidade superficial do ar e temperatura de secagem sendo as mesmas para as outras duas configurações do leito (MEILI, 2009).

Na utilização do carbonato de cálcio, houve uma redução no tempo do processo para que o leito entrasse em colapso com o aumento da concentração de sólidos. Com a utilização da concentração de sólidos de 9%, as curvas de umidade relativa apresentaram-se em um grau superior às curvas de concentração de 3 e 6%, as quais encontram-se sobrepostas. Isto mostrou que o aumento da concentração de sólidos, resulta na formação de filmes mais espessos sobre o material inerte, que favorece à aglomeração e canais preferenciais (MEILI, 2009).

Tatemoto e Miyazawa (2011) realizaram um estudo do processo de secagem em leito fluidizado composto por esferas de vidro com diâmetro médio de 0,12 mm como partículas inertes, com temperatura do ar seco a 293 K, altura do leito fixo de 100 mm e pressão reduzida (50 kPa). Água destilada foi utilizada no processo, passada através de um bocal na superfície do leito. Durante o período inicial de

secagem a temperatura era de 393 K. A taxa de secagem e a temperatura do leito foram medidas durante o processo.

A condição de fluidização de um leito fluidizado com partículas inertes afeta fortemente a taxa de secagem no leito e possui um efeito maior do que a câmara de pressão sobre as características correspondentes de secagem. De outro modo, os autores afirmam que é importante manter a condição de fluidização para atingir altas taxas de secagem, entretanto, a taxa de secagem máxima seja independente da câmara de pressão, que pode ser atingida com baixas velocidades do gás sob pressão reduzida. Os autores afirmam ainda que a temperatura do leito no processo de secagem é influenciada pela taxa de secagem e diminui linearmente com o aumento da taxa de secagem máxima quando o fluxo da suspensão é igual a taxa de secagem, pois o calor latente de vaporização da água é alto. A taxa de secagem governa a transferência de calor no leito fluidizado durante a secagem (TATEMOTO; MIYAZAWA, 2011).

Em relação ao monitoramento da qualidade de fluidização em secagem de pasta utilizando medidas de flutuação de pressão em leito fluidizado gás-sólido, Schaffka et al (2015) avaliaram as transições dos regimes fluidodinâmicos durante a secagem de suspensão diluída de CaCO_3 a 9%, em massa, com a presença de partículas inertes de esferas de alumínio de diâmetro médio da partícula de 1,55 mm, usando a análise no domínio do tempo (desvio padrão da flutuação de pressão) e da frequência (espectro de potência). Os experimentos foram realizados a partir de uma coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e 1,0 m de altura, no qual foram instrumentados com transdutor de pressão conectado ao sistema de aquisição de dados, com o objetivo de gravar as medidas de flutuações de pressão presente no leito.

De acordo com os autores, os resultados mostraram que a qualidade de fluidização pode ser monitorada pelo desvio padrão da flutuação de pressão e pela técnica do espectro de potência. Além do mais, os pesquisadores mostraram que o acúmulo de líquido no interior do leito gera campos de instabilidade fluidodinâmica, resultando numa redução do desvio padrão ao longo do tempo de secagem. Para a técnica do espectro de potência, os autores verificaram que em condições estáveis de fluidização, o valor da frequência dominante era aproximadamente 7,5 Hz e para instabilidade fluidodinâmica, a frequência dominante permanecia entre 7,5 a 20 Hz durante o processo de secagem de CaCO_3 (SCHAFFKA et al, 2015).

2.6 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FLUIDIZADO

Os mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e radiação são relevantes em processos associados com leitos de partículas. A importância relativa de cada modo depende das condições dos processos envolvidos (HOWARD, 1989).

Os estudos de transferência de calor em leito fluidizado são frequentemente direcionados à análise da transferência de calor entre partícula sólida e o fluido e a transferência de calor entre o leito fluidizado e superfícies imersas ou parede do trocador.

Transferência de calor entre partícula-gás

De acordo com Yang (2003) a transferência de calor entre partícula e fluido em um sistema de leito fluidizado pode ser comparada à convecção de gás de uma única partícula fixa e para a convecção de gás a partir de um leito empacotado de partículas fixas. Uma definição comum do coeficiente de transferência de calor que pode ser utilizada, baseando-se na área da superfície de uma única partícula (a_p), está descrito conforme Equação (7):

$$h_p \equiv \frac{q_{p-f}}{a_p \cdot (T_p - T_f)} \quad (7)$$

Onde:

h_p : Coeficiente de transferência de calor entre partícula e fluido, kW/m².K;

q_{p-f} : Taxa de transferência de calor entre partícula e fluido, kW;

T_p : Temperatura da partícula, K;

T_f : Temperatura global do fluido, K.

a_p : Área da superfície de uma única partícula, para partículas esféricas conforme descrito na Equação (8), m².

$$a_p = \pi d_p^2 \quad (8)$$

Sendo:

d_p : Diâmetro da partícula, m.

O mecanismo de transferência de calor se torna cada vez mais complexo à medida que a análise de uma única partícula passa para uma análise de leito fixo e posteriormente, para análise de leito fluidizado (YANG, 2003).

Na análise de uma única partícula, o mecanismo na transferência de calor é devido à convecção, regulada pela camada limite na superfície da partícula. Em leitos fluidizados borbulhantes, o processo é mais complexo, devido ao movimento da suspensão das partículas e pela grande mistura causada através das bolhas de gás (YANG, 2003).

Nos dois casos apresentados, o coeficiente de transferência de calor aumenta com o incremento da velocidade do gás em relação às partículas. Além disso, ele cresce com o aumento da condutividade térmica e da densidade, porém, diminui com a viscosidade do gás (YANG, 2003).

A magnitude do coeficiente de transferência de calor entre partícula-gás em um leito fluidizado borbulhante geralmente não é alta. Os valores de h_p para aplicações mais comuns são de ordem aproximada de 1 a 100 W/m².K. No entanto, a taxa de transferência de calor entre partícula-gás por unidade de volume do leito é extremamente alta, devido à grande área de superfície interfacial. Por consequência, o equilíbrio térmico entre as partículas e o gás é alcançado rapidamente, dentro de uma curta distância a partir do ponto de injeção de gás (YANG, 2003).

Em muitos projetos, assume-se a condição isotérmica entre a mistura de partícula-gás. A preocupação com a taxa real de transferência de calor entre partícula-gás surge principalmente em situações onde existe a queima de partículas em uma câmara de combustão de leito fluidizado (YANG, 2003).

Em situações onde o objetivo é encontrar a taxa de transferência de calor entre partícula-gás, é necessário a utilização de correlações para o coeficiente de transferência de calor efetivo. O problema surge a partir do modelo utilizado para especificar as temperaturas das partículas e dos gases (T_p , T_f) no interior do leito

fluidizado. Como a difusividade da partícula é alta em leitos fluidizados borbulhantes, é comum tratar as partículas como sendo isotérmicas no interior do leito (YANG, 2003).

Kunii e Levenspiel (1991) apontaram os resultados com base em um modelo de *plug-flow*, em um sistema com menos dispersão e com a vantagem de permitir a comparação análoga à transferência de massa entre as partículas e o fluido.

Desta forma, os dados e as correlações indicadas em seguida são todas baseadas neste modelo, sendo considerado um sistema com partículas isotérmicas no interior do leito e o fluido passando entre os interstícios do leito (YANG, 2003).

Medidas experimentais de h_p têm sido feitas por vários pesquisadores, usando tanto estado estacionário, como condições transientes (YANG, 2003).

Kunii e Levenspiel (1991) recolheram resultados de 22 estudos e apresentaram em termos do número de *Nusselt* da partícula, Nu_p , e do número de *Reynolds* da partícula, Re_p , conforme descrito nas Equações (9) e (10), respectivamente (YANG, 2003).

$$Nu_p = \frac{h_p d_p}{k_g} \quad (9)$$

Onde:

k_g : Condutividade térmica do gás, W/m.K

$$Re_p = \frac{u_o d_p \rho_g}{\mu} \quad (10)$$

Onde:

μ : Viscosidade cinemática do fluido, kg/m.s.

Todas estas medições foram obtidas com número de *Prandtl* (número adimensional que aproxima a razão da difusividade de momento (viscosidade

cinemática) e a difusividade térmica de um fluido), $Pr \approx 0,7$. Os dados são mostrados no Gráfico 7 delimitada entre as duas curvas tracejadas (YANG, 2003).

Em comparação, a correlação de Ranz (1952) para a convecção de uma única esfera também é traçado no Gráfico 7, delimitada através da curva ponto-traço. A equação para a correlação de Ranz é dada pela Equação (11):

$$Nu_p = 2 + 0,6. Re_p^{0,5} Pr^{0,33} \quad (11)$$

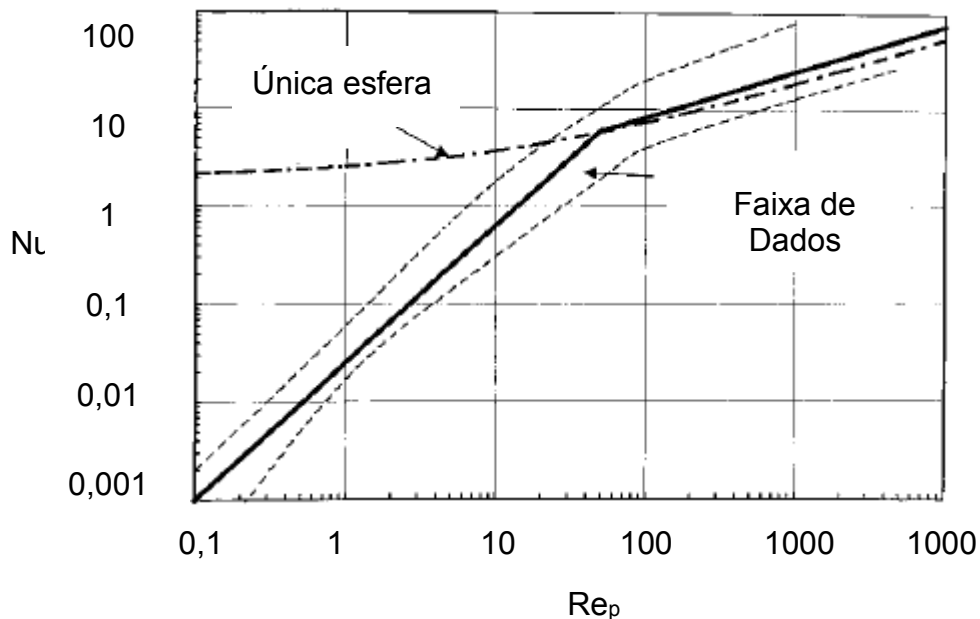
O Gráfico 7 apresenta o número de *Nusselt* para a transferência de calor entre partícula-gás em leito fluidizado denso para $Pr=0,7$.

Os dados experimentais mostrados no Gráfico 7 podem ser aproximados pelas Equações (12) e (13), representando as duas linhas retas tracejadas (YANG, 2003). A Equação (12) utilizada para faixa de $0,1 \leq Re_p \leq 50$ e a Equação (13) para faixa de $50 \leq Re_p \leq 10^4$.

$$Nu_p = 0,028. Re_p^{1,4} Pr^{0,33} \quad (12)$$

$$Nu_p = 1,01. Re_p^{0,48} Pr^{0,33} \quad (13)$$

Gráfico 7 – Número de Nusselt para a transferência de calor entre partícula-gás em leito fluidizado denso para $Pr=0,7$



Fonte: Yang (2003)

Transferência de Calor entre leito-superfície/parede do trocador

A transferência de calor entre leito-superfície/parede do trocador é normalmente utilizada para refrigerar ou aquecer leitos fluidizados borbulhantes de fase densa, e isso geralmente é realizado através da inserção de tubos no interior do leito (YANG, 2003).

A transferência de calor ocorre entre partícula-leito e as superfícies do tubo submersas (referida também como “paredes”). Nesse caso, o coeficiente de transferência de calor com base na área de superfície da parede submersa é dado conforme Equação (14) (YANG, 2003):

$$h_w \equiv \frac{q_{l-s}}{a_w \cdot (T_L - T_w)} \quad (14)$$

Onde:

h_w : Coeficiente de transferência de calor entre leito e superfície ou parede do trocador, $\text{kW/m}^2 \cdot \text{K}$;

q_{l-s} : Taxa de transferência de calor entre leito-superfície/parede do trocador, kW;

a_w : Área da superfície submersa ou parede do trocador, m²;

T_L : Temperatura do leito, K;

T_w : Temperatura da superfície submersa ou parede do trocador, K.

Para esta análise, a diferença de temperatura entre as partículas e o gás é desprezada (YANG, 2003).

Devido à sua importância na engenharia, o coeficiente de transferência de calor leito-superfície/parede, h_w , foi medido por muitos investigadores para várias geometrias e condições operacionais. As características típicas de h_w são (YANG, 2003):

- h_w na maioria dos casos é maior do que o coeficiente de transferência de calor por convecção do gás em uma única fase;
- h_w aumenta subitamente quando a velocidade do gás excede a velocidade de mínima fluidização;
- h_w atinge um valor máximo em alguma velocidade específica, a qual depende do tamanho de partícula;
- Além do ponto máximo, h_w diminui ligeiramente com aumento adicional da velocidade do gás;
- h_w diminui com o aumento do tamanho das partículas.

Em leitos fluidizados borbulhantes na fase densa, os mecanismos que contribuem para a transferência de calor na superfície submersa/parede incluem convecção durante períodos de contato com as bolhas, condução/convecção das partículas durante tempos de contato entre elas, e a radiação, no caso de operação utilizando altas temperaturas.

Transferência de calor por radiação

Durante muitos anos, prevaleceram opiniões contraditórias sobre a importância do significado da transferência de calor por radiação em leito fluidizado.

Estimativas da contribuição da transferência de calor radiativa variaram-se de 2 a 30% em leitos que possuíam altas temperaturas (YANG, 2003).

Medidas experimentais realizadas desde 1980 têm ajudado a resolver esta questão mediante medidas diretas de fluxo de calor por radiação e fluxo de calor total em leitos fluidizados borbulhantes. Howard (1989), estabelece que a contribuição da transferência de calor por radiação foi inferior a 15% quando utilizam-se temperaturas de leito menores que 800°C.

Com condições de operação de temperaturas mais elevadas, a contribuição da transferência de calor por radiação aumenta com a temperatura do leito, tornando-se maior que 35% quando a temperatura do leito excede 800°C (YANG, 2003).

Desta forma, o coeficiente de transferência de calor por radiação é definido conforme Equação (15):

$$h_r \equiv \frac{q_r}{a_w \cdot (T_L - T_w)} \quad (15)$$

Onde:

h_r : Coeficiente de transferência de calor por radiação na superfície da parede, kW/m².K;

q_r : Taxa de transferência de calor por radiação na superfície da parede, kW;

a_w : Área da superfície da parede, m²;

T_L : Temperatura do leito, K;

T_w : Temperatura da superfície da parede, K.

2.7 TRABALHOS DA LITERATURA SOBRE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PROCESSO COM INJEÇÃO DE LÍQUIDO NO INTERIOR DO LEITO

A transferência de calor em processos com injeção de líquido no interior de leitos fluidizados tem sido pouco estudada. Na literatura, também foram encontrados alguns estudos voltados para a configuração do leito de jorro. A seguir, serão mostrados alguns trabalhos relacionados à área, a fim de compreender como esta transferência de calor se manifesta nestes dois tipos de configuração de leito.

Martinez, Brennan e Niranjana (1993) estudaram a transferência de calor em processos de umedecimento de partículas utilizando água deionizada em leito de jorro, contendo esferas de polipropileno como material inerte, com diâmetro médio de partícula de 3,9 mm. Os experimentos foram realizados a fim de determinar os efeitos de algumas condições operacionais, tais como a taxa de alimentação de água e vazão de ar, a temperatura de entrada de ar e a altura de leito fixo, sobre o coeficiente volumétrico de transferência de calor ($\bar{h}a$).

Para determinação do coeficiente volumétrico de transferência de calor, $\bar{h}a$, os pesquisadores consideraram: regime permanente, temperatura do ar e das partículas como sendo iguais; temperaturas do ar e das partículas superiores à da água depositada, a evaporação ocorre na temperatura de bulbo úmido do ar em torno da água depositada no leito, a temperatura de bulbo úmido não varia significativamente através do leito sendo assim, consideram que $T_{bu,in} = T_{bu,o}$ (MARTINEZ; BRENNAN; NIRANJANA, 1993).

Desta forma, a equação do balanço de energia foi descrita conforme Equação (16):

$$\bar{h}a(\Delta T)_{LN}V = \dot{m}_L c_p (T_{bu} - T_{alim}) + \dot{m}_L \lambda \quad (16)$$

Onde:

$\bar{h}a$: Coeficiente volumétrico de transferência de calor, kW/m³.K;

$(\Delta T)_{LN}$: Diferença de temperatura média logarítmica entre o ar e a água depositada (na qual é assumida estar na temperatura de bulbo úmido), K;

V: Volume de leito fixo, m³;

\dot{m}_L : Vazão mássica de líquido, kg/s;

c_p : Calor específico a pressão constante, kJ/kg.K;

T_{bu} : Temperatura de bulbo úmido, K;

T_{alim} : Temperatura da suspensão a ser atomizada no leito, K;

λ : Calor latente de evaporação da água na T_{bu} , kJ/kg.

Onde, a diferença de temperatura média logarítmica entre o ar e a água é dada pela Equação (17):

$$(\Delta T)_{LN} = \frac{(T_{in} - T_{bu,in}) - (T_o - T_{bu,o})}{\ln\left(\frac{T_{in}-T_{bu,in}}{T_o-T_{bu,o}}\right)} \quad (17)$$

Na qual:

T_{in} : Temperatura de entrada de ar, °C;

T_o : Temperatura de saída de ar, °C;

$T_{bu,in}$: Temperatura de bulbo úmido do ar na entrada, °C;

$T_{bu,o}$: Temperatura de bulbo úmido do ar na saída, °C.

Rearranjando a Equação (17), têm-se:

$$(\Delta T)_{LN} = \frac{(T_{in} - T_o)}{\ln\left(\frac{T_{in}-T_{bu,o}}{T_o-T_{bu,o}}\right)} \quad (18)$$

De acordo com Martinez, Brennan e Niranján (1993), a taxa de evaporação é igual à taxa na qual água é alimentada no secador, isto é, não existe acúmulo de água no leito. Quando substituídos os valores de c_p , T_{bu} , T_{alim} e λ na Equação (16), os autores verificaram que $\lambda \gg c_p \cdot (T_{bu} - T_{alim})$. Logo, o primeiro termo da parte direita da Equação (16) pode ser negligenciado e a equação do balanço de calor pode ser escrita conforme Equação (19):

$$\bar{h}a \cdot V \cdot (\Delta T)_{LN} = \dot{m}_L \lambda \quad (19)$$

Os autores verificaram que o coeficiente volumétrico de transferência de calor aumentou com o incremento da taxa de fluxo de alimentação da água e diminuiu com a temperatura de ar na entrada e da profundidade do leito. De acordo com os pesquisadores, a influência do fluxo do ar no valor $\bar{h}a$ é baixo, observando também que para todos os casos, os valores estiveram no intervalo de 1,2 a 5,4 kW/m³.K (MARTINEZ; BRENNAN; NIRANJAN, 1993).

Leontieva et al (2002) estudaram a transferência de calor e de massa no processo de secagem de suspensão aquosa pulverizada sobre a superfície do material inerte em leito de jorro. O sólido inerte utilizado em todos os experimentos

foram esferas de cerâmicas de 8 mm de diâmetro médio e, como solução diluída, foi utilizada *R-Salt (2-Naftol-3,6-Disódio Disulfonato)* a 15%, em massa, de base úmida. A temperatura de processo foi utilizada em uma faixa de 40 a 90 °C e velocidade superficial do gás de 0,89 a 1,91 m/s. Os pesquisadores verificaram que a taxa de secagem aumenta, conforme se têm alteração da velocidade superficial do gás e da temperatura de 0,89 a 1,91 m/s e de 40 para 90 °C, respectivamente. Além disso, afirmam ainda que a presença de material inerte no processo de secagem de suspensões diluídas favorece a cinética e a transferência de calor neste processo. Os autores verificaram também que o modelo matemático desenvolvido foi validado em dois níveis, inicialmente através da cinética da transferência de calor e de massa de apenas uma partícula inerte, e posteriormente, através dos parâmetros do material seco e ar gasto em um secador industrial. Além do mais, a divergência entre as curvas cinéticas calculadas e experimentais não excedeu 7,5% e para melhor correção de precisão na interação de partículas inertes em leito de jorro, o efeito do misturador e semelhantes são exigidos, já no setor industrial este percentual foi menor que 8,5%.

Zhao et al (2004) estudaram a secagem de suspensão diluída em um leito fluidizado com fluxo de ar rotativo (gerado através de orifícios oblíquos do distribuidor de ar) contendo partículas inertes. Como alimentação do líquido no leito, foi utilizado leite de soja. Foram testados dois tipos de materiais inertes, sendo eles, esferas de vidro com diâmetro médio de 4 mm e cilíndricos extrudados de teflon de 4 mm de diâmetro e 5 mm de altura. Além disso, foi estudado o coeficiente volumétrico de transferência de calor, o qual incrementou com o fluxo de alimentação do líquido e com a velocidade superficial do ar, porém, reduziu com o aumento da temperatura do ar de entrada, altura do leito fixo e concentração do líquido de alimentação. Os autores concluíram que o leito fluidizado rotativo gera um aumento do coeficiente volumétrico de transferência de calor de 1 kW/m³.K, e representa um aumento de 15 a 25% comparado ao leito fluidizado convencional, operando com altura do leito de 60 mm, diâmetro do leito de 140 mm, velocidade superficial do ar de 3,5 m/s, alimentação do leite de soja de 20 mL/min e concentração de 6,7%, e intervalos de temperaturas de 80 a 140°C usando cilíndricos extrudados de teflon.

Englart, Kmiec e Ludwinska (2009) estudaram a transferência de calor em leito de jorro envolvendo a altura do leito fixo, razão da taxa do fluxo mássico e fluxo de gás no coeficiente de transferência de calor, comparando os dados experimentais com os da literatura. Foi proposto um modelo matemático com uma dimensão para

fluxo de sólidos e transferência de calor em leito de jorro, que foram analisados levando às equações diferenciais, as quais foram resolvidas numericamente e comparadas aos dados experimentais. Utilizaram vários tipos de partículas, como poliamida 6-policaprolactama (PA6), polietileno (PE), poliacetal (POM) e um variante branco (POM B) e preto (POM C) e agalite, com diâmetro médio das partículas na faixa de 2,5 a 4,1 mm. As medições foram realizadas em três alturas de leito fixo (0,07 a 0,15 m) e quatro variáveis de taxa de fluxo mássico. A temperatura do gás de entrada foi de 27,5 e 44,1°C e da água foi de 12 e 15°C. A razão da taxa de fluxo mássico de água em relação a taxa de fluxo mássico do gás foi de 0,005 a 0,010 (adimensional).

Os autores concluíram que o coeficiente de transferência de calor é dependente das condições fluidodinâmicas do leito e da razão da taxa de fluxo mássico de água e do gás. Adicionalmente, os valores dos coeficientes de transferência de calor incrementaram com o aumento da taxa do fluxo mássico da água e com a velocidade do ar e reduziu com o aumento da altura do leito fixo. As melhores condições de transferência de calor foram com as partículas esféricas com grandes diâmetros médio das partículas. (ENGLART; KMIEC; LUDWINSKA, 2009).

Roy et al (2009) estudaram sobre a transferência de calor e de massa em granulação em leito fluidizado. Os autores utilizaram partículas de areia e sílica de gel como materiais inertes, com diâmetro médio de 120, 390 e 655 μm (areia) e 90 μm (sílica gel). Foi observado que o coeficiente de transferência de calor depende da altura do leito, da velocidade do gás, do tamanho das partículas, entre outros.

Neste contexto, a revisão bibliográfica permitiu um maior entendimento sobre o comportamento fluidodinâmico e de transferência de calor em leito fluidizado envolvendo processos de secagem de solução diluída contendo material inerte. Neste intuito, foi possível alinhar as etapas para a realização do presente trabalho, a fim de contribuir em áreas que ainda não estão completamente estudadas em sistemas particulados.

No próximo item, serão apresentados os detalhes do equipamento experimental e a metodologia utilizada para obtenção dos resultados, a fim de atingir os objetivos propostos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e suas características físicas; a descrição do sistema experimental; a metodologia empregada na análise de sinais, secagem e transferência de calor; assim como a especificação do filtro digital, além da organização e do procedimento realizado para obtenção dos dados experimentais, com o intuito do cumprimento dos objetivos propostos neste trabalho.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS E SUAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

A solução diluída utilizada neste trabalho foi composta por carbonato de cálcio P.A. (CaCO_3) e água destilada. O critério da escolha desta suspensão diluída deve-se ao fato de que a pasta possuiu facilidade de preparação da suspensão com uma concentração pré-definida, facilitando a avaliação da influência da concentração de sólidos presentes na pasta durante o processo de secagem, além de ser amplamente encontrada em trabalhos da literatura.

Por outro lado, foram utilizadas esferas de alumínio e esferas de vidro como material inerte. As esferas constituídas de diferentes materiais foram usadas como inertes por serem atóxicas e apresentarem condutividades térmicas diferentes, possibilitando um estudo amplo dos experimentos, quanto aos aspectos de monitoramento do regime pelos sinais e avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de calor no secador. Além disso, as esferas de vidro são materiais particulados comumente encontrados na literatura.

As características físicas dos sólidos determinadas neste trabalho, conforme descrito na Tabela 1, foram caracterizadas quanto ao diâmetro médio das partículas, densidade aparente e esfericidade. Além disso, foram caracterizadas quanto às propriedades térmicas, abordando a condutividade térmica e a difusividade térmica.

Para obtenção do diâmetro médio de Sauter das partículas foi utilizado o método de análise granulométrica por peneiramento em malhas padronizadas de série Tyler (*International Standard Organization*). Os ensaios da análise granulométrica foram realizados através de peneiras da marca Granutest® e Servitch® e agitador magnético da marca Vibrotec® CT 025. A densidade das esferas de vidro e de alumínio foi determinada experimentalmente através da técnica de picnometria a líquido. Para

a determinação da esfericidade da partícula foi utilizado o método de Peçanha e Massarani (1986) que consiste na relação entre o diâmetro inscrito e circunscrito de uma partícula.

Tabela 1 – Características dos materiais.

Material Particulado	Esfera de Alumínio	Esfera de Vidro
d_p (mm)*	1,55 (+1,40 -1,70)	1,55 (+1,40 -1,70)
ρ_s (kg/m ³)	2693	2450
ϕ_p (adimensional)	0,98 ± 0,01	0,94 ± 0,05
Classificação de Geldart	Grupo D	Grupo D
$k_{85^\circ\text{C}}$ (W/m.K)	238,8	0,8
$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	97,10	0,75

*Abertura da peneira para classificação de tamanho.

Fonte: **Autoria Própria (2017)**

3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

O sistema experimental utilizado neste trabalho pertence ao Laboratório de Sistemas Gás - Sólido, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Câmpus Ponta Grossa.

Os experimentos foram realizados em um secador de leito fluidizado convencional em escala laboratorial, conforme mostrado na Fotografia 1, sendo este composto por uma coluna de acrílico, com 0,11 m de diâmetro interno e 1,0 m de altura.

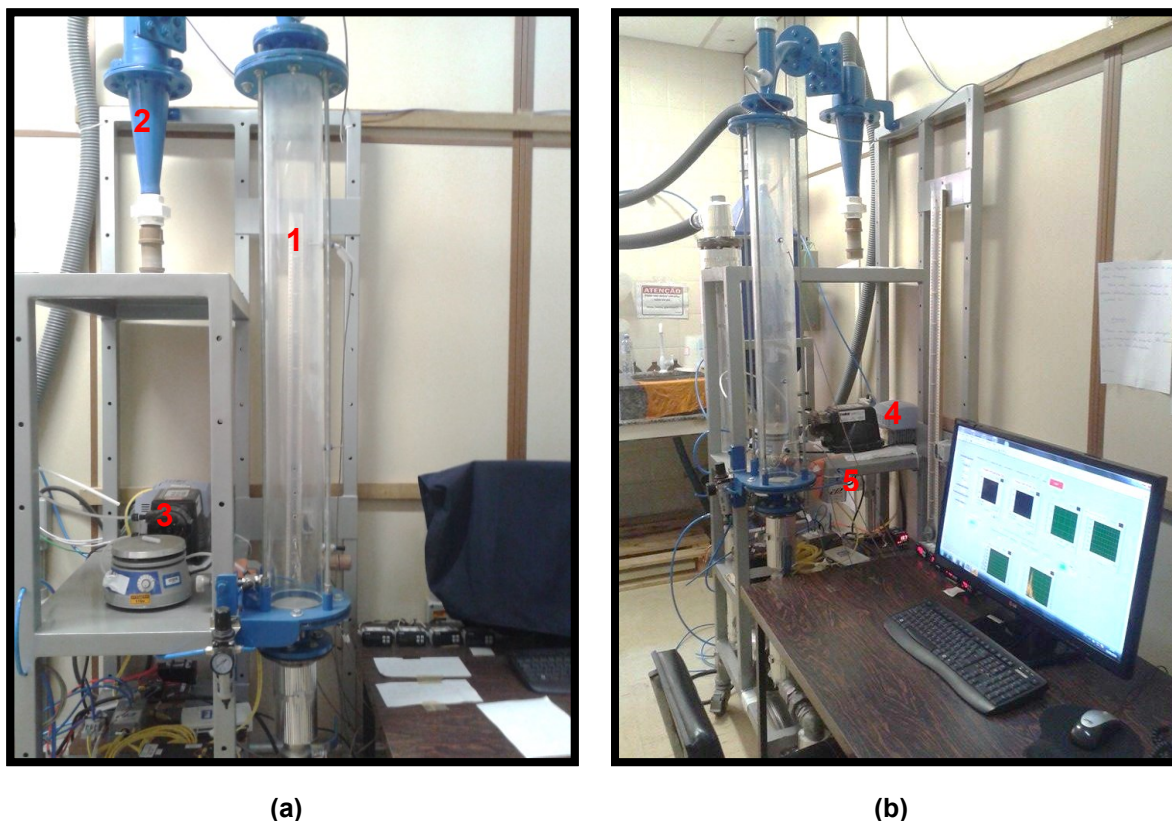
O ar utilizado para a fluidização das partículas foi fornecido por um soprador radial da marca Elan[®], modelo CRE04, acoplado a um motor de 4 cv. Este soprador foi conectado ao leito através de uma tubulação de aço com 0,038 m de diâmetro interno. A rotação do motor do soprador foi regulada através de um inversor de frequência da marca WEG[®] e modelo CFW080160T2024POA1Z.

A vazão mássica do ar destinado ao leito de partículas foi determinada mediante uma placa de orifício (construída a partir da Norma NBR-ISO 5167-1, ABNT, 1994), com diâmetro de orifício de 0,028 m. Para obtenção da velocidade superficial

do ar, foi utilizada a Norma ASME MFC-14M-2003, conforme a resolução dos cálculos descritos no Apêndice B.

O ar de fluidização foi aquecido através de resistências elétricas e um regulador do tipo PID (marca Novus®, modelo N1100) foi utilizado para controlar a temperatura do ar no *plenum*.

Fotografia 1 – Equipamento experimental. (a) Vista Frontal. (b) Vista Lateral



**Legenda: (1) Coluna de Fluidização. (2) Ciclone. (3) Bomba Peristáltica. (4) Inversor de Frequência. (5) Transdutor de Pressão na câmara *plenum*.
Fonte: Autoria Própria (2017)**

Um bico atomizador do tipo duplo fluido (marca *Spraying Systems*®, modelo SU11-SS) foi utilizado para atomizar a suspensão diluída proveniente de uma bomba peristáltica (marca Vallair-Stenner®, modelo SVP4H2B1S2AA, faixa de operação 100 psi/6,9 bar), a qual foi calibrada, conforme descrito no Apêndice A.

O ar de atomização foi fornecido por um compressor do tipo pistão (marca *Schulz*®, modelo 821410, 2 cv) o qual passou por um regulador de pressão (marca *Fluir*®, modelo AW200002U). Os pós secos foram coletados por um ciclone *Swift* conectado a um filtro de mangas do tipo jato pulsante (marca *Multiman*®).

A pressão manométrica na linha e a queda de pressão através da placa de orifício foram obtidas utilizando dois transdutores de pressão (marca *Cole Parmer*®, modelo 98073-14, de 0 a 12.442 Pa, e do modelo 68071-14, de 0 a 6.227 Pa, respectivamente).

Os sinais de pressão provenientes da câmara *plenum* foram obtidos utilizando um transdutor de pressão diferencial (marca *Cole Parmer*®, modelo 68071-14, com faixa de 0 a 6.227 Pa).

Os dois transdutores de pressão utilizados para obter as pressões manométricas na linha e a queda de pressão através da placa de orifício, além do transdutor diferencial de pressão, o qual fornece os dados de pressão no *plenum*, foram calibrados conforme descrito no Apêndice A.

Além disso, foram utilizados dois sensores de umidade relativa do ar e temperatura de bulbo seco, ambos da marca *Novus*®, modelos: RHT-XS (conectado na saída da coluna de fluidização) e N322 RHT (conectado na entrada, antes das resistências elétricas).

Para as medidas de temperatura interna foram utilizados sensores de termoresistência (Pt-100) conectados à indicadores de temperatura (marca *Novus*®, modelo N-320), sendo que estes dados foram coletados de forma manual.

Os dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar (RHT-XS) na entrada também foram coletados manualmente.

A NOVUS fornece seus sensores de temperatura totalmente calibrados e padronizados, na faixa de saída em tensão de 0 a 10 V, o que corresponde em temperatura a faixa de 0 a 100°C, assim como os termohigrômetros que apresentam saída analógica em voltagem de 0 a 10 V, e não foram necessárias calibrações das saídas de temperatura (0 a 100°C) e umidade relativa (0 a 100%).

Todos os transdutores de pressão e o sensor de umidade relativa do ar e temperatura de bulbo seco na saída (RHT-XS) foram acoplados a um sistema de aquisição de dados (marca *National Instruments*™, modelo NI USB 6211). Os sinais foram processados, visualizados e salvos através do *software* LabVIEW™ (versão 10.0, *National Instruments*™). Para essa finalidade, foi utilizado um microcomputador AMD Fx(tm) - 8120 *Eight Core* Memória RAM de 4,0 GB, sistema operacional de 32 bits, *Windows 7 Professional*.

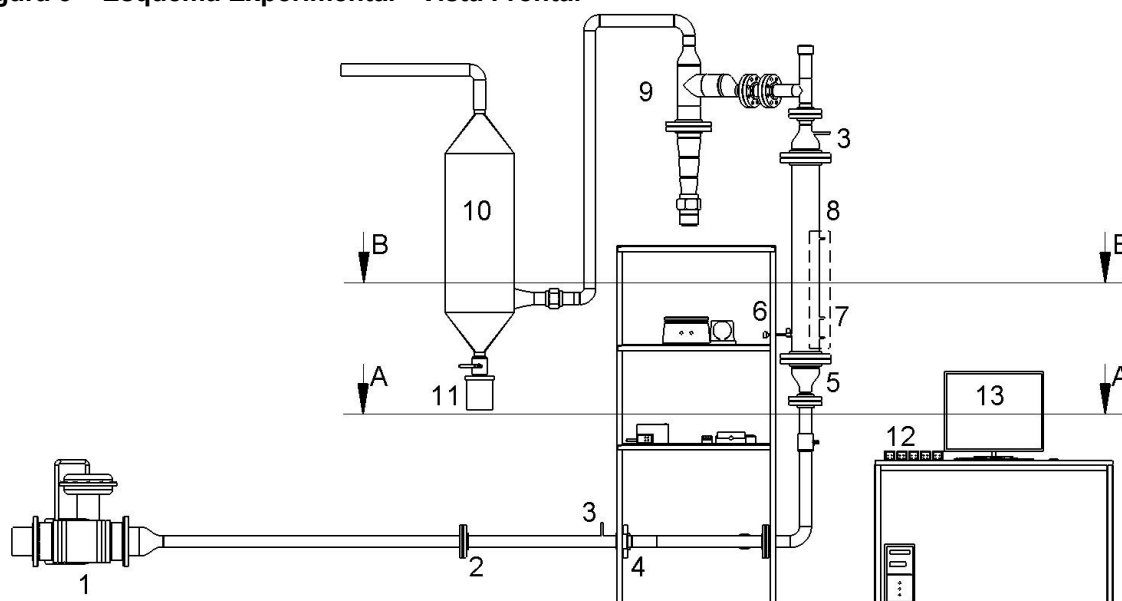
A fim de promover uma distribuição uniforme das bolhas de ar no leito, foi utilizada uma placa distribuidora do ar construída em aço comercial, possuindo

3,50 mm de espessura, do tipo perfurada, com diâmetro de orifício de 1,2 mm distribuídos em arranjo triangular e com espaçamento de 4,25 mm.

Na parte superior dessa placa foi instalada uma tela de aço inoxidável com abertura de 75 μm , com o propósito de evitar que as partículas sólidas que ficam sobre ela passem por seus orifícios e caiam no *plenum*.

A Figura 3 mostra a vista frontal do sistema experimental.

Figura 3 – Esquema Experimental - Vista Frontal



Legenda: (1) Soprador de Ar; (2) Placa de Orifício; (3) Termohigrômetro; (4) Resistência Elétrica; (5) Placa Distribuidora de Ar; (6) Bico Atomizador; (7) Sensores de Termoresistência; (8) Coluna de Fluidização; (9) Ciclone; (10) Filtro de Manga; (11) Coletor de Pó do Filtro de Manga; (12) Indicadores de Temperatura do Leito; (13) Computador.

Fonte: Autoria Própria (2017)

3.3 MÉTODO DE ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA

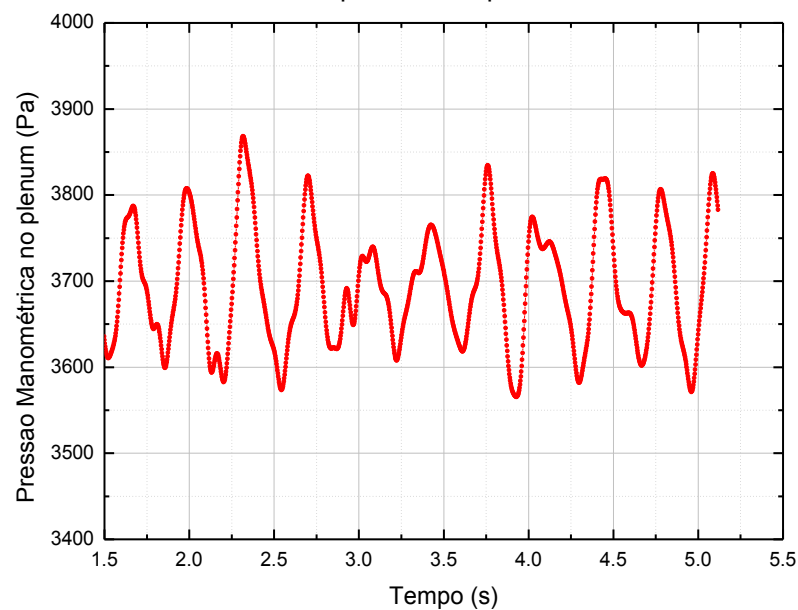
O método de análise espectral Gaussiana, que foi utilizada no presente trabalho, a fim de avaliar as instabilidades fluidodinâmicas, foi desenvolvida por Parise em 2007, a qual consiste de uma análise estatística sobre a distribuição espectral de pressão, ajustada a uma função exponencial semelhante à curva de distribuição normal Gaussiana. Neste intuito, contextualizou-se com mais detalhes a técnica utilizada para obtenção dos resultados fluidodinâmicos.

Inicialmente, foram coletadas N pontos de pressão manométrica no *plenum* a uma determinada taxa de amostragem. Neste trabalho foram definidas 2.048 pontos (2^{11}) e 400 Hz, baseados em estudos anteriores (SILVA et al, 2011; SILVA, 2015;

SCHAFFKA et al, 2015). A escolha destas medidas de pressão a esta faixa de amostragem, permitiu obter uma quantidade de medidas de pressão suficiente para análise dos resultados, assim como a taxa de amostragem, que forneceu estes dados de pressão em um tempo determinado (a cada 5,12 s) para a análise fluidodinâmica, a fim de determinar a condição do fenômeno de defluidização.

O Gráfico 8 mostra um exemplo do sinal de pressão coletado em condições de regime de fluidização do tipo borbulhante.

Gráfico 8 – Sinal de pressão manométrica no *plenum* - Condições de Operação: $m_{\text{esf_Al}} = 1,6 \text{ kg}$; $u_o/u_{mf} = 1,4$; $T_L = 70^\circ\text{C}$; $P_{\text{atom}} = 0,1 \text{ MPa}$; $C_{\text{susp}} = 9\%$; $Q_{\text{susp}} = 15 \text{ mL/min}$



Fonte: Autoria Própria (2017)

Após a coleta de medidas de pressão no *plenum* e passado pelo filtro digital (IRR- resposta de impulso infinito - do tipo passa baixa, com topologia *Butterworth*, ordem 20 e frequência de corte de 20 Hz) utilizou-se a centralização na média, dada por:

$$P_{N,k} = P_{L,k} - \bar{P} \quad (20)$$

Onde:

P_N : Pressão do leito centralizada na média, Pa;

P_L : Pressão no leito, Pa;

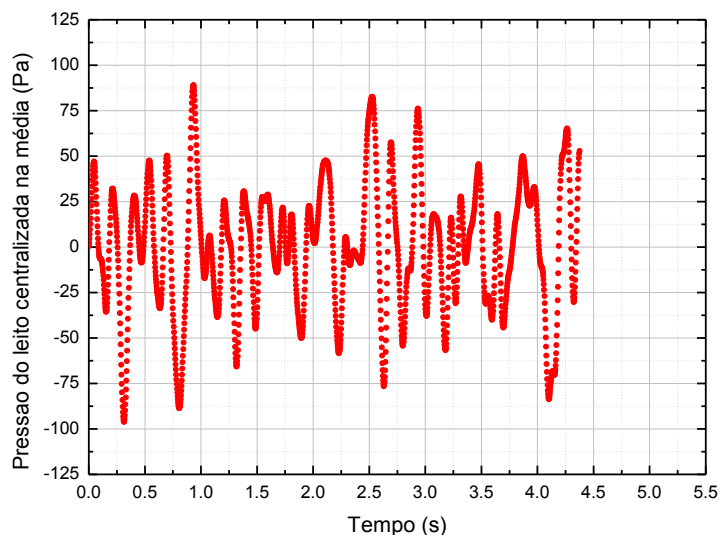
$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$;

N: Número de medidas de pressão, adimensional;

\bar{P} : Média aritmética de N medidas de pressão, Pa.

O Gráfico 9 ilustra a pressão do leito centralizada na média no domínio do tempo, com as mesmas condições de operação do Gráfico 8:

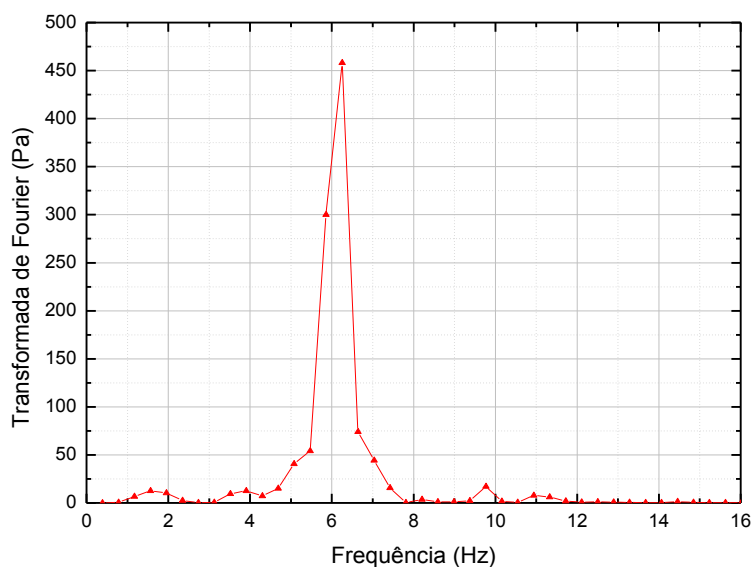
Gráfico 9 – Pressão do leito centralizada na média no domínio do tempo - Condições de Operação: $m_{\text{esf_Al}} = 1,6 \text{ kg}$; $u_o/u_{\text{mf}} = 1,4$; $T_L = 70^\circ\text{C}$; $P_{\text{atom}} = 0,1 \text{ MPa}$; $C_{\text{susp}} = 9\%$; $Q_{\text{susp}} = 15 \text{ mL/min}$



Fonte: Autoria Própria (2017)

Após esse procedimento, aplicou-se a Transformada de Fourier através do algoritmo FFT (Transformada Rápida de Fourier) no sinal de pressão do leito centralizada na média, conforme mostra o Gráfico 10, originando-se um espectro de pressão.

Gráfico 10 – Transformada de Fourier do sinal de pressão centralizada (espectro de pressão) - Condições de Operação: $m_{\text{esf_Al}} = 1,6$ kg; $u_o/u_{mf} = 1,4$; $T_L = 70^\circ\text{C}$; $P_{\text{atom}} = 0,1$ MPa; $C_{\text{susp}} = 9\%$; $Q_{\text{susp}} = 15$ mL/min



Fonte: Autoria Própria (2017)

Depois de obtido a Transformada de Fourier do sinal de pressão centralizado na média, foi possível realizar um ajuste de uma curva exponencial semelhante à distribuição normal (curva Gaussiana) nesse sinal que foi gerado, conforme proposto por Parise (2007).

3.3.1 Distribuição Normal (Curva Gaussiana)

A distribuição normal é utilizada em diversas áreas, devido ao fato de apresentar uma série de fenômenos físicos e financeiros, onde é descrita por parâmetros de média e desvio padrão.

A distribuição Gaussiana é dada pela Equação (21):

$$G'(f_k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(f_k - f_c)^2}{2\sigma^2}} \quad (21)$$

Sendo:

f_k e f_c : valores da frequência do sinal e da frequência média da distribuição Gaussiana (frequência central), respectivamente, Hz;

σ : desvio padrão dessa distribuição, Hz;

$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$;

N: Número de pontos de pressão (2.048 pontos de pressão), adimensional.

Ajuste da Curva Exponencial Gaussiana no Espectro de Pressão

De acordo com Parise (2007), as amplitudes da transformada de Fourier do sinal de pressão normalizado são os dados utilizados para o ajuste da curva exponencial Gaussiana.

Partindo-se da Equação (21) e aplicando-se o logaritmo natural em ambos os lados, têm-se a Equação (22):

$$\ln[G'(f_k)] = \ln\left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right] - \frac{(f_k - f_c)^2}{2\sigma^2} \quad (22)$$

Da Equação (22) têm-se que A' , dado pela Equação (23)

$$A' = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (23)$$

e B' dado pela Equação (24):

$$B' = -\frac{(f_k - f_c)^2}{2\sigma^2} = -\frac{(f_k)^2}{2\sigma^2} + \frac{(2f_k f_c)}{2\sigma^2} - \frac{(f_c)^2}{2\sigma^2} \quad (24)$$

Sendo os coeficientes a , b e c' dados pelas seguintes equações:

$$a = -\frac{1}{2\sigma^2} \quad (25)$$

$$b = \frac{f_c}{\sigma^2} \quad (26)$$

$$c' = \ln[A'] - \frac{f_c^2}{2\sigma^2} \quad (27)$$

Assim, substituindo as Equações (25) a (27) na Equação (22), a Equação (28) é dada por:

$$\ln[G'(f_k)] = \ln[A'] + B' \quad (28)$$

Ou seja:

$$\ln[G'(f_k)] = af_k^2 + bf_k + c' \quad (29)$$

Observou-se que na Equação (29), a função parabólica possuiu três parâmetros independentes (a , b e c'), enquanto a curva Gaussiana, referente a Equação (21), possuiu apenas dois parâmetros (f_c , σ). Ressalta-se que a amplitude da curva de distribuição Gaussiana está acoplada ao desvio padrão da mesma. Por isso, a utilização da expressão de curva Gaussiana com uma nova amplitude de modulação dada por A , através da Equação (30)

$$G(f_k) = Ae^{-\frac{(f_k - f_c)^2}{2\sigma^2}} \quad (30)$$

Onde:

$G(f_k)$: Distribuição exponencial Gaussiana, adimensional;

A : Amplitude de modulação, adimensional;

f_k : Frequência do sinal, Hz;

f_c : Frequência central, Hz.

σ : Desvio padrão da distribuição espectral, Hz;

$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

Partindo da Equação (30) e aplicando-se o mesmo procedimento, têm-se que:

$$a = -\frac{1}{2 \cdot \sigma^2} \quad (31)$$

$$b = \frac{f_c}{\sigma^2} \quad (32)$$

$$c = \ln[A] - \frac{f_c^2}{2 \cdot \sigma^2} \quad (33)$$

Assim, através da Equação (33), foi possível obter A, sendo este:

$$A = e^{c + \frac{f_c^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (34)$$

Parise (2007) afirmou que esse tipo de procedimento vinculou melhor os parâmetros de frequência central e de desvio padrão da curva exponencial com a distribuição das amplitudes na curva espectral, de forma independente da escala dos valores da amplitude. Ressalta-se que o parâmetro c da Equação (34) e consequentemente o valor de A , não foram utilizados na determinação da frequência central (f_c) e do desvio padrão da distribuição espectral (σ).

Da mesma maneira, das Equações (28) e (29) obtém-se as Equações (35) e (36):

$$\ln[G(f_k)] = \ln[A] + B \quad (35)$$

Ou seja:

$$\ln[G(f_k)] = af_k^2 + bf_k + c \quad (36)$$

A função de ajuste na Equação (37) foi baseada no método dos mínimos quadrados, que parte da minimização do somatório dos quadrados dos resíduos entre o logaritmo da função de ajuste (distribuição exponencial Gaussiana) e o logaritmo dos dados a ajustar (amplitude do espectro de pressão). Fazendo dessa maneira, que a curva exponencial Gaussiana apresente o melhor ajuste das medidas experimentais, sendo determinada a frequência central, f_c , parâmetro utilizado para o estudo da transição de regimes de fluidização do presente trabalho.

$$e_k = \sum_{k=0}^{N-1} [\ln[A_e(f_k)] - \ln[G(f_k)]]^2 \quad (37)$$

Onde:

e_k : Resíduo deixado pelo ajuste da curva, adimensional;

$A_e(f_k)$: Amplitude espectral medida, que é referente à transformada de Fourier do sinal normalizado, Pa;

$G(f_k)$: Distribuição exponencial Gaussiana, adimensional.

Assim, substituindo a Equação (36) na Equação (37), têm-se que:

$$e_k = \sum_{k=0}^{N-1} [\ln[A_e(f_k)] - [af_k^2 + bf_k + c]]^2 \quad (38)$$

Os coeficientes a , b e c da Equação (38) definem a localização da curva. Os coeficientes foram determinados a partir da Equação (39):

$$X = [K^T K]^{-1} K^T y \quad (39)$$

Onde:

K^T : Matriz transposta de K .

X foi dado por:

$$X = \begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} \quad (40)$$

K foi dado pela seguinte equação:

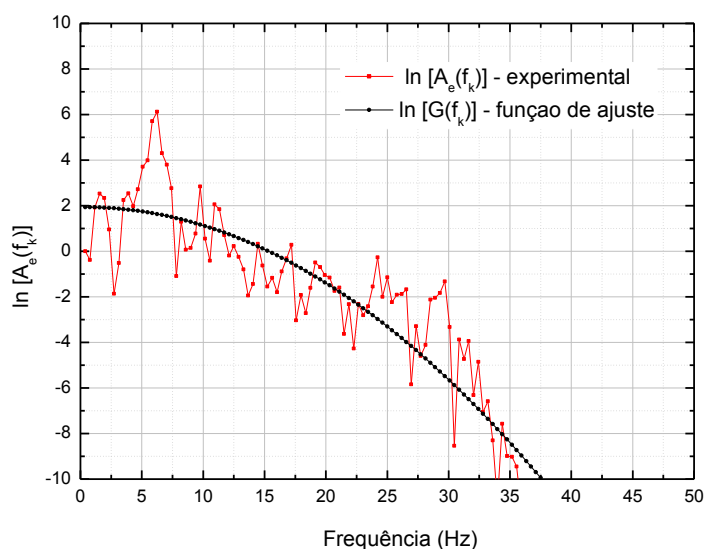
$$K = \begin{matrix} f_0^2 & f_0 & 1 \\ f_1^2 & f_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n-1}^2 & f_{n-1} & 1 \end{matrix} \quad (41)$$

Sendo “ y ” verificado por:

$$y = \begin{matrix} \ln[A_e(f_0)] \\ \ln[A_e(f_1)] \\ \vdots \\ \ln[A_e(f_{n-1})] \end{matrix} \quad (42)$$

O Gráfico 11 mostra um exemplo do ajuste da curva no logaritmo natural da amplitude da transformada de Fourier, utilizando o *software* LabView 10.0™.

Gráfico 11 – Logaritmo natural da amplitude da transformada de Fourier com função de ajuste utilizando o software LabView 10.0™ - Condições de Operação: $m_{\text{esf_Al}} = 1,6 \text{ kg}$; $u_o/u_{mf} = 1,4$; $T_L = 70^\circ\text{C}$; $P_{\text{atom}} = 0,1 \text{ MPa}$; $C_{\text{susp}} = 9\%$; $Q_{\text{susp}} = 15 \text{ mL/min}$



Fonte: Autoria Própria (2017)

Com a realização do ajuste, foi possível obter os coeficientes a , b e c . Após isto, os coeficientes a e b foram substituídos na Equação (33) e (34), determinando-se o valor de frequência central (f_c) e do desvio padrão da distribuição espectral (σ).

Como já mencionado, o coeficiente c (Equação 35) da curva ajustada não é utilizado no cálculo da frequência central e do desvio padrão da distribuição espectral.

3.4 ESPECIFICAÇÃO DO FILTRO DIGITAL

Além do tipo e topologia do filtro, era necessário especificar a ordem, a qual afetava o valor da frequência central, para o mesmo ensaio experimental.

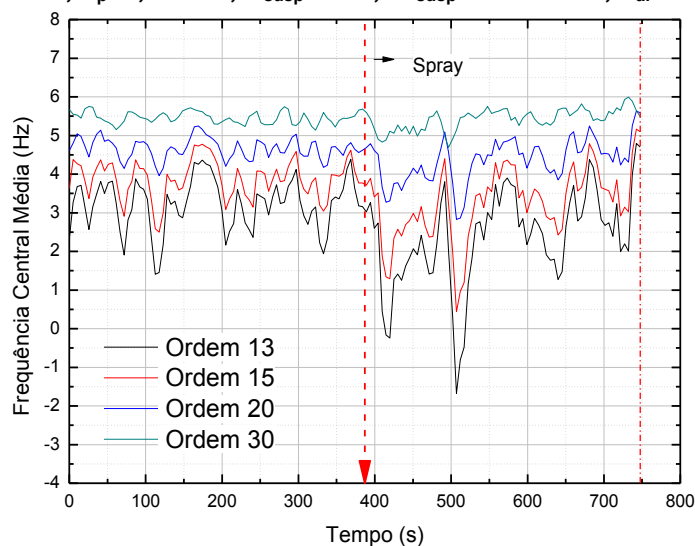
Para cada teste realizado, os sinais de pressão no *plenum* foram coletados e gravados em arquivos com extensão *lvm*, utilizando o filtro digital de resposta de impulso infinito (IIR), do tipo passa baixa, com topologia *Butterworth*.

Desta forma, variou-se a ordem do filtro em 13, 15, 20 e 30. Isto teve como finalidade a identificação do valor mínimo da ordem para que o perfil da frequência central resultasse somente em valores positivos, e assim, fixar tal valor para ser utilizado em todos os ensaios.

No entanto, a ordem do filtro que apresentou melhores resultados de frequência central teve valor de 20, pois os dados retirados desta ordem, apresentou

menor oscilação em seus resultados, quando comparado com a ordem do filtro em 15. Um exemplo do comportamento da frequência central com o aumento da ordem do filtro é mostrado no Gráfico 12.

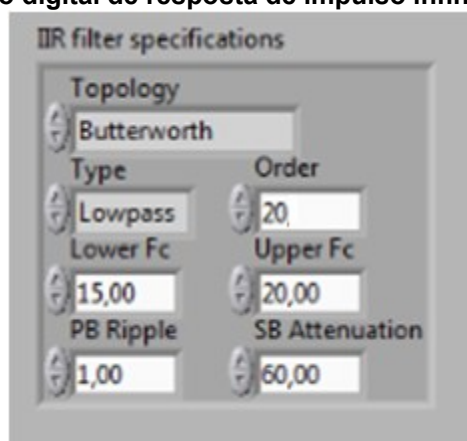
Gráfico 12 – Comportamento da frequência central em função da ordem do filtro. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $d_p=1,55$ mm, $C_{susp}=15\%$, $Q_{susp}=13$ mL/min, $T_{ar}=85^\circ\text{C}$, $u_o/u_{mf}=1,4$.



Fonte: Autoria Própria (2017)

A Figura 4 apresenta as especificações do filtro digital de resposta de impulso infinito (IIR) utilizadas em todos os ensaios experimentais.

Figura 4 – Especificações do filtro digital de resposta de impulso infinito (IIR).



Fonte: LabView (2015)

3.5 MÉTODO PARA MONITORAR A EFICIÊNCIA DE SECAGEM DAS PARTÍCULAS ATRAVÉS DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS

As propriedades psicrométricas foram monitoradas na entrada e saída da coluna de fluidização por dois termohigrômetros da marca NOVUS®, modelos N322 RHT e RHT-XS, respectivamente.

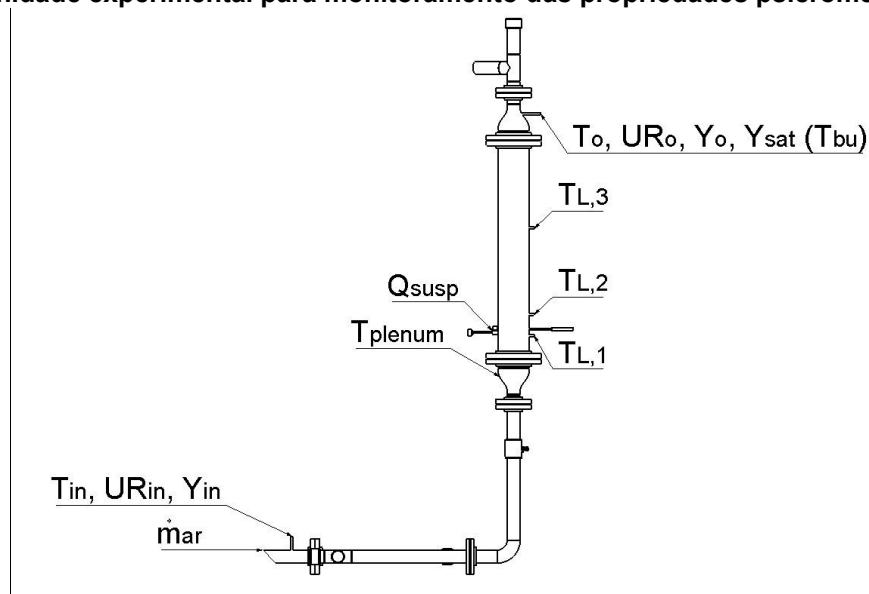
Estes dois sensores medem a umidade relativa do ar e a temperatura de bulbo seco, a fim de obter parâmetros psicrométricos que permitam quantificar a eficiência de secagem das partículas no processo de secagem em leito fluidizado.

O termohigrômetro na entrada foi inserido a montante das resistências elétricas, devido à sensibilidade térmica desse instrumento (superior a 70°C).

Os dados coletados de umidade relativa do ar e temperatura de bulbo seco na saída foram monitorados de forma *online*. Além disso, foi criada uma sub-rotina no *software* LabVIEW™ versão 10.0, onde foi possível obter a temperatura de bulbo úmido e a umidade absoluta na saída da coluna de fluidização, cujo cálculos foram listados no Apêndice C.

A Figura 5 apresenta a unidade experimental com os locais de monitoramento das propriedades psicrométricas do ar em tempo real.

Figura 5 – Unidade experimental para monitoramento das propriedades psicrométricas do ar



Fonte: Autoria Própria (2017)

Onde:

T_{in} : Temperatura de entrada de ar, °C;

UR_{in} : Umidade relativa na entrada, %;

Y_{in} : Umidade absoluta na entrada, kg água/kg ar seco;

\dot{m}_{ar} : Vazão mássica do ar na entrada da tubulação, kg/s;

T_{plenum} : Temperatura de ar no *plenum*, °C;

$T_{L,1}$: Temperatura no leito, na posição (1), °C;

$T_{L,2}$: Temperatura no leito, na posição (2), °C;

$T_{L,3}$: Temperatura no leito, na posição (3), °C;

Q_{susp} : Vazão de atomização de suspensão, mL/min.

T_o : Temperatura de saída de ar, °C;

UR_o : Umidade relativa na saída, %;

Y_o : Umidade absoluta na saída, kg água/kg ar seco;

$Y_{sat}(T_{bu})$: Umidade absoluta na condição de saturação na temperatura de bulbo úmido, kg água/kg ar seco;

T_{bu} : Temperatura de bulbo úmido, °C.

Foram distribuídos três sensores de termoresistência (Pt-100) axialmente na coluna de fluidização, sendo os dois primeiros distanciados entre si em aproximadamente 0,05 m, a partir da placa distribuidora de ar. Os sensores (1) e (2) foram envolvidos pelas partículas dentro da região de fluidização, a fim de obter a temperatura do leito. O sensor (3) foi situado próximo ao centro da coluna.

Vários pesquisadores têm avaliado a eficiência da secagem através do monitoramento dos parâmetros psicrométricos do ar na entrada e saída do leito, como é o caso de Kage et al (1996), que avaliaram a eficiência de secagem das partículas, baseando o estudo na razão da umidade absoluta do ar na saída (Y_o) e a umidade absoluta na condição de saturação adiabática (Y_s^{bu}), conforme a Equação (43).

$$R = \frac{Y_o}{Y_s^{bu}} \quad (43)$$

Onde :

R: Eficiência da secagem conforme Kage et al (1996), adimensional;

Y_o : Umidade absoluta do ar na saída, kg água/kg ar seco;

Y_s^{bu} : Umidade absoluta do ar na condição de saturação adiabática, kg água/kg ar seco.

Dewettinck et al (1999) avaliaram a eficiência de secagem conforme Equação (44), diferenciando do método do cálculo dos autores Kage et al (1996) devido à inclusão da umidade absoluta do ar na entrada, sendo esta, um fator importante na análise da eficiência de secagem:

$$E = \frac{(Y_o - Y_{in})}{(Y_s^{bu} - Y_{in})} \quad (44)$$

Onde:

E: Eficiência da secagem conforme Dewettinck et al (1999), adimensional;

Y_o : Umidade absoluta do ar na saída, kg água/kg ar seco;

Y_{in} : Umidade absoluta do ar na entrada, kg água/kg ar seco;

Y_s^{bu} : Umidade absoluta do ar na condição de saturação adiabática, kg água/kg ar seco.

De acordo com Hede et al (2008), a força de secagem (DF – *Drying Force*) é dada pela Equação (45). Os autores afirmam que a força de secagem pode ser utilizada como um indicativo de tendência à aglomeração, já que quanto menor for esse parâmetro, menor a taxa de evaporação da água, e maior é a tendência à aglomeração das partículas no leito. A força de secagem foi dada por:

$$DF = P_{vs}(T_L) \left[1 - \frac{UR_o}{100} \right] \quad (45)$$

Onde:

DF: Força de secagem, Pa;

P_{vs} : Pressão de vapor saturado na temperatura do leito, medido em Pa;

T_L : Temperatura do leito, °C;

UR_o : Umidade relativa do ar na saída da coluna de fluidização, %.

3.6 CÁLCULO DO COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (\bar{h}_a)

O coeficiente volumétrico de transferência de calor (\bar{h}_a) do processo de secagem foi determinado a partir de um balanço de massa e energia envolvendo o aquecimento e a evaporação da água presente na solução, bem como, a elevação da temperatura do carbonato de cálcio adicionado. Assim, o balanço de energia foi expresso por:

$$\dot{Q}_a + \dot{Q}_c + \dot{Q}_e = \dot{Q}_s \quad (46)$$

Onde:

\dot{Q}_a : Taxa de transferência de calor sensível da água, kW;

\dot{Q}_c : Taxa de transferência de calor sensível do CaCO₃, kW;

\dot{Q}_e : Taxa de transferência de calor latente de evaporação da água, kW;

\dot{Q}_s : Taxa de transferência de calor da secagem, kW.

O primeiro termo do lado esquerdo da Equação (46) foi definido na Equação (47) como:

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a \cdot c_{p_a} \cdot (T_{bu,o} - T_{alim}) \quad (47)$$

Onde:

\dot{m}_a : Vazão mássica da água na solução, kg/s, determinada pela Equação (39);

c_{p_a} : Calor específico da água, kJ/kg.K;

$T_{bu,o}$: Temperatura de bulbo úmido do ar na saída do leito, K;

T_{alim} : Temperatura de alimentação da solução, K.

Expressando o segundo termo do lado esquerdo da Equação (46), têm-se:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot c_{p_c} \cdot (T_{bu,o} - T_{alim}) \quad (48)$$

Onde:

\dot{m}_c : Vazão mássica do carbonato de cálcio na solução, kg, determinada pela Equação (42);

c_{p_c} : Calor específico do carbonato de cálcio, kJ/kg.K;

$T_{bu,o}$: Temperatura de bulbo úmido do ar na saída do leito, K;

T_{alim} : Temperatura de alimentação da solução, K.

O calor específico da água (c_{p_a}) e do carbonato de cálcio (c_{p_c}) foram obtidos utilizando a média entre a temperatura da solução e a temperatura de bulbo úmido na saída do secador.

As vazões mássicas da água (\dot{m}_a) e do carbonato de cálcio na solução (\dot{m}_c) foram descritos por:

$$\dot{m}_a = \frac{m_a}{V_{sol}} \cdot Q_{susp} ; \dot{m}_c = \frac{m_c}{V_{sol}} \cdot Q_{susp} \quad (49)$$

Onde:

m_a : Massa de água na solução, kg;

m_c : Massa de carbonato de cálcio na solução, kg;

V_{sol} : Volume da solução, m³;

Q_{susp} : Vazão de atomização de suspensão, m³/s.

A massa de água na solução (m_a) foi descrito conforme Equação (50):

$$m_a = m_{sol} - m_c \quad (50)$$

Onde:

m_{sol} : Massa da solução, kg;

O terceiro termo do lado esquerdo da Equação (46) foi obtido da seguinte forma:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_a(h_{g,a} - h_{l,a}) \quad (51)$$

Onde:

\dot{m}_a : Vazão mássica da água na solução, kg/s, determinada pela Equação (49);

$h_{g,a}$: Entalpia do vapor saturado da água, kJ/kg;

$h_{l,a}$: Entalpia do líquido saturado da água, kJ/kg.

A entalpia do vapor saturado da água ($h_{g,a}$) e a entalpia do líquido saturado da água ($h_{l,a}$) foram obtidos na média das temperaturas da solução e da temperaturas de bulbo úmido na saída do secador.

O primeiro termo do lado direito da Equação (46) foi definido como:

$$\dot{Q}_s = \bar{h}a \cdot V_S \cdot (\Delta T)_{LN,S} \quad (52)$$

Onde:

$\bar{h}a$: Coeficiente volumétrico de transferência de calor, kW/m³.K;

V_S : Volume do secador, m³, determinado pela Equação (53);

$(\Delta T)_{LN,S}$: Diferença de temperatura média logarítmica no secador, °C, determinada pela Equação (54);

O volume do secador (V_S) foi descrito da seguinte maneira:

$$V_S = \frac{\pi \cdot D_{int}^2}{4} h_S \quad (53)$$

Onde:

D_{int} : Diâmetro interno do leito, m;

h_S : Altura do secador, m.

Assim, a diferença de temperatura média logarítmica no secador $(\Delta T)_{LN,S}$ foi determinado por:

$$(\Delta T)_{LN,S} = \frac{(T_{in} - T_{bu,in}) - (T_o - T_{bu,o})}{\ln\left(\frac{T_{in}-T_{bu,in}}{T_o-T_{bu,o}}\right)} \quad (54)$$

Onde:

T_{in} : Temperatura da entrada do ar no secador, °C;

$T_{bu,in}$: Temperatura de bulbo úmido do ar na entrada do secador, °C;

T_o : Temperatura da saída do ar no secador, °C;

$T_{bu,o}$: Temperatura de bulbo úmido do ar na saída do secador, °C.

Desta forma, o cálculo do coeficiente volumétrico de transferência de calor, pode ser obtido pela Equação (55):

$$\bar{h}_a = \frac{\dot{Q}_a + \dot{Q}_c + \dot{Q}_e}{V_S \cdot (\Delta T)_{LN,S}} \quad (55)$$

Salientando-se que, para o cálculo do coeficiente volumétrico de transferência de calor, foram utilizados apenas os ensaios de secagem que permaneceram em condições estáveis de fluidização.

3.7 ORGANIZAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção são descritos a organização e os procedimentos experimentais para realização de cada ensaio.

3.7.1 Organização dos Dados Experimentais

Segue a organização experimental, referente à obtenção da curva fluidodinâmica e a organização para obtenção dos resultados no processo de secagem.

3.7.1.1 Obtenção da Curva Fluidodinâmica

Para obtenção da curva fluidodinâmica, com o intuito de obter a velocidade de mínima fluidização, foram utilizadas esferas de alumínio e de vidro, ambas com diâmetro médio da partícula de 1,55 mm e temperatura do ar de entrada no *plenum* de 85°C. Os dados de pressão foram coletados no *plenum*.

3.7.1.2 Obtenção dos Resultados no Processo de Secagem

A organização experimental para obtenção dos resultados no processo de secagem foi realizada seguindo os moldes de um planejamento fatorial. Salienta-se que não foram realizados estudos de planejamento fatorial visando a obtenção de modelos otimizados e superfície de resposta.

A Tabela 2 refere-se à organização experimental no processo de secagem para a esfera de alumínio e de vidro, ambas com diâmetro médio da partícula de 1,55 mm, $u_0/u_{mf} = 1,4$, $h_L/D_{int} = 1,0$ e temperatura do *plenum* de 85°C.

Tabela 2 – Organização Experimental no processo de secagem

Esfera de Vidro		
Ensaio	C _{susp} (%)	Q _{susp} (mL/min)
1	15	15,0
2	15	13,0
3	15	11,0
4	9	15,0
5	9	13,0
6	9	11,0
Esfera de Alumínio		
Ensaio	C _{susp} (%)	Q _{susp} (mL/min)
1	15	15,0
2	15	13,0
3	15	11,0
4	9	15,0
5	9	13,0
6	9	11,0

Fonte: Autoria Própria (2017)

A concentração da solução foi pré-estabelecida em 9 e 15%, em massa. Acima da concentração de 15% o bico atomizador obstruía e abaixo de 9%, o leito se mantinha em fluidização estável. Em relação a escolha da faixa de vazão de atomização da solução, foi verificado que superior a 15 mL/min, o leito defluidizava rapidamente (próximo de 30 s) e inferior a 11 mL/min, o leito se mantinha em fluidização estável em um tempo máximo de experimento de 1h e 15 min. A vazão de 13 mL/min foi escolhida, por se tratar de uma vazão intermediária entre as propostas neste trabalho.

Quanto à escolha da temperatura do ar de entrada no *plenum* e à razão de velocidade superficial do ar e velocidade mínima de fluidização foi determinada em 85°C e 1,4, respectivamente, visto que a partir de testes preliminares, abaixo destes parâmetros, o leito defluidizava rapidamente e acima destes valores, o leito se mantinha em condições estáveis de fluidização, em todas as condições operacionais proposta nesta dissertação.

3.7.2 Procedimento dos ensaios de secagem de pasta

Em todos os ensaios experimentais realizados, o procedimento utilizado é composto pelas seguintes etapas:

Inicialmente, preparou-se a solução de carbonato de cálcio (CaCO_3) em um balão volumétrico de fundo chato e verificou-se a temperatura da solução.

A seguir, alimentou-se o leito com as partículas sólidas pré-definidas, com massa de 1,6 kg ($h_L/D_{\text{int}} = 1,0$), conforme organização experimental (Tabela 2).

Ativou-se o inversor de frequência e aumentou-se gradativamente, a fim de verificar em que valor se atingia a vazão de ar de 1,4 vezes a velocidade de mínima fluidização.

Após este procedimento, ligou-se a resistência elétrica e aqueceu-se o leito na temperatura de 85 °C, permanecendo nesta condição por 40 minutos, com o intuito de estabilizar a temperatura das partículas no interior da coluna de fluidização, verificado através de sensores de termoresistências (Pt-100) ao longo do leito.

Em seguida, ajustou-se a vazão de suspensão da bomba peristáltica conforme a organização experimental e colocou-se, sob o agitador magnético, a solução diluída que se encontrava em um béquer. Regulou-se a pressão de atomização da solução diluída em 0,1 MPa.

Em seguida, verificou-se a pressão atmosférica de Ponta Grossa/PR (através do *site* da SIMEPAR) no momento da realização do experimento. Após esse procedimento, mediu-se a temperatura e umidade relativa do ar na entrada da tubulação (termohigrômetro localizado a montante da resistência elétrica) e calculou-se a umidade absoluta nesta temperatura.

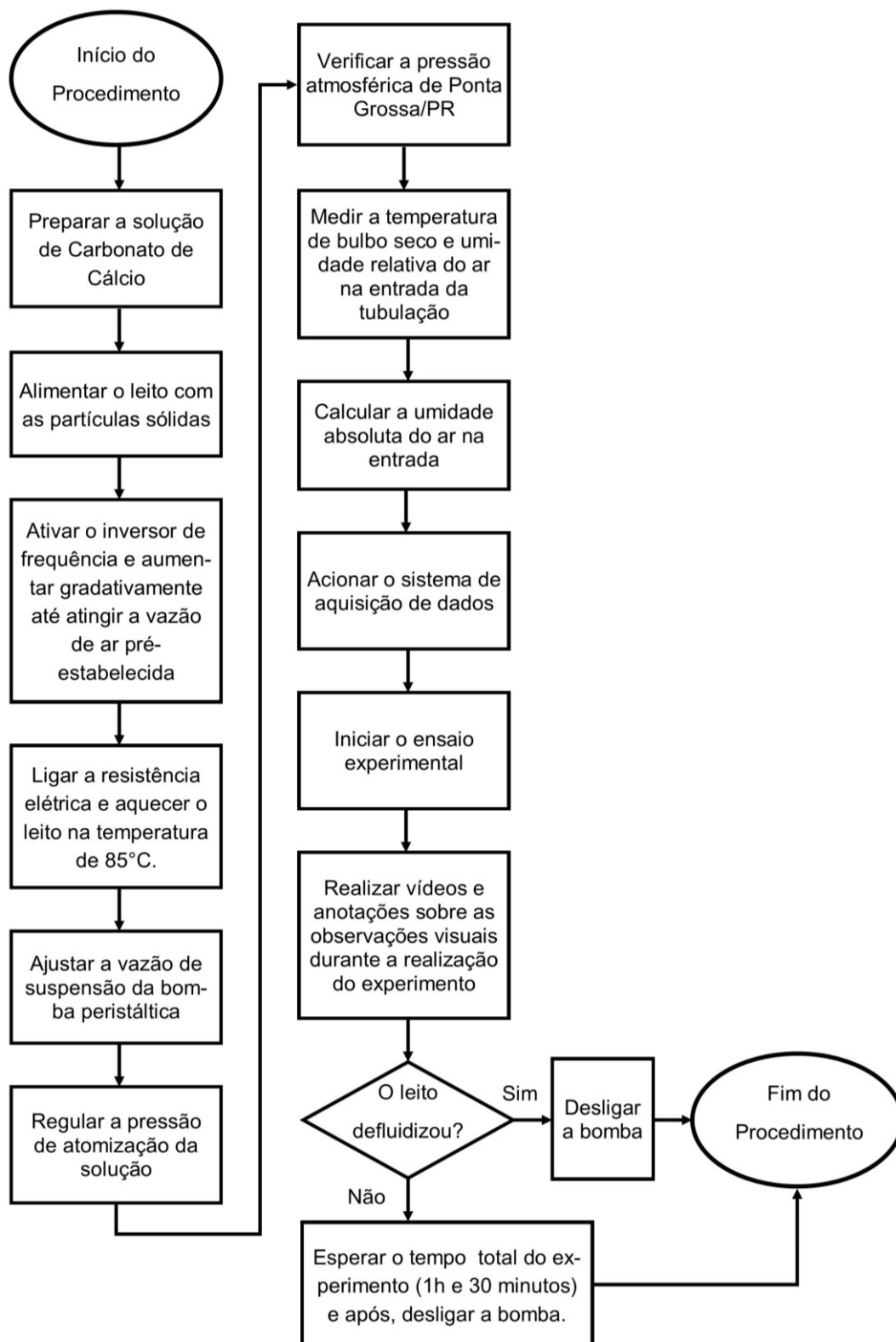
Em seguida, acionou-se o sistema de aquisição de dados e iniciou-se o ensaio experimental.

Para avaliar e auxiliar nas análises dos resultados, foram realizados vídeos e anotações sobre as observações visuais durante a realização do experimento. Ressalta-se que todos os dados foram gravados em extensão *lvm*.

Ao término de cada ensaio experimental, retiraram-se todas as partículas do leite.

As etapas deste procedimento experimental estão resumidas no fluxograma da Figura 6:

Figura 6 – Fluxograma referente ao procedimento experimental.



Fonte: Autoria Própria (2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, abordam-se os resultados referentes a:

- Obtenção experimental da velocidade de mínima fluidização (através da curva fluidodinâmica e do perfil da frequência central) para as partículas de esferas de alumínio e de vidro;
- Os resultados obtidos via úmida, por meio dos ensaios de secagem de suspensão diluída, avaliando a fluidodinâmica (com o intuito de verificar a possibilidade da identificação da região do fenômeno de defluidização, através do método da análise espectral Gaussiana) e os parâmetros psicrométricos do ar, verificando a influência nos seguintes aspectos:
 - Da concentração da suspensão e do material inerte;
 - Da vazão de atomização da suspensão.
- Cálculo do coeficiente volumétrico de transferência de calor nos ensaios com estabilidade fluidodinâmica.

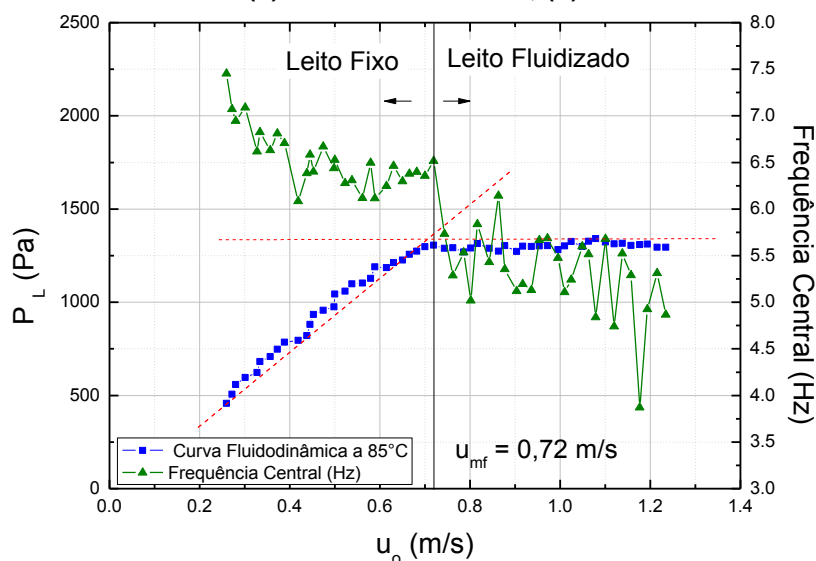
Ressalta-se que, os experimentos não reportados neste item, podem ser visualizados no Apêndice D.

4.1 CURVAS FLUIDODINÂMICAS

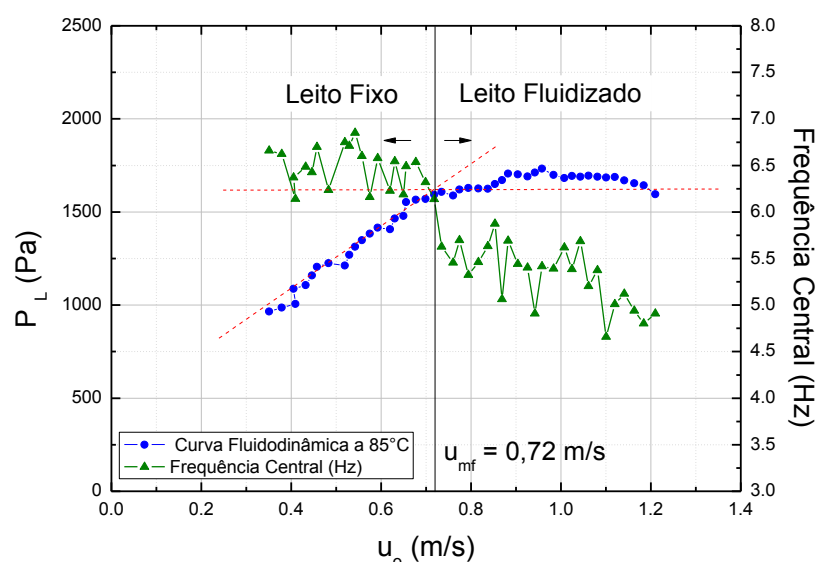
A velocidade de mínima fluidização, tanto para as esferas de alumínio, quanto para as de vidro, foi determinada através da curva fluidodinâmica juntamente com o perfil da frequência central, com temperatura do ar de entrada no *plenum* de 85°C.

Os Gráficos 13(a e b) ilustram as curvas fluidodinâmicas juntamente com o perfil da frequência central referentes às esferas de alumínio e de vidro, respectivamente. Para ambos os materiais, a velocidade de mínima fluidização foi de 0,72 m/s.

Gráfico 13 – Curva fluidodinâmica (a) Esfera de Alumínio; (b) Esfera de Vidro



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2017)

Segundo Parise (2007), a velocidade de mínima fluidização pode ser obtida experimentalmente através da curva fluidodinâmica juntamente com o auxílio do perfil da frequência central. Diversos trabalhos da literatura (PARISE, 2007; PARISE et al, 2008; SILVA et al, 2009; SILVA et al, 2011; SILVA, 2015, SCHAFFKA et al, 2015) afirmam que a região onde o leito está tendendo à defluidização é caracterizada pela queda acentuada deste parâmetro, e é sempre comparado com a curva fluidodinâmica, a fim de verificar se realmente situa-se nas proximidades do fim da movimentação das partículas no leito. No entanto, verificou-se através dos ensaios

fluidodinâmicos em atmosfera seca, que não houve esta queda acentuada da frequência central.

4.2 ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA E DOS PARÂMETROS PSICROMÉTRICOS NO PROCESSO DE SECAGEM DE SUSPENSÃO

Neste item serão abordados os resultados obtidos via úmida, por meio dos ensaios de secagem de suspensão diluída, avaliando a fluidodinâmica (com o intuito de analisar a possibilidade de identificação da região de defluidização, através do método da análise espectral Gaussiana) e os parâmetros psicrométricos do processo, verificando a influência da concentração da suspensão e do material inerte, assim como da vazão de atomização da suspensão diluída.

4.2.1 Análise dos Resultados Avaliando a Influência da Concentração de Suspensão e o Tipo de Material Inerte

A fim de analisar a fluidodinâmica, com o intuito de verificar a possibilidade de identificação da região de defluidização no processo de secagem de suspensão diluída, foi aplicada a análise espectral Gaussiana dos sinais de flutuação de pressão. Este método fornece os valores da frequência central e do desvio padrão da distribuição espectral, que permite verificar os diferentes comportamentos quanto à intensidade de borbulhamento aplicado no leite.

Como estes parâmetros oscilam consideravelmente mesmo em regime borbulhante (fluidização estável), foi utilizada a média aritmética acumulativa a cada três valores coletados durante os testes experimentais. Este tipo de procedimento também foi utilizado por Silva (2015) para a obtenção da frequência central e do desvio padrão da distribuição espectral. O autor afirma que a técnica utilizada é equivalente à realização de um procedimento de filtragem ou de suavização de oscilação de dados. Assim, para cada três medidas de frequência central e do desvio padrão da distribuição espectral coletados, apenas um valor médio foi analisado.

Neste capítulo, são abordados apenas os ensaios de secagem de alta vazão, ou seja, de 15 mL/min. Os experimentos com as demais vazões de atomização estão listados no Apêndice D, sendo a análise muito semelhante a que foi desenvolvida neste capítulo, além de apresentarem resultados similares ao da alta vazão.

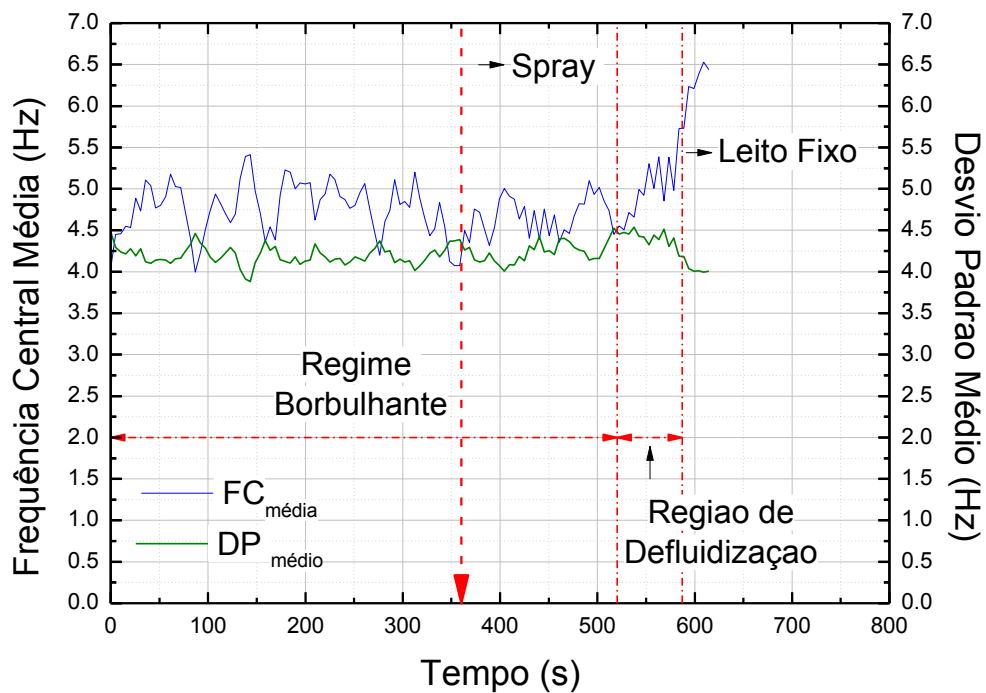
Os Gráficos 14(a e b) apresentam os perfis da frequência central média e do desvio padrão médio da distribuição espectral, para as partículas de esfera de vidro, com vazão de atomização da suspensão de 15 mL/min e com concentração da suspensão de 9 e 15%, respectivamente.

Com o auxílio das observações visuais durante o experimento, confirmou-se nos Gráficos 14(a e b) que, no início do ensaio, a fluidização pertencia ao regime borbulhante. A frequência central média nesse regime foi de aproximadamente 4,8 Hz e, o desvio padrão médio da distribuição espectral, de 4,3 Hz, ressalta-se que a frequência central média mede a intensidade de borbulhamento, enquanto que o desvio padrão médio da distribuição espectral mede a dispersão em torno da média, no qual os espectros de pressão obtidos aproximam-se da função exponencial Gaussiana. O aumento do desvio padrão está relacionado ao distanciamento dos espectros de pressão da função exponencial, na região de defluidização, sendo mais alto na região de fluidização mais crítica, pois o espectro do leito fluidizado é completamente descaracterizado.

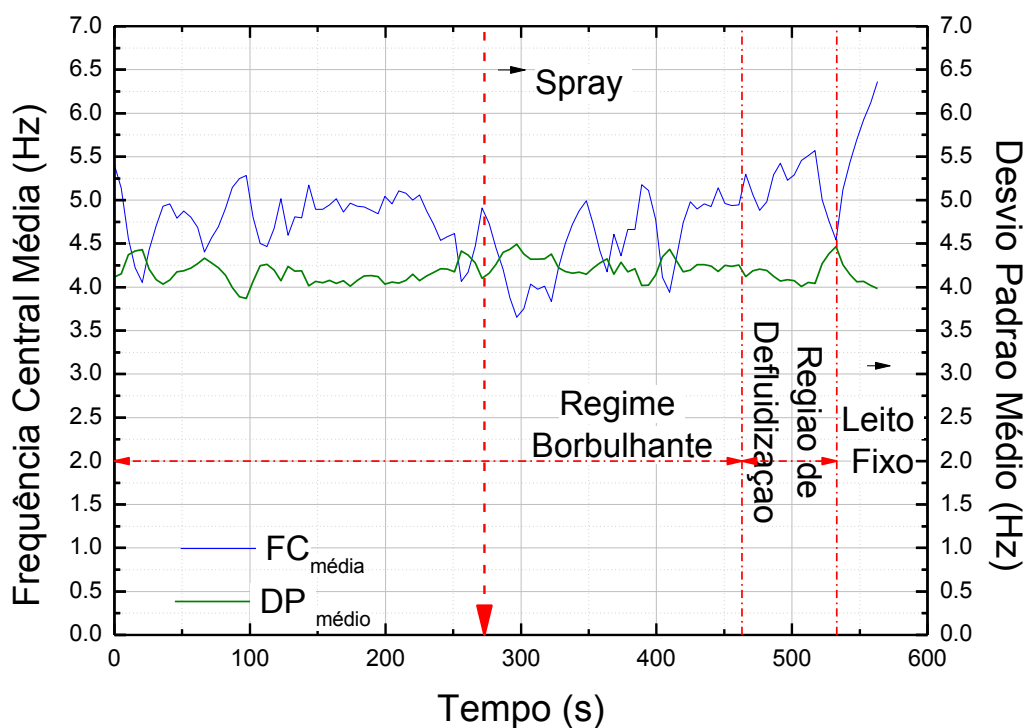
Quando se inicia a atomização da suspensão, a fluidização pertencia ao regime borbulhante. Através das observações visuais, foi possível verificar que o leito apresentava bolhas grandes e uma movimentação intensa das partículas. A frequência central média estava próxima de 4,8 Hz e o desvio padrão médio da distribuição espectral de 4,3 Hz. Conforme têm-se continuidade da atomização da suspensão no leito ao longo do tempo, pôde-se visualizar que o início da aglomeração do leito ocorreu a partir de 520 s de ensaio no Gráfico 14(a) e a partir de 463 s no Gráfico 14(b), dando início a região de defluidização, com redução gradativa do volume das bolhas e da quantidade das mesmas no interior da coluna. A partir deste instante, o leito tornou-se mais instável e úmido, formando aglomerados maiores, reduzindo a quantidade e o volume das bolhas de ar para ambas as concentrações. Além disso, observou-se que, à medida que o leito tendia ao leito fixo, as bolhas eram visualizadas apenas na superfície do leito, e não se observava movimento das partículas na parte inferior do leito, próxima à placa distribuidora.

Adicionalmente, na região de defluidização, o valor da frequência central média incrementou gradualmente, e após esse tempo, a região de leito fixo foi atingida com um valor máximo da frequência central média com oscilação em torno de 6,5 Hz e desvio padrão médio da distribuição espectral de 4,0 Hz nos Gráficos 14(a e b).

Gráfico 14 – Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2017)

O Gráficos 15(a e b) apresentam os perfis da frequência central média e do desvio padrão médio da distribuição espectral, para as partículas de alumínio, com vazão de atomização de 15 mL/min e concentração da suspensão de 9 e 15%, respectivamente. Através de observações visuais realizadas durante o experimento, observou-se que no início do teste, o regime se encontrava em borbulhante, com aparições de bolhas grandes ao longo do leito. Nesse regime de fluidização, o valor da frequência central média era de 5,0 Hz e o desvio padrão médio da distribuição espectral de 4,2 Hz. Quando se deu o início à atomização, foi observado que o regime era do tipo borbulhante, obtendo a mesma faixa de frequência central média e desvio padrão médio da distribuição espectral antes da atomização de líquido, com formação de grandes aglomerados, com redução acentuada da quantidade das bolhas, dando início a região de defluidização. Além disso, verificou-se também, uma grande instabilidade fluidodinâmica, devido ao excesso de umidade que deixou o leito cada vez mais pesado, com presença de bolhas pequenas apenas na superfície do leito. No início da região de defluidização, a frequência central média começou a aumentar gradativamente ao longo do tempo, atingindo a região de leito fixo com valor máximo de frequência central de 6,3 Hz. Nessa mesma região, o desvio padrão médio da distribuição espectral começou a diminuir em um valor mínimo próximo de 4,0 Hz no Gráfico 15(a) e de 3,7 Hz no Gráfico 15(b) nesta região.

Verificou-se que a concentração da solução e o tipo de material inerte apresentou pouca influência para modificar a secagem e as transições dos regimes fluidodinâmicos no leito para as condições experimentais utilizadas no presente trabalho, visto que os parâmetros de frequência central média e desvio padrão médio da distribuição espectral se mantiveram muito próximos em ambas as concentrações de solução, 9 e 15% e também quanto ao tipo de material inerte utilizado. No entanto, comparando as partículas de vidro e alumínio, o tempo para alcançar a região de defluidização com a concentração de 9%, ocorreu mais rapidamente, comparado à concentração de 15%, devido a quantidade de água na concentração de 9% ser superior à de 15%. Da mesma forma, que comparando o tipo de material inerte e mesma concentração de solução, verificou-se que o tempo para atingir esta região, foram diferentes, visto que foi utilizado materiais distintos. Com as partículas de alumínio, o tempo para atingir a região de defluidização foram maiores, quando comparados às partículas de vidro, decorrente a esfera de alumínio possuir condutividade térmica superior à de vidro, fazendo com que as colisões entre

partícula-partícula aconteçam de forma a desprender mais rapidamente o filme seco das partículas de alumínio do que com as de vidro, devido à diferença de aderência desta fina camada de solução em cada inerte, conseqüentemente aumentando o tempo do processo de secagem e alterando o tempo para alcançar a região de defluidização.

Adicionalmente, verificou-se que não foi possível identificar claramente a região de defluidização utilizando a metodologia de análise espectral Gaussiana, tanto para as condições específicas para as partículas de alumínio, quanto para as de vidro, visto que a frequência central média não apresentou um decréscimo acentuado nos casos apresentados, como já verificado em outros trabalhos (PARISE, 2007; PARISE et al, 2008; SILVA et al, 2009; SILVA et al, 2011; SILVA, 2015). Salientando-se que nestes estudos, foram utilizadas partículas sólidas pertencentes ao Grupo B de Geldart, e no caso do presente trabalho, os materiais inertes pertenciam ao Grupo D.

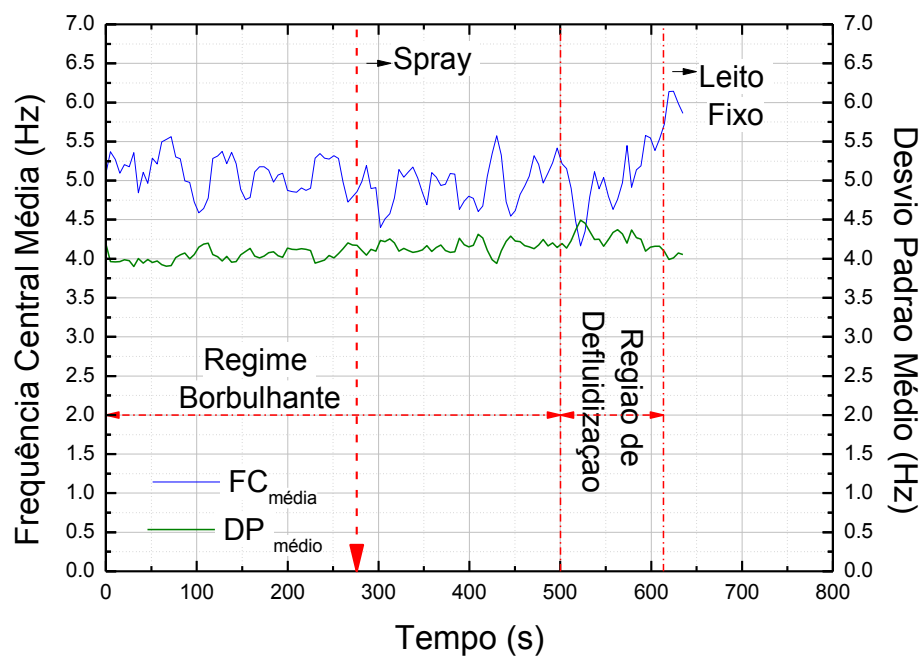
O diâmetro médio das partículas pode ter influenciado nos valores obtidos da frequência central média, visto que esta se manteve na região estável de fluidização em torno de 4,7 Hz, sendo inferiores à alguns trabalhos reportados da literatura, onde normalmente utilizou-se diâmetro das partículas menores que 1,55 mm (PARISE, 2007; PARISE et al, 2008; SILVA et al, 2009; SILVA et al, 2011; SILVA, 2015).

A maioria dos trabalhos propostos na literatura (como por exemplo, PARISE, 2007; PARISE et al, 2008; SILVA et al, 2009; SILVA et al, 2011; SILVA, 2015) utilizaram diâmetros de partículas na faixa de 100 a 500 μm , sendo possível identificar claramente a região de defluidização através da análise espectral Gaussiana. No entanto, no presente trabalho optou-se por utilizar diâmetro de partículas de 1,55 mm, visto que no trabalho de Meili (2009), o autor afirma que em leitos fluidizados, as melhores condições em relação ao processo de secagem, utilizando carbonato de cálcio podem ser visualizadas utilizando partículas de vidro próximo de 1,55 mm, sendo este o motivo que levou a utilização de partículas com diâmetros elevados. Contudo, utilizando este diâmetro de partícula tanto para a esfera de alumínio quanto para a de vidro, a região de defluidização não pôde ser claramente identificada pelo método da análise espectral Gaussiana.

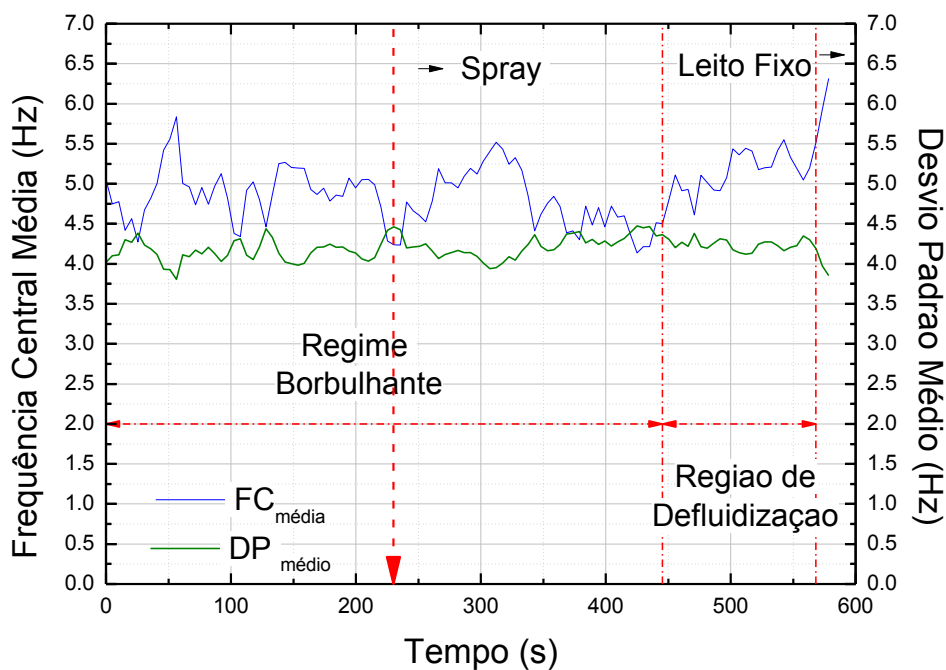
A transferência de energia das frequências intermediárias (características de um leito borbulhante, tais como as obtidas neste trabalho, 4,7 Hz) para a região de defluidização do leito (região teoricamente de baixa frequência), não foi observada,

pois a aglomeração e, portanto, o início do processo do leito fixo, ocorrem muito rápido.

Gráfico 15 – Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $Q_{\text{susp}}=15$ mL/min. (a) $C_{\text{susp}}=9\%$; (b) $C_{\text{susp}}=15\%$.



(a)

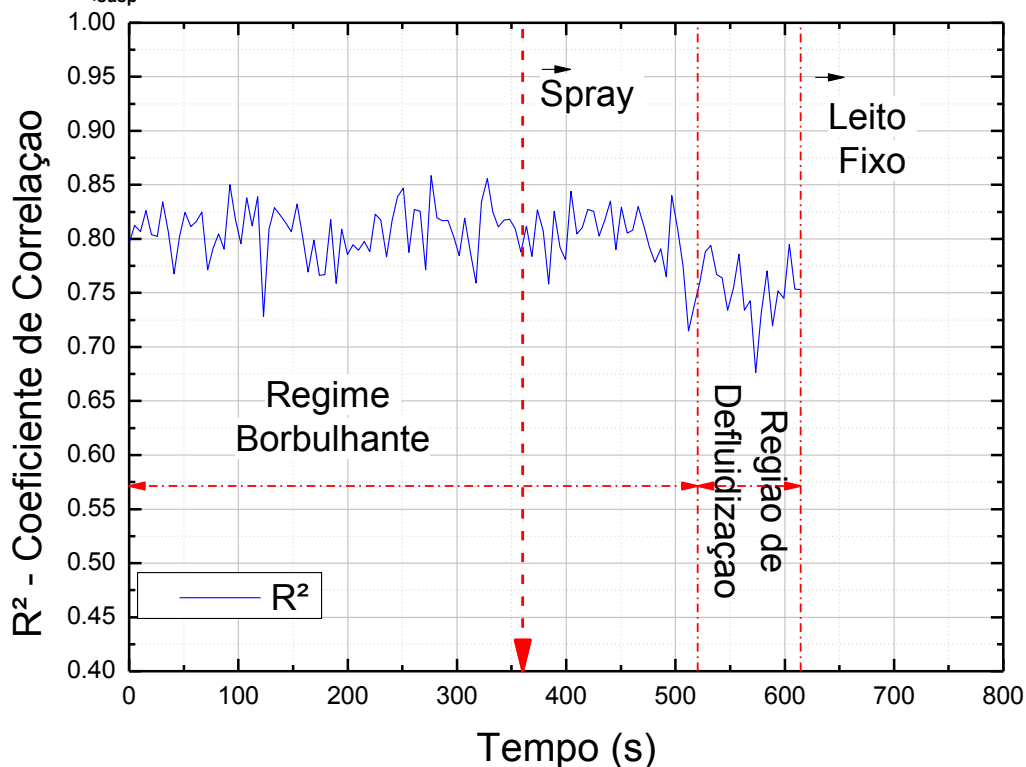


(b)

Fonte: Autoria Própria (2017)

O Gráfico 16 mostra o perfil do coeficiente de correlação (R^2) ao longo do tempo de secagem. Esse parâmetro é obtido através do ajuste dos dados das amplitudes espectrais medidas com a função exponencial Gaussiana, em função do tempo total do experimento, que varia de 0 a 1,0. Quanto mais próximo de 1,0 este parâmetro estiver, mais forte é a relação linear com o perfil da Gaussiana. Pode-se visualizar nesse gráfico uma redução deste coeficiente, na região de defluidização. Esse comportamento é devido ao fato de que, nessa região, o espectro de pressão perde a forma de distribuição em frequência semelhante à função normal Gaussiana. Este perfil do coeficiente de correlação mostrou-se ser mais eficiente para detectar a região de defluidização através do método da análise espectral Gaussiana utilizando partículas pertencentes ao Grupo D de Geldart.

Gráfico 16 – Evolução do coeficiente de correlação (R^2) no ajuste do método da análise espectral Gaussiana em função do tempo de experimento. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $C_{susp}=9\%$ e $Q_{susp}=15$ mL/min



Fonte: Autoria Própria (2017)

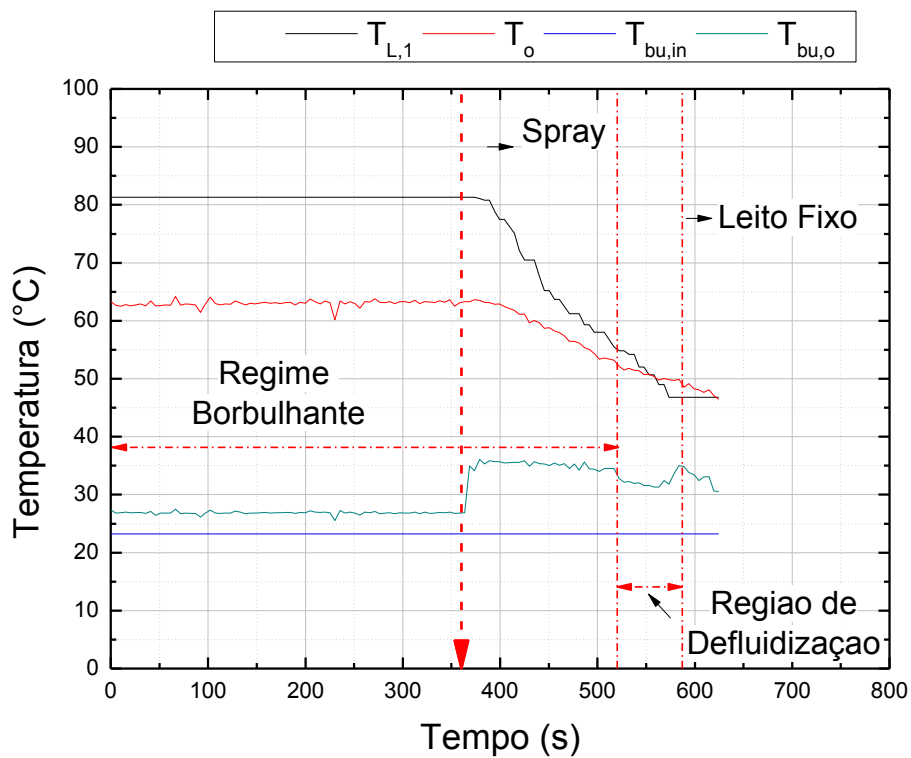
O Gráficos 17(a e b) e os Gráficos 18(a e b) ilustram os perfis de temperatura no leito, assim como das temperaturas resultantes dos cálculos psicrométricos, tal como a temperatura de orvalho e bulbo úmido na entrada e na saída, além das

temperaturas de bulbo seco do ar na saída do processo de secagem contendo partículas inertes de vidro (Gráficos 17 (a e b)) e de alumínio (Gráficos 18(a e b)), com vazão de atomização de 15 mL/min e concentração da solução de 9 e 15%, respectivamente.

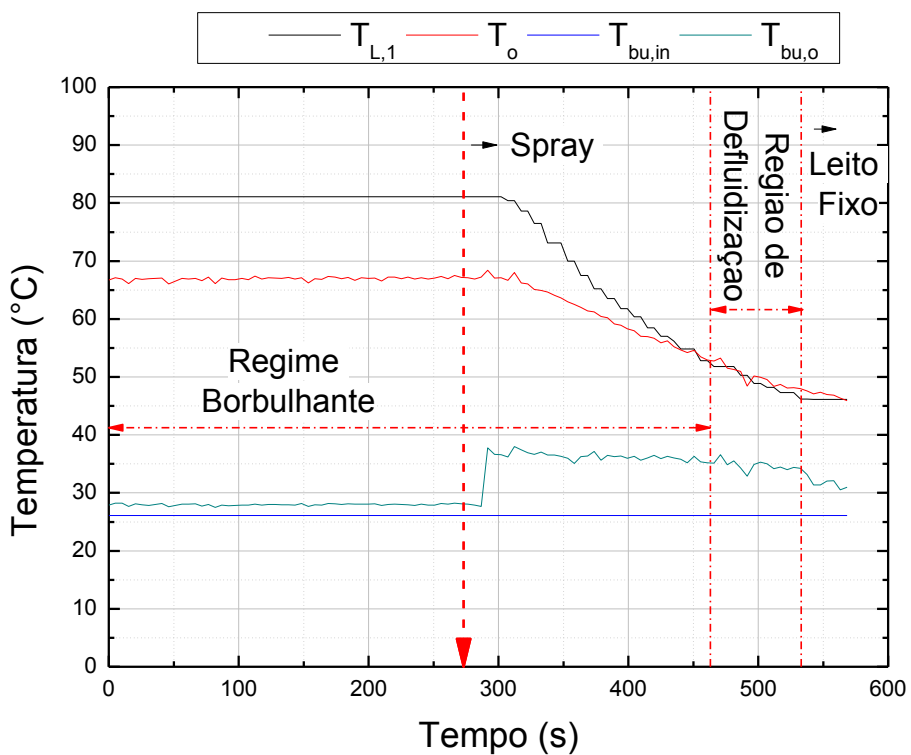
Nos Gráficos 17(a e b) e nos Gráficos 18(a e b), foi verificado que, após a atomização de líquido, ocorreu um decréscimo da temperatura do leite e do bulbo seco do ar na saída, devido à diferença de temperatura do ar de secagem e da solução de atomização. No final do experimento, a redução da capacidade de secagem no interior do leite foi verificada devido ao decréscimo acentuado das temperaturas do leite e de bulbo seco do ar na saída e também pela aproximação das temperaturas de bulbo úmido do ar de saída com o da entrada, tendo um desvio destas últimas temperaturas próximo de 5°C na região de defluidização, indicando que houve saturação do leite na temperatura de bulbo úmido do ar de saída.

Desta forma, verificou-se que houve pouca influência da concentração de solução e do tipo de material inerte em relação aos perfis de temperatura do ar e do leite, visto que a mudança de concentração da suspensão conduziu o leite à saturação em ambos os casos apresentados para a esfera de vidro. No entanto, a queda destes parâmetros em relação à concentração de solução de 9%, ocorreu de forma mais acentuada do que com a concentração de 15%, que pode ser justificado devido a quantidade maior de água na concentração da solução de 9%, tentando a estabilizar-se no equilíbrio de forma mais rápida. Por outro lado, comparando o tipo de material inerte, a redução dos perfis de temperatura do ar e do leite com as partículas de alumínio foram mais acentuadas do que utilizando os inertes de vidro.

Gráfico 17 – Perfil de temperatura do ar e do leito. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$.



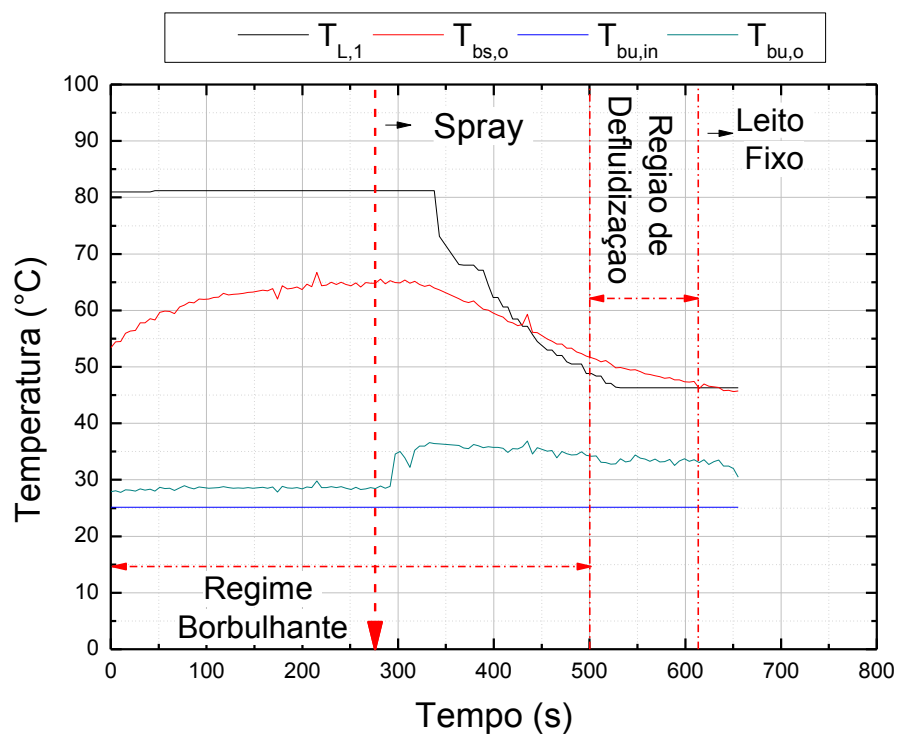
(a)



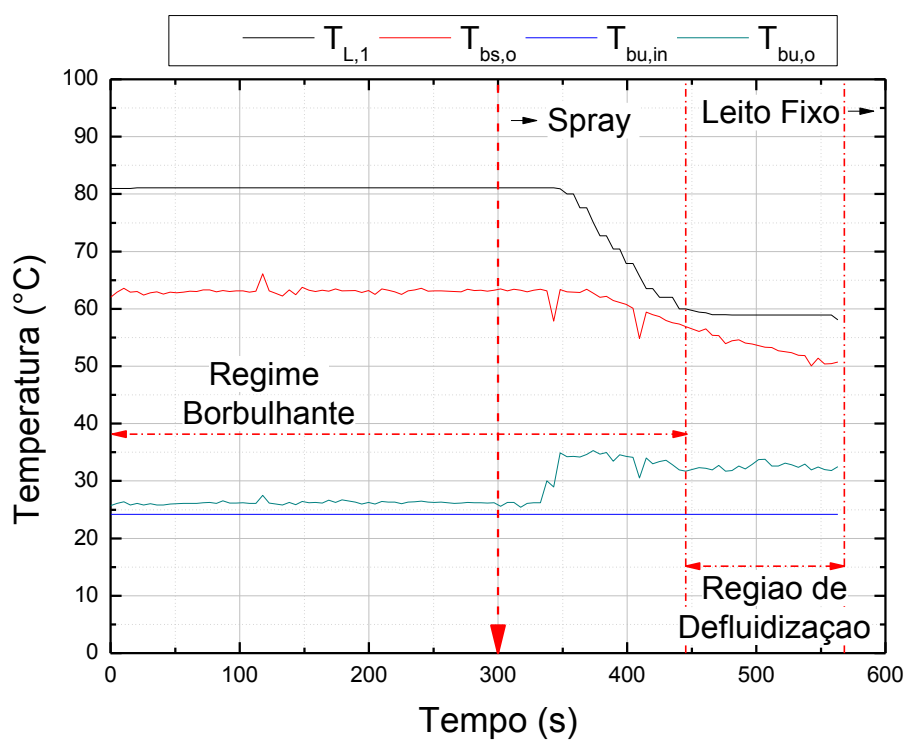
(b)

Fonte: Autoria Própria (2017)

Gráfico 18 – Perfil de temperatura do ar e do leito. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2017)

Os Gráficos 19(a e b) e os Gráficos 20(a e b) ilustram os perfis de umidade do ar no processo de secagem contendo partículas inertes de vidro (Gráficos 19(a e b)) e alumínio (Gráficos 20(a e b)), com vazão de atomização de 15 mL/min e concentração da solução de 9 e 15%, respectivamente.

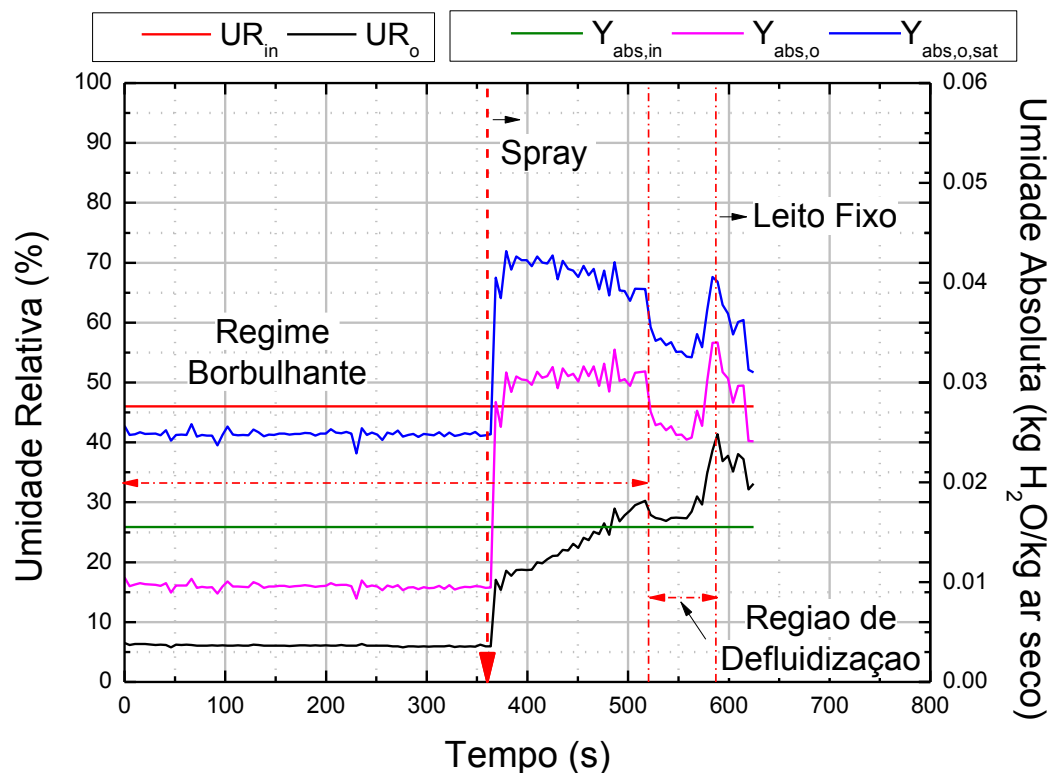
Nos Gráficos 19(a e b) e nos Gráficos 20(a e b) verificou-se que os perfis de umidade, tanto relativa quanto absoluta do ar indicaram a aproximação com a condição de saturação do leito, devido ao excesso de umidade nas partículas e no leito dentro da coluna de fluidização. Um pico máximo de umidade absoluta e de saturação do ar é atingido durante um período transiente decorrente dos instantes iniciais da atomização e da distribuição da umidade no interior do leito e sobre as partículas. Na região de defluidização, a umidade absoluta do ar da saída tende à umidade na condição de saturação adiabática e a umidade relativa do ar aumentou acentuadamente até o final do experimento.

No final do experimento do Gráfico 19(a), atingiu-se uma umidade relativa e absoluta na saída da coluna de fluidização de 35% e 0,028 kg de água/kg ar seco, respectivamente, assim como a umidade absoluta de saturação atingiu em 0,034 kg de água/kg ar seco e no Gráfico 19(b) a umidade relativa do ar na saída, alcançou um valor máximo de 41% e de umidades absolutas do ar na saída e de saturação, houve uma redução atingindo valores de 0,026 e 0,033 kg água/kg ar seco, respectivamente.

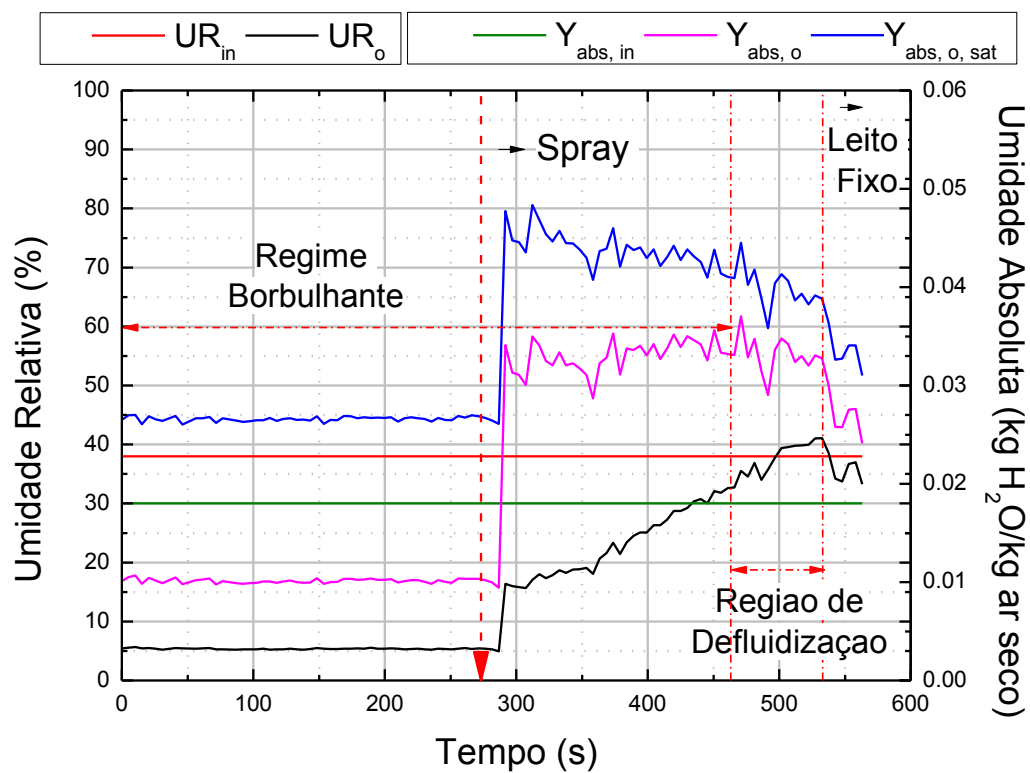
No Gráfico 20(a) verificou-se que no final do experimento, a umidade relativa alcançou um valor de 42%, enquanto que a umidade absoluta e de saturação do ar na saída, obtiveram valores de 0,032 e 0,035 kg de água/kg ar seco, respectivamente. No Gráfico 20(b) a umidade relativa do ar na saída atingiu um pico máximo de 30%, enquanto que a umidade absoluta e de saturação do ar na saída de 0,026 e 0,034 kg de água/kg ar seco, respectivamente.

Desta forma, concluiu-se que os valores atingidos de umidade relativa, absoluta e de saturação no final do experimento, utilizando partículas de vidro e de alumínio, foram próximos, mesmo que alterando a concentração da solução diluída e o tipo de material inerte. Além disso, a umidade absoluta atingia valores próximo à saturação, indicando que a quantidade de vapor d'água no interior do leito, estava próximo à saturação, e conseqüentemente, levando à estagnação do leito.

Gráfico 19 – Perfil de umidade do ar. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$.



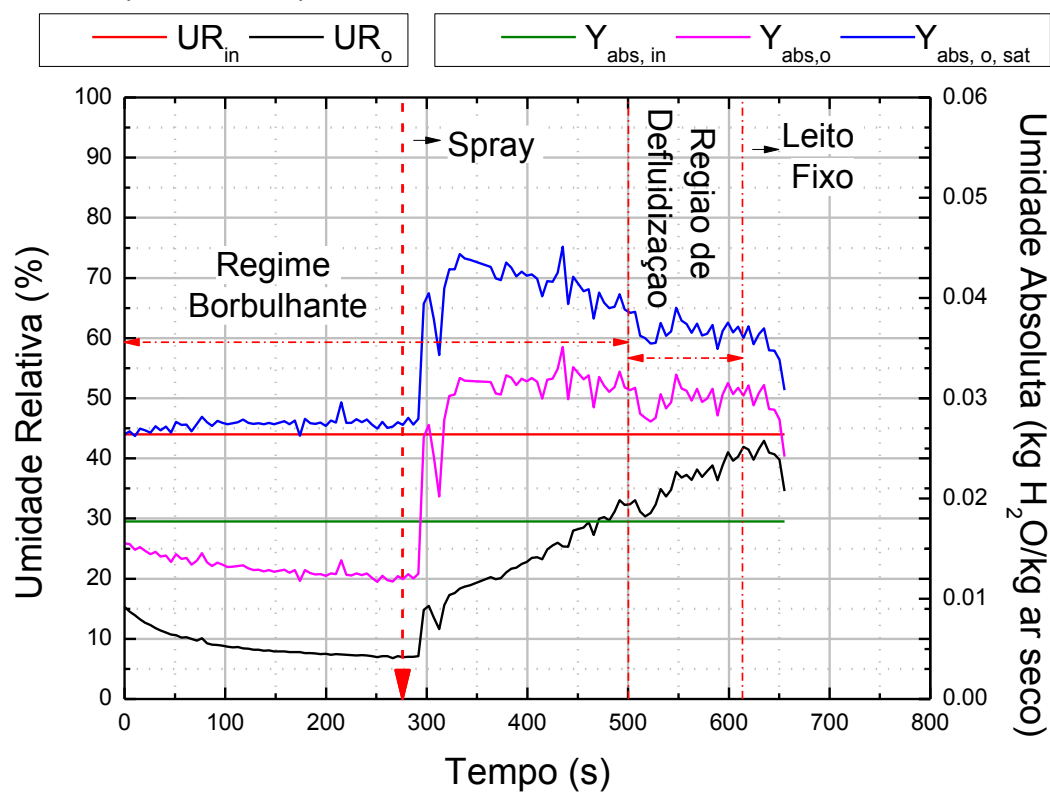
(a)



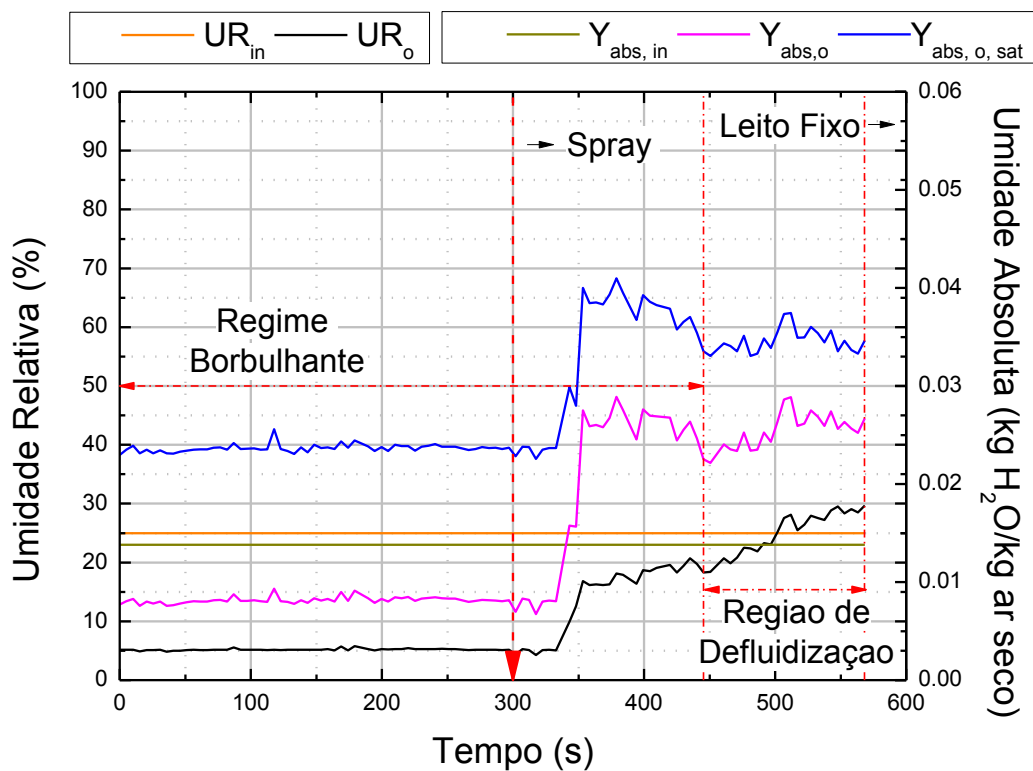
(b)

Fonte: Autoria Própria (2017)

Gráfico 20 – Perfil de umidade do ar. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2017)

Os Gráficos 21(a e b) e os Gráficos 22(a e b) apresentam os perfis da força de secagem (DF), para as partículas de vidro (Gráficos 21(a e b)) e de alumínio (Gráficos 22(a e b)), com vazão de atomização de 15 mL/min e concentração da suspensão de 9 e 15%, respectivamente.

Nos Gráficos 21(a e b), a força de secagem (DF) tem uma relação direta da temperatura do leite e do perfil de umidade do gás, e foi reduzida drasticamente ao longo do tempo do experimento de secagem. Além disso, quanto menor o valor da DF, maior é a tendência de aglomeração das partículas no interior do leite. A DF para ambas as concentrações de 9 e 15%, atingiu no final do experimento, valores próximos a 7 Pa, comprovando que a quantidade de aglomerados no interior do leite foi similar, independente da concentração da suspensão para as partículas de vidro, confirmando a obtenção deste parâmetro com as observações visuais realizadas durante o ensaio experimental.

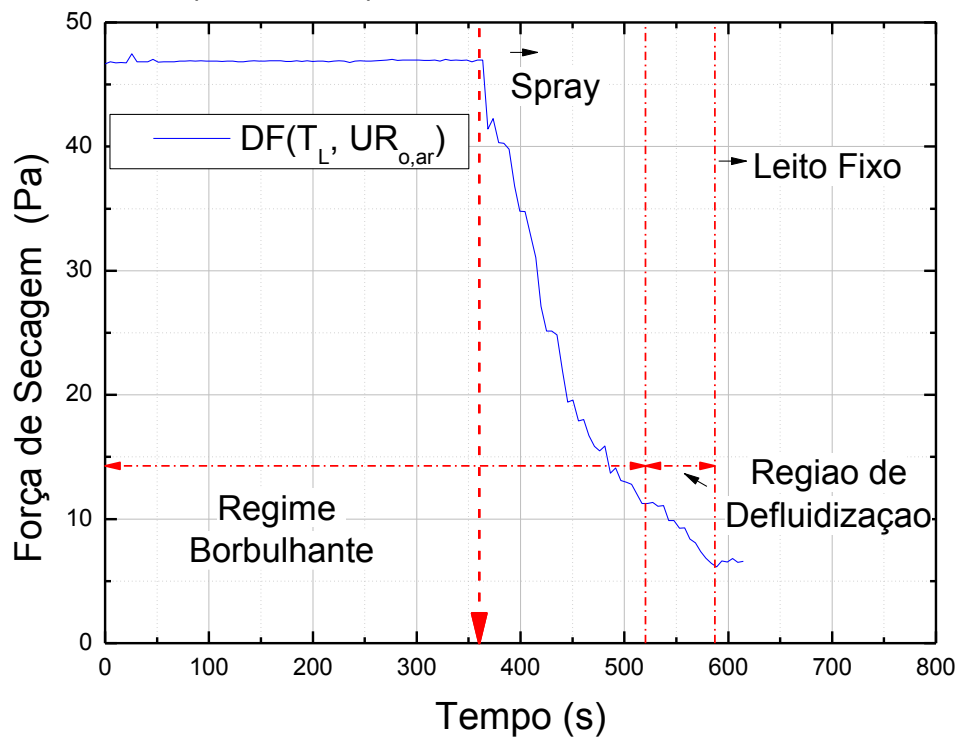
Para os Gráficos 22(a e b), referente às partículas de alumínio, com concentração de 9 e 15%, respectivamente, a DF estava próximo de 6 Pa, no Gráfico 22(a), enquanto que no Gráfico 22(b) a DF foi de 16 Pa, confirmando, através das observações visuais, que com a concentração de 15% para as partículas de alumínio, o leite apresentava-se com menor grau de aglomerado.

Ressalta-se que este parâmetro não indica quando o leite tende à região de defluidização, apenas aponta a tendência de aglomeração no interior do leite.

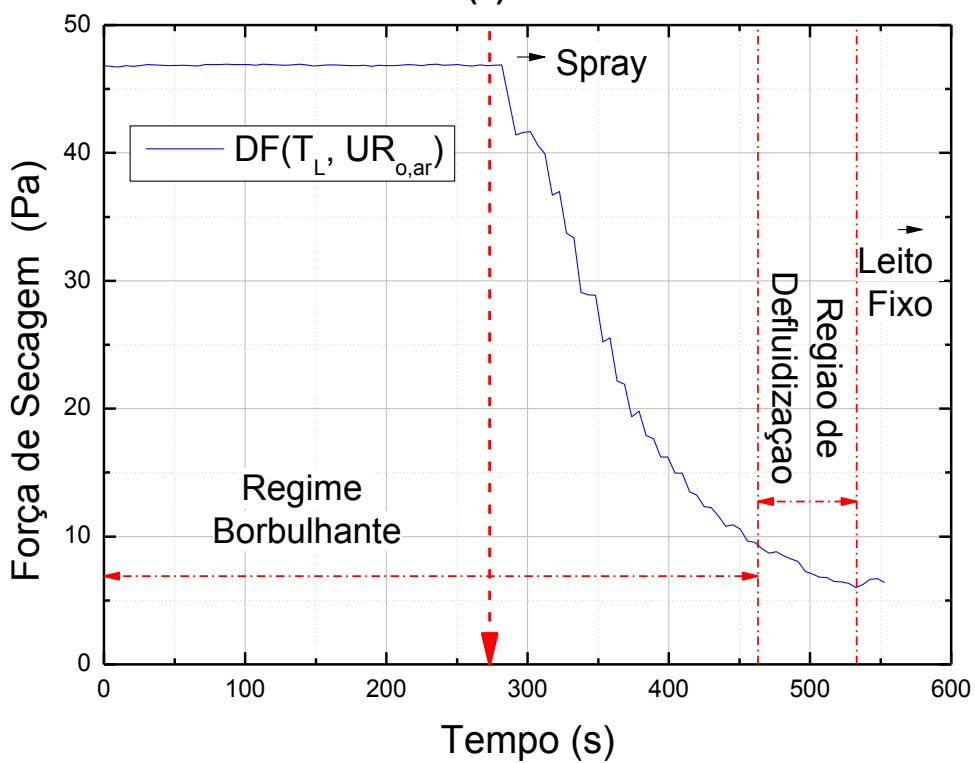
A força de secagem da esfera de vidro atingiu valores menores que a esfera de alumínio, indicando uma forte tendência à aglomeração das partículas de vidro, o que foi comprovado com o auxílio das observações visuais. No entanto, a concentração gerou poucas alterações no parâmetro da força de secagem.

Em geral, verificou-se que os materiais de alumínio apresentaram melhores condições fluidodinâmicas, assim como nos parâmetros psicrométricos no processo de secagem de suspensão diluída contendo partículas inertes.

Gráfico 21 – Parâmetros da força de secagem. Condições Operacionais: Esfera de Vidro, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$.



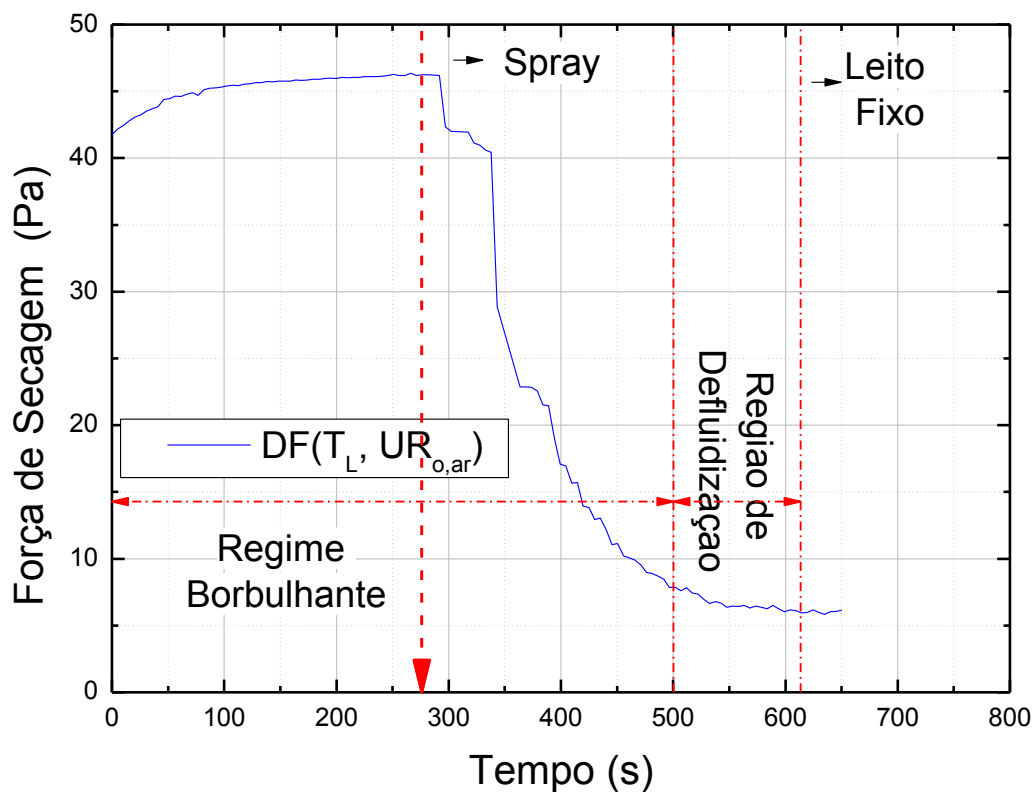
(a)



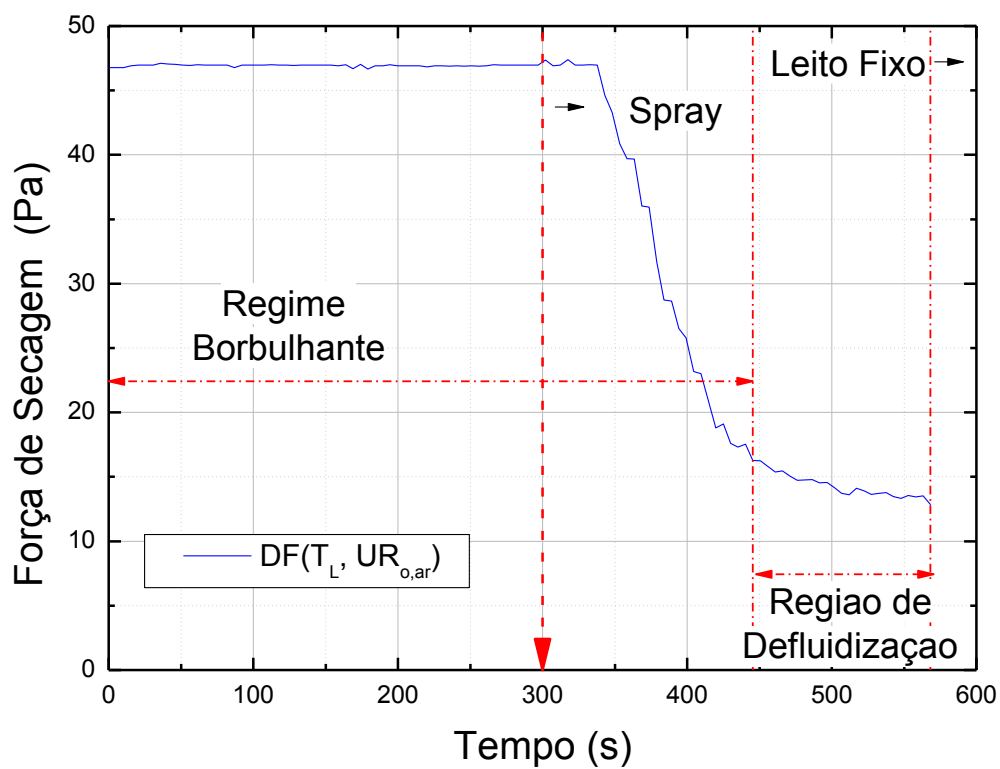
(b)

Fonte: Autoria Própria (2017)

Gráfico 22 – Parâmetros da força de secagem. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $Q_{susp}=15$ mL/min. (a) $C_{susp}=9\%$; (b) $C_{susp}=15\%$.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2017)

4.2.2 Análise dos Resultados Avaliando a Influência da Vazão de Atomização da Suspensão

Neste item são apresentados apenas os ensaios utilizando partículas de alumínio, com condições que possuem concentração de suspensão diluída de 9% e vazão de atomização de suspensão de 11,0; 13,0 e 15 mL/min. Os demais experimentos utilizando partículas de vidro e concentração de 15% podem ser visualizados no Apêndice D, visto que foram obtidos resultados muito semelhantes.

Os Gráficos 23(a, b e c) apresentam os perfis da frequência central média e do desvio padrão médio da distribuição espectral, para as partículas de esfera de alumínio, com diâmetro médio das partículas de 1,55 mm, com concentração da suspensão de 9% e vazão de atomização da suspensão de 11,0; 13,0 e 15,0 mL/min, respectivamente.

Com o auxílio das observações visuais durante o experimento, confirmou-se, nos Gráficos 23(a, b e c), que no início do ensaio a fluidização pertencia ao regime borbulhante, com bolhas grandes ao longo do leito. A frequência central média nesse regime era de 4,7 Hz e o desvio padrão médio da distribuição espectral de 4,3 Hz. Conforme têm-se continuidade da atomização da suspensão para o interior do leito, pôde-se observar que a fluidização se manteve em borbulhante estável, com bolhas grandes e movimentação intensa dos inertes.

Com a alteração da vazão de atomização da suspensão, verificou-se que no Gráfico 23(a), o tempo total de experimento foi de 3900 s, não havendo defluidização do leito, visto que a vazão de atomização não era suficiente para provocar o colapso do leito.

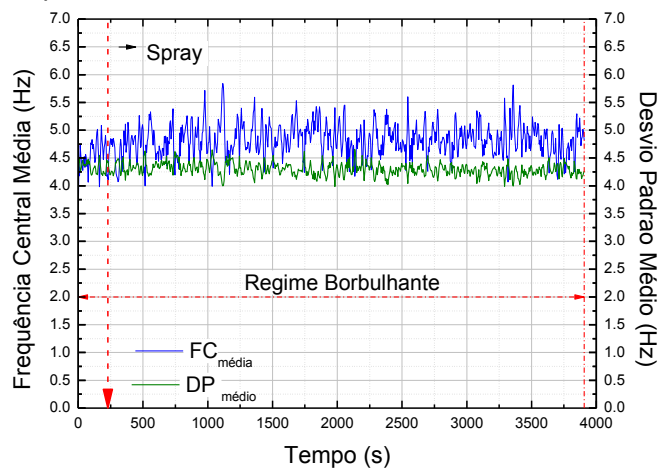
No Gráfico 23(b), em um tempo de aproximadamente, 2493 s, o leito atingiu a região de defluidização, começando a ficar cada vez mais pesado e úmido, devido à quantidade de líquido já presente no leito, com presença de bolhas apenas na superfície, favorecendo às instabilidades fluidodinâmicas. A partir deste tempo, o leito começou a ficar cada vez mais inconstante, pesado e úmido, com pequenas bolhas na superfície e grande quantidade de aglomerados foram visualmente observados. Além disso, verificou-se que conforme o leito tende a esta região de leito fixo, havia bolhas apenas na superfície do leito. A frequência central média e o desvio padrão médio da distribuição espectral era de 5,5 e 4,1 Hz, respectivamente. No tempo de

3620 s, foi atingido a região de leito fixo, com valores obtidos de frequência central média de 6,3 Hz e do desvio padrão médio da distribuição espectral de 4,0 Hz.

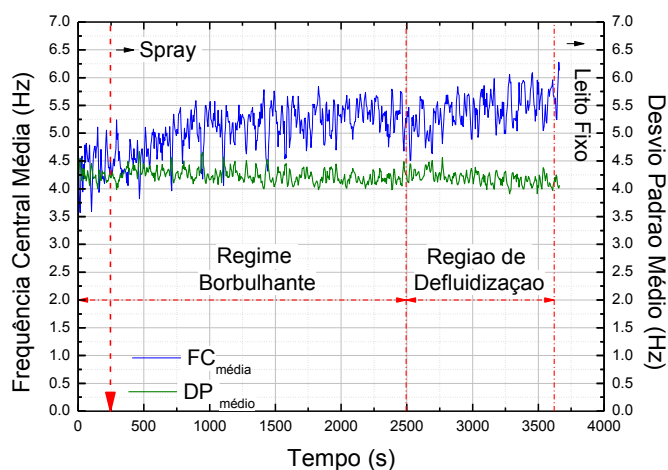
No Gráfico 23(c), verificou-se que após 500 s de ensaio, através de observações visuais durante o experimento, o início da presença de grandes aglomerados, e com diminuição acentuada da quantidade e volume das bolhas, atingiu-se a região de defluidização. Em 520 s, a frequência central média reduziu, atingindo valor próximo a 4,0 Hz, enquanto que o desvio padrão médio da distribuição espectral, permaneceu em torno de 4,5 Hz. A partir deste instante, através das observações visuais, verificou-se que o leito estava bastante úmido e cada vez mais instável, com presença de bolhas pequenas na superfície. A partir de 520 s, a frequência central média começou a aumentar gradativamente ao longo do tempo, atingindo valores máximos de 6,3 Hz, e alcançando o leito fixo, enquanto que o desvio padrão médio da distribuição espectral começou a diminuir em um valor mínimo de 4,0 Hz neste regime de fluidização.

De maneira geral, verificou-se que a influência da vazão de atomização da suspensão no tempo do experimento foi bastante significativa, como esperado, visto que com a vazão de 11 mL/min, o leito não defluidizou. Já com 13 mL/min, o leito atingiu a região de defluidização, no entanto, com um tempo relativamente alto, em torno de 3620 s. Nos ensaios com a vazão alta de atomização, de 15 mL/min, o leito defluidizou rapidamente, em torno de 613 segundos. Contudo, as frequências centrais médias e os desvios padrões médios da distribuição espectral mantiveram-se em faixas semelhantes na condição de fluidização estável, assim como nos casos que se atingiu a região de leito fixo.

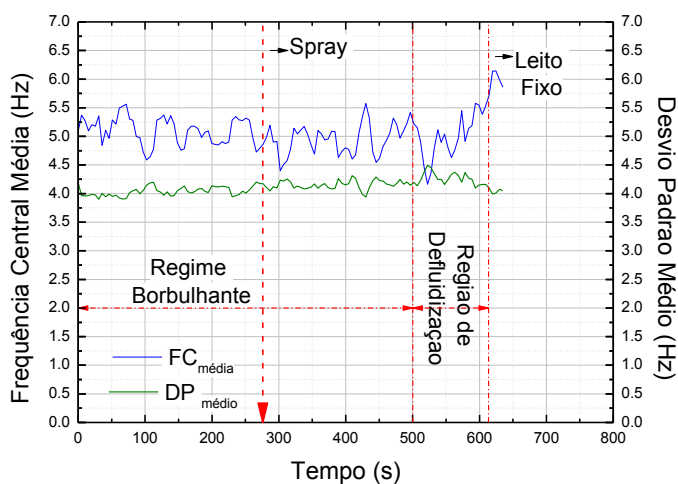
Gráfico 23 – Evolução da frequência central médio e do desvio padrão médio da distribuição espectral. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $C_{susp}=9\%$. (a) $Q_{susp}=11$ mL/min; (b) $Q_{susp}=13$ mL/min; (c) $Q_{susp}=15$ mL/min



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria (2017)

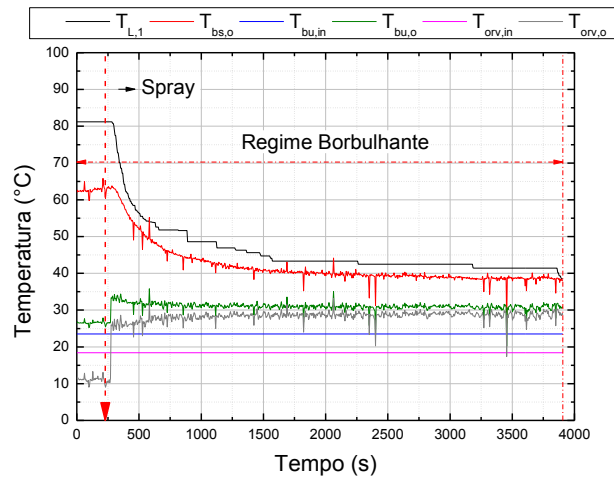
Os Gráficos 24(a, b e c) apresenta os perfis de temperatura do ar e do leito, para as partículas de esfera de alumínio, com diâmetro médio dos inertes de 1,55 mm, com concentração da suspensão de 9% e vazão de atomização da suspensão de 11,0; 13,0 e 15,0 mL/min, respectivamente.

Nos Gráficos 24(a, b e c) verificou-se que no início do experimento, as temperaturas do leito, bulbo seco do ar na saída, bulbo úmido e de orvalho na entrada e na saída da coluna, se mantiveram inalteradas. Além disso, após a início da atomização, verificou-se que a temperatura do leito e de bulbo seco do ar na saída reduziram consideravelmente, devido a introdução da solução de CaCO_3 .

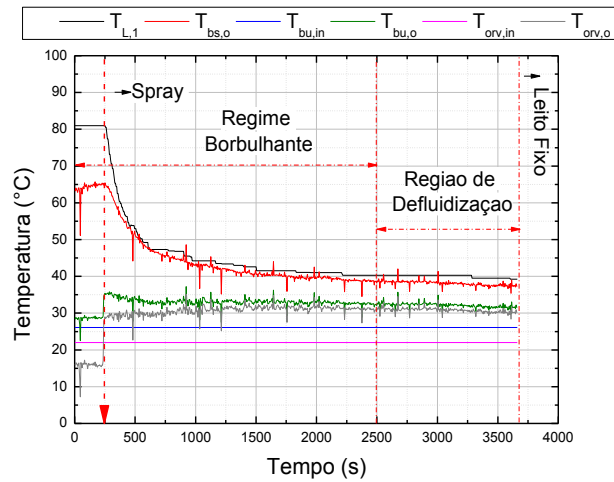
No Gráfico 24(a), em torno de 1000 s, todas as temperaturas se mantêm estáveis até o final do experimento, além disso, no fim do ensaio, a diminuição da capacidade de secagem no interior do leito foi verificada devido à redução acentuada das temperaturas do leito e de bulbo seco do ar na saída, atingindo um valor de 40°C e a aproximação das temperaturas de bulbo úmido do ar de saída com o da entrada, com desvio de 7°C na região de defluidização, conduzindo o leito à saturação na temperatura de bulbo úmido do ar de saída. Enquanto que no Gráfico 24(b), no final do experimento, as temperaturas do leito e de bulbo seco do ar na saída atingiram valor próximo de 38°C e a aproximação das temperaturas de bulbo úmido do ar de saída com o da entrada, com desvio de 6°C na região de defluidização. Já no Gráfico 24(c), as temperaturas do leito e de bulbo seco do ar na saída, atingiram valores de 46°C , assim como, a aproximação das temperaturas de bulbo úmido do ar de saída com o da entrada, com desvio de 5°C na região de defluidização.

Desta forma, obtém-se que nas diferentes vazões de atomização de suspensão utilizada com as partículas de alumínio, com a mesma concentração de solução em todos os casos, apresentaram poucas diferenças nos perfis de temperatura do ar e no leito.

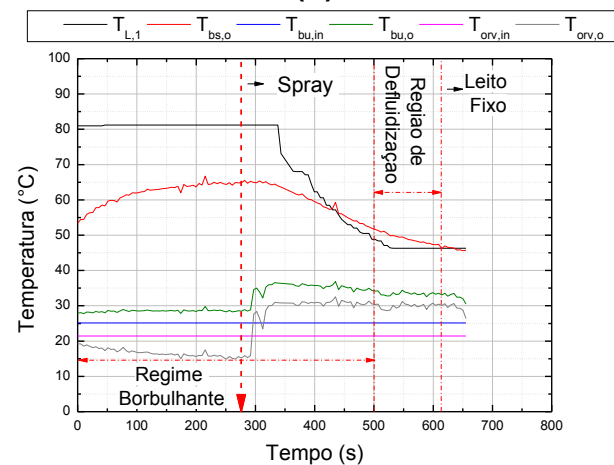
Gráfico 24 – Perfil de Temperatura do ar e do Leito. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $C_{susp}=9\%$; (a) $Q_{susp}=11$ mL/min; (b) $Q_{susp}=13$ mL/min; (c) $Q_{susp}=15$ mL/min



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria (2017)

O Gráfico 25(a, b e c) apresenta os perfis de umidade relativa e absoluta do ar, para as partículas de alumínio, com concentração de 9% e vazão de atomização de 11, 13 e 15 mL/min, respectivamente.

No Gráfico 25(a, b e c), quanto aos perfis de umidade relativa e absoluta do ar, verificou-se a aproximação com a condição de saturação do leite, devido ao excesso de umidade nas partículas e no leite dentro da coluna de fluidização. Além disso, no começo do experimento até a aplicação do líquido, os perfis de umidade relativa e absoluta, se mantiveram inalterados para os dados coletados na entrada e na saída, o que já era esperado. Observou-se também que, após a injeção da suspensão, as umidades relativa e absoluta do ar na entrada ainda se mantiveram constantes até o final do experimento. Porém nos dados na saída, as umidades absoluta e de saturação do ar, aumentaram acentuadamente, enquanto que a umidade relativa do ar na saída foi aumentando de forma gradual.

No gráfico 25(a), verificou-se que no final do experimento, as umidades absoluta e de saturação do ar na saída atingiram valores de 0,028 e 0,032 kg de água/kg de ar seco, respectivamente, em torno de 3900 s. Enquanto que a umidade relativa do ar na saída foi aumentando de forma gradual, até alcançar em um patamar de 60%.

Já no Gráfico 25(b), observou-se que na faixa do início da aplicação do spray até entrar na região de defluidização, próximo de 2493 s, os perfis de umidade absoluta e de saturação do ar na saída começaram a diminuir levemente, enquanto que a umidade relativa aumentou consideravelmente, atingindo próximo de 65%, dando início a região de defluidização. Após 2493 s, a umidade relativa continuou a aumentar até atingir o regime de leite fixo, chegando a valores de 68%, enquanto que a umidade absoluta e de saturação do ar na saída, obtiveram valores de 0,030 e 0,033 kg de água/kg ar seco, respectivamente, no leite estático.

Enquanto que no Gráfico 25(c) foi verificado que na faixa do início da injeção da suspensão até atingir a região de defluidização, próximo de 500 s, os perfis de umidade absoluta e de saturação do ar na saída começaram a diminuir levemente, enquanto que a umidade relativa aumentou consideravelmente, chegando próximo de 35%, dando início a região de defluidização. Após 500 s, a umidade relativa incrementou até atingir o regime de leite fixo, chegando a valores de 42%, enquanto que a umidade absoluta e de saturação do ar na saída, obtiveram valores de 0,032 e 0,035 kg de água/kg ar seco, respectivamente, no leite fixo.

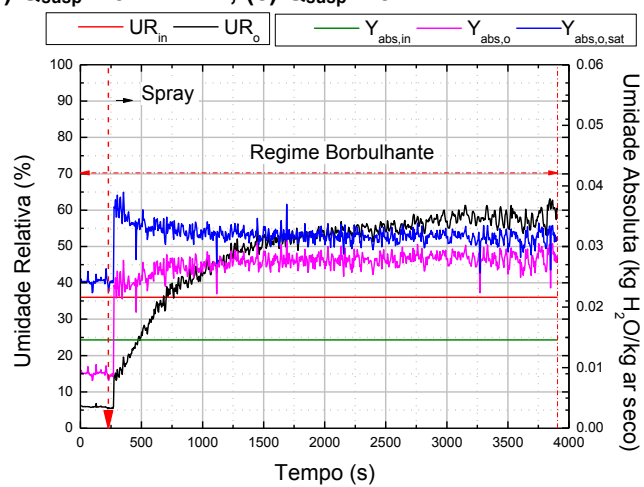
Observou-se que as vazões de atomização de suspensão utilizadas com as partículas de alumínio, com a mesma concentração de solução nos três casos, apresentaram diferenças nos perfis de umidade relativa e absoluta do ar, assim como obteve também diferentes desvios entre a umidade absoluta e de saturação do ar na saída, afetando a utilização de diferentes vazões de atomização. Desta forma, têm-se que a vazão de atomização de líquido no interior do leito foi um fator importante que apresentasse diferenças na análise da psicrométrica do ar.

Os Gráficos 26(a, b e c) mostra a eficiência de secagem e a força de secagem para as partículas de alumínio, com concentração de 9% e vazão de atomização de 11, 13 e 15 mL/min, respectivamente. Nos Gráficos 26(a, b e c), observou-se que no primeiro momento do experimento até a atomização da suspensão, os parâmetros se mantiveram constantes, como esperado. Após a aplicação de líquido, as eficiências de secagem (no Gráfico 26(a)) aumentaram acentuadamente, enquanto que a força de secagem diminuiu drasticamente, nos três gráficos. No Gráfico 26(a), verificou-se que no final do experimento as eficiências de secagem, E e R, atingiram um pico máximo, com 80 e 90%, respectivamente, e a força de secagem com valores próximos a 5 Pa, não atingindo o regime de leito fixo em um tempo de experimento de 3900 s. Ressalta-se que as eficiências de secagem podem ser verificadas apenas nas condições estáveis de fluidização. Para as condições do Gráfico 26(b), foi obtido um valor da força de secagem próximos a 2 Pa, entrando no regime de leito fixo em um tempo total de ensaio de 3620 s. No Gráfico 26(c), no fim do ensaio, a força de secagem chegou a 6 Pa, entrando no regime de leito fixo em 613 s.

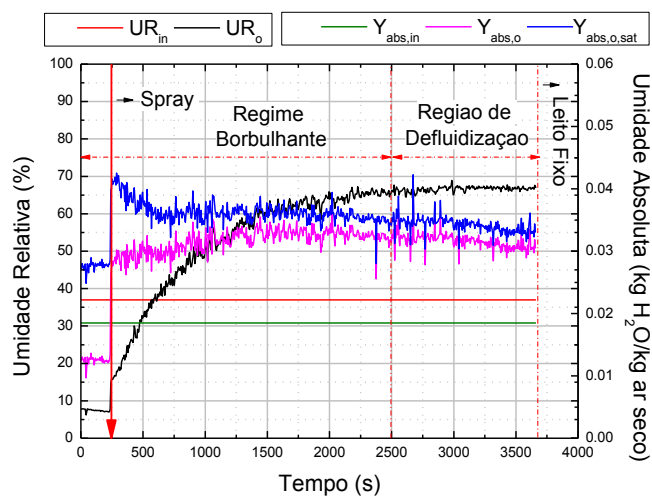
Desta forma, verificou-se que as vazões de atomização de suspensão utilizadas com as partículas de alumínio, com a mesma concentração de solução nos três casos, apresentaram baixa influência nos parâmetros da força de secagem.

Em suma, a capacidade de secagem foi observada pela redução das temperaturas do leito e do ar na saída e também pela aproximação das temperaturas de bulbo úmido da saída com o da entrada. Além disso, verificou-se também que os perfis de umidade relativa e absoluta do ar indicaram a aproximação com a condição de saturação do leito, devido ao excesso de umidade nas partículas e no leito no interior da coluna de fluidização. Em relação da força de secagem (DF) com base no perfil de umidade do ar e da temperatura do leito mostrou a redução da capacidade de secagem dos inertes, onde foi possível verificar que quanto menor este parâmetro, maior é a tendência de aglomeração das partículas no interior do leito.

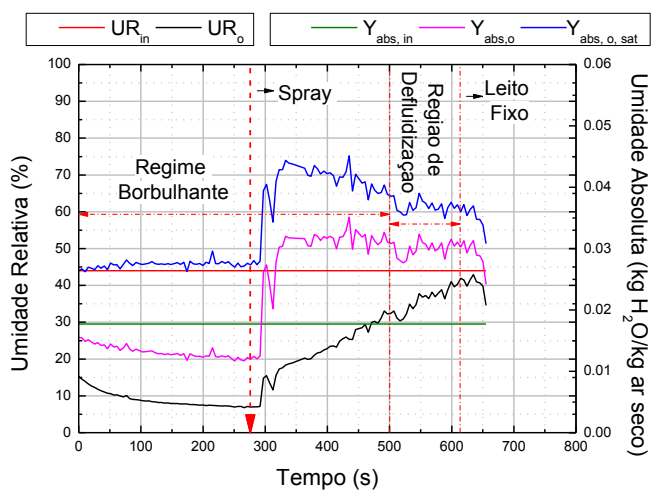
**Gráfico 25 – Perfil de umidade do ar. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $C_{susp}=9\%$.
(a) $Q_{susp}=11$ mL/min (b) $Q_{susp}=13$ mL/min; (c) $Q_{susp}=15$ mL/min**



(a)



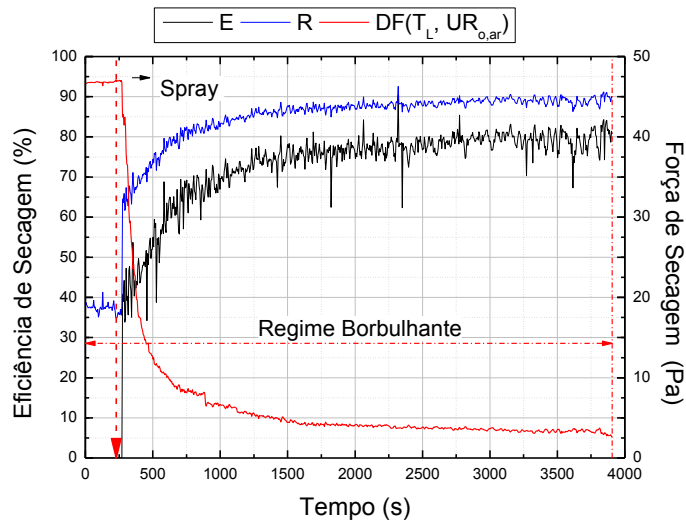
(b)



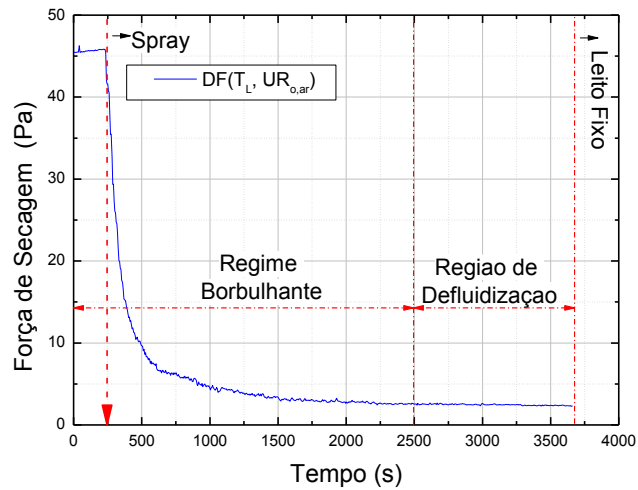
(c)

Fonte: Autoria Própria (2017)

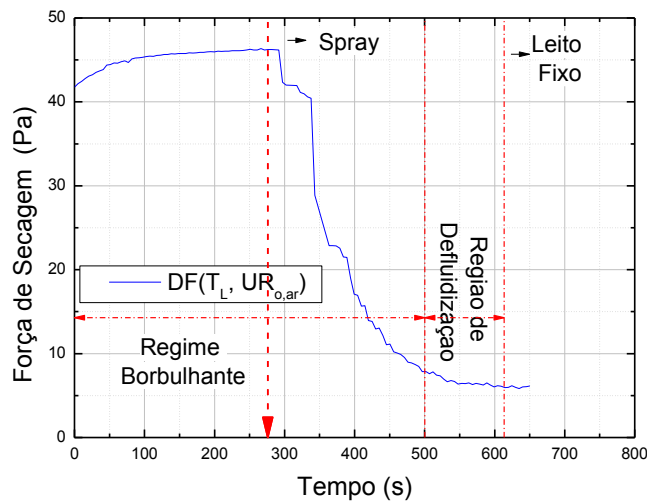
Gráfico 26 – Parâmetros de eficiência de secagem e força de secagem. Condições Operacionais: Esfera de Alumínio, $C_{susp}=9\%$. (a) $Q_{susp}=11$ mL/min (b) $Q_{susp}=13$ mL/min; (c) $Q_{susp}=15$ mL/min



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria (2017)

4.3 ANÁLISE TÉRMICA EM UM PROCESSO DE SECAGEM DE SUSPENSÃO DILUÍDA EM LEITO FLUIDIZADO

O cálculo do coeficiente volumétrico de transferência de calor foi baseado em um balanço de massa e de energia conforme estabelecido no item 3.7 desta dissertação. Como já mencionado, para calcular este coeficiente, foi necessário aplicar apenas nas condições estáveis de fluidização. Três condições estáveis foram identificadas, sendo elas: as condições de operação das esferas de alumínio, com $C_{susp}=9$ e 15% e para as esferas de vidro com $C_{susp}=9\%$, todas com vazão de atomização da solução de 11 mL/min.

A Tabela 3 reporta os resultados do coeficiente volumétrico de transferência de calor referente a estas condições estáveis e estacionárias.

Tabela 3 – Coeficiente Volumétrico de Transferência de Calor nas condições operacionais estáveis e estacionárias.

Condições Operacionais	$\bar{h}a$ (kW/m ³ .K)
Esfera de Vidro: $C_{susp}=9\%$; $Q_{susp}=11$ mL/min.	1,74
Esfera de alumínio: $C_{susp}=9\%$; $Q_{susp}=11$ mL/min.	1,76
Esfera de alumínio: $C_{susp}=15\%$; $Q_{susp}=11$ mL/min.	1,78

Fonte: Autoria Própria (2017)

O motivo destes resultados serem tão similares vem do fato da capacidade térmica dos materiais serem muito próximas ($C_{vidro} = 835$ J/kg.K e $C_{alumínio} = 903$ J/kg.K), e a massa inserida no leito em todos os experimentos serem iguais (com massa de 1,6 kg de partículas inertes). Também, o tempo para as temperaturas se estabilizarem foram muito similares (devido à mesma inércia térmica dos sólidos, já que esta depende da densidade, calor específico e capacidade térmica do material). Assim, o coeficiente volumétrico de transferência de calor tende para um mesmo valor.

Adicionalmente, Mujumdar (2006) afirma que a faixa do coeficiente volumétrico de transferência de calor em leito fluidizado encontra-se na faixa de 2,32 a 6,98 kW/m³.K. Desta forma, pôde-se verificar que os coeficientes volumétricos de transferência de calor obtidos estão um pouco inferiores aos reportados pela literatura, com média destes coeficientes de $1,76 \pm 0,02$ kW/m³.K.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas as conclusões referentes à esta dissertação, assim como, as sugestões para os trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Como principais conclusões do presente trabalho, pode-se citar:

- De maneira geral pode-se observar que o método da análise espectral Gaussiana utilizado para identificar a região de defluidização não foi adequado para as partículas pertencentes ao Grupo D de Geldart;
- Verificou-se que o valor do coeficiente de correlação reduziu significativamente na região de defluidização, sugerindo ser um melhor parâmetro para identificar a região de defluidização, através da análise espectral Gaussiana;
- Os perfis de temperatura do leito e do ar, indicaram a aproximação das temperaturas do leito e do ar na saída da coluna de fluidização e também a aproximação das temperaturas de bulbo úmido da saída com o da entrada;
- Os perfis de umidade relativa e absoluta do ar indicaram a aproximação com a condição de saturação do leito, devido ao excesso de umidade nas partículas e no leito no interior da coluna de fluidização;
- As eficiências de secagem (E e R) obtidas nos ensaios que se mantiveram em condições estáveis, chegaram próximas de 80 e 90%, respectivamente;
- A força de secagem (DF) obtida com base no perfil de umidade do ar e da temperatura do leito mostraram a redução da capacidade de secagem dos inertes; e quanto menor a DF, maior é a tendência de aglomeração das partículas no interior do leito;
- Quanto à concentração de solução, verificou-se que houve pouca influência quanto ao tempo para atingir a região de defluidização e quanto ao balanço psicrométrico. Porém, a frequência central média e o desvio padrão médio da distribuição espectral se mantiveram

similares em todos os casos, independente da concentração da solução;

- Quanto à vazão de atomização da suspensão diluída, verificou-se que houve diferenças quanto ao tempo para atingir a região de defluidização, porém os parâmetros obtidos do método utilizados se mantiveram similares em todos os casos;
- Quanto ao tipo do material inerte, as partículas de alumínio apresentaram melhores condições no processo de secagem, quanto à fluidodinâmica e quanto aos parâmetros psicrométricos;
- O coeficiente volumétrico médio de transferência de calor foi de $1,76 \text{ kW/m}^3\cdot\text{K}$, não variando em relação ao tipo de material inerte utilizado.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação de mestrado abriu novas perspectivas de pesquisas, sendo estas.

Quanto à Fluidodinâmica em leito fluidizado gás-sólido:

- Utilizar e comparar materiais pertencentes ao Grupo B de Geldart para os ensaios fluidodinâmicos, a fim de verificar o comportamento da região de defluidização;
- Utilizar e comparar os diâmetros de partículas pertencentes ao Grupo B de Geldart com o intuito de analisar o comportamento da região de defluidização;
- Utilizar e comparar diferentes temperaturas do ar de entrada, razão da velocidade superficial do ar e mínima fluidização, assim como, razão da altura e diâmetro do leito para os testes fluidodinâmicos, a fim de verificar o comportamento da região de defluidização;
- Utilizar o método da Transformada *Wavelet* em secagem de pasta, visto que esta análise permite identificar com mais sensibilidade os fenômenos que acontecem no interior do leito. Adicionalmente, este

método permite ser melhor discretizados, através da evolução das razões de energia dos sub-sinais.

Quanto ao processo de secagem de suspensão diluída:

- Utilizar e comparar diferentes tipos de soluções no processo de secagem;
- Monitorar o processo de secagem utilizando partículas com diâmetros menores e com diferentes partículas, pois as mudanças no comportamento de fluidização ocorrem próximo do ponto crítico de secagem, devido à umidade superficial;
- Utilizar e comparar diferentes temperaturas do ar de entrada, razão da velocidade superficial do ar e mínima fluidização, assim como, razão da altura e diâmetro do leito no processo de secagem;
- Desenvolver estratégias de controle no processo de secagem, quanto ao comportamento fluidodinâmico e dos parâmetros psicrométricos.

Quanto à transferência de calor gás-sólido em leito fluidizado:

- Realizar ensaios experimentais com outras condições experimentais, mas que possui estabilidade fluidodinâmica;
- Utilizar materiais que possuem capacidade térmica distintas, a fim de verificar o comportamento do coeficiente volumétrico de transferência de calor;
- Realizar simulações em CFD do estudo fluidodinâmico e térmico do processo de secagem de suspensão diluída com partículas inertes em leito fluidizado gás-sólido.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 5167-1**: Medição de vazão de fluidos por meio de instrumentos de pressão - Parte 1: Placas de orifício, bocais e tubos de Venturi instalados em seção transversal circular de condutos forçados. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 54 p.

ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Org.). **ASHRAE Handbook: Fundamentals**. Atlanta: Atlanta, Ga. Ashrae, 2001. 921 p.

ASME MFC-14M-2003: **Measurement of Fluid Flow Using Small Bore Precision Orifice Meters**. Isbn: 0791828344: Asme, 2003. 24 p.

BATCHELOR, G. K. A new theory of the instability of a uniform fluidized bed. **Journal of Fluid Mechanics**. v. 193, p. 75-110, 1988.

BI, X.; CHEN, A. Pressure fluctuation in gas-solids fluidized beds. **China Particuology**, v. 01, n. 04, p.139-144, 2003.

BROWN, R.; BRUE, E. Resolving dynamical features of fluidized beds from pressure fluctuations. **Powder Technology**, v. 119, p. 117–127, 2001.

BRAGA, M. B.; ROCHA, S. C. S.. Secagem de Pasta Alimentícia em Leito de Jorro: avaliação dos aspectos energéticos e produção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS (ENEMP), 37., **Anais...** São Carlos (SP): UFSCar, 2015.

ÇENGEL, A. Y.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**. 4° ed. Editora McGraw-Hill, 2012.

CHIRONE, R. MICCIO, F. SCALA, F. Mechanism and prediction of bed agglomeration during fluidized bed combustion of a biomass fuel: effect of the reactor scale. **Chem. Eng. J.** v. 123, p.71–80, 2006.

DE MARTIN, L. et al. Comparison of three different methodologies of pressure signal processing to monitor fluidized bed dryers/granulators. **Chem. Eng. J.** 172, 1, 2011.

DEWETTINCK, K.; et al. Modeling the steady-state thermodynamic operation point of top-spray fluidized bed processing. **Journal of Food Engineering**, v. 39, p. 131-143, 1999.

DIDWANIA, A.K. A new instability mode in fluidized beds. **Europhysics Letters**, v. 53, p. 478-482, 2001.

DHODAPKAR, S.V., KLINZING, G.E. **Pressure fluctuation analysis for a fluidized bed**. AIChE Symposium Series, p. 170-193, 1993.

ENGLART, S.; KMIEC, A.; LUDWINSKA, A.. Heat Transfer in Sprayed Spouted Beds. **The Canadian Journal Of Chemical Engineering**, Canadá, v. 87, p.185-192, abr. 2009.

FELIPE, C.A.S. **Identificação e monitoramento de regimes fluidodinâmicos em leitos fluidizados gás-sólido**. Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 169p. Tese (Doutorado), 2004.

FONSECA, O. L. C.. **Estudo Preliminar da Fluidodinâmica do Escoamento Gás-Sólido de um Leito Fluidizado** Circulante Através da Análise dos Sinais Dinâmicos de Pressão. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

FREIRE, J. T.; et al. A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium. **Drying Technology**: An International Journal, v. 30, p. 330-341, 2012.

GELDART, D. apud KUNII, D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Butterworth- Heinemann, 2nd Ed., 1991. 491 p; Powder Technology, v.7, p. 285, 1973.

GRBAVCIC, Z.B.; ARSENIJEVIC, Z.LJ.; GARIC-GRULOVIC, R.V. Drying of suspension and pastes in fluidized bed of inert particles. **Journal of the Serbian Chemical Society**, v.65, p. 963-974, 2000.

GRBAVCIC, Z.B.; ARSENIJEVIC, Z.LJ.; GARIC-GRULOVIC, R.V. Drying of slurries in fluidized bed of inert particles. **Drying Technology**, v. 22, p. 1793-1812, 2004.

GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J. et al. Fluidized bed with a rotating distributor operated under defluidization conditions. **Chemical Engineering Journal**. v. 195-196, p. 198-207, 2012.

HE, H. et al. Statistical and frequency analysis of the pressure fluctuation in a fluidized bed of non-spherical particles. **Particuology**, China, v. 16, p.178-186, 03 fev. 2014.

HEDE, P. D. et al. Top-spray fluid bed coating: scale-up in terms of relative droplet size and drying force. **Powder Technology**, v. 184, p. 318-332, 2008.

HOWARD, J. R. **Fluidized Bed Technology** – Principles and Applications. Adam Hilger, 1989.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6. ed. EUA: LTC, 2008.

JOHNSSON, F. et al. **Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations**. International Journal of Multiphase Flow, v. 26, p. 663-715, 2000.

KAGE, H. et al. Coating efficiency of seed particles in a fluidized bed by atomization of a powder suspension. **Powder Technology**, v. 86, p. 243–250, 1996.

KAGE, H. et al. Frequency analysis of pressure fluctuation in fluidized bed plenum and its confidence limit for detection of various modes of fluidization. **Adv. Powder Technol**, vol. 11, n. 4, pp. 459-475, 2000.

KOCH, D.L. & SANGANI, A.S. Particle pressure and marginal stability limits for a homogeneous monodisperse gas-fluidized bed. **Journal of Fluid Mechanics**. v. 400, p. 229-263, 1999.

KUNII, D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Butterworth-Heinemann, 2nd Ed, 491p, 1991.

LabView. Disponível em: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371299B-01/lvdsp/dsp_filter/>, Acesso em: 03 mar. 2015.

LEONTIEVA, A. I. et al. Heat and Mass Transfer During Drying of a Liquid Film From the Surface of a Single Inert Particle. **Drying Technology**, Tambov, v. 20, p.729-747, 2002.

MANDICH, K. M.; CATTOLICA, R. J..Stability of Gas-Fluidized Beds. **Ninth International Conference On Cfd InThe Minerals And Process Industries**. Australia, p.10-12, dec. 2012.

MARTINEZ, L. A. O.; BRENANN, J. G. & NIRANJAN, K. Drying of Liquids in a Spouted Bed of Inert Particles: Heat Transfer Studies. **Journal of Food Engineering**, v. 20, p. 135-148, 1993.

MARONGA, S. **On the Optimization of the Fluidized Bed Particulate Coating Process**. 1998. 78p. Ph.D.Thesis - Course of Chemical Engineering, Department Of Chemical Engineering And Technology, Royal Institute Of Technology, Stockholm, 1998.

MEILI, L.. **Contribuições ao Estudo da Fluidodinâmica e da Secagem de Pastas em Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado**. 2009. 260 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2009.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 802 p.

MORIS, V.A.S, VISNADI, C.B., CUNHA, R.L.G., ROCHA, S.C.S., TARANTO, O.P. Monitoramento do processo de recobrimento de celulose microcristalina em leito fluidizado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS (ENEMP), 32., **Anais...**, Maringá (PR): UEM. 2006

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. Singapore: Taylor & Francis Group, 2006. 1286 p. Cap.01., 2006.

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.

PARISE, M. R. **Aplicação Da Distribuição Espectral Normal Em Leito Fluidizado Gás-Sólido**. 2007. 131 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PARISE, M.R. et al. Detection of the minimum gas velocity region using Gaussian spectral pressure distribution in a gas-solid fluidized bed. **Powder Technology**, v. 182, n. 3, p. 453-458, 2008.

PARISE, M. R. et al. Identification of defluidization in fluidized bed coating using the Gaussian spectral pressure distribution. **Powder Technology**, v. 206, p.149-153, 2011.

PARISE, M. R. et al. **Detecção da defluidização em leito fluidizado gás-sólido utilizando medidas de flutuação de pressão**. In: XI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, 2013, La Plata (Argentina). XI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, v. 01. p. 1534-1539, 2013.

ROY, P. et al. Heat and mass transfer study in fluidized bed granulation —Prediction of entry length. **Particuology**, v. 07, p.215-219, 2009.

RUSSEL, J. B. **Química Geral**. 2. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1994.

SCHAFFKA, F.T.S; SILVA, C.A.M da; JANZEN, F.C; PARISE, M.R; "Monitoring the Fluidization Quality in a Fluidized Bed Paste Drying Using Pressure Fluctuation Measurements". In: ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM), 23., **Anais...** Rio de Janeiro (RJ), 2015.

SCHOUTEN, J.C., van den BLEEK, C.M. Monitoring the quality of fluidization using the short-term predictability of pressure fluctuations. **AIChE Journal**, v. 44, p. 48-60, 1998.

SILVA, C.A.M. et al. Monitoramento do fenômeno da defluidização no processo de recobrimento em leito fluidizado gás-sólido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 34., 2009. Campinas. **Anais...**Campinas: SP, 2009.

SILVA, C. A. M. et al. Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution. **Powder Technology**, v. 212, p.445-458, 2011.

SILVA, C. A. M. da et al. Monitoring and control of coating and granulation processes in fluidized beds – A review. **Advanced Powder Technology**, v. 25, p.195-210, 2014.

SILVA, C. A. M. da. **Aplicação de Tecnologias Analíticas de Processo e Inteligência Artificial para Monitoramento e Controle de Processo de Recobrimento de Partículas em Leito Fluidizado**. 2015. 325 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ. **SIMEPAR - Tecnologia e Informações Ambientais**. 2017. Curitiba. Disponível em: <<http://www.simepar.br/>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

TRNKA et al. Identification of state of a fluidized bed by pressure fluctuation. **AIChE Journal**, v. 46, p.509-514, 2000.

TATEMOTO, Y.; MIYAZAWA, K.. Drying of Suspensions in a Fluidized Bed of Inert Particles Under Reduced Pressure. **Drying Technology**, v. 29, p.1204-1209, 2011.

van der SCHAFF et al. Nonintrusive determination of bubble and slug length scales in fluidized beds by decomposition of power spectral density of pressure time series. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, p. 865-880, 2002.

van OMMEN, J. Ruud et al. Time-series analysis of pressure fluctuations in gas-solid fluidized beds - a review. **International Journal Of Multiphase Flow**. Netherlands, p. 403-428. jun. 2011.

YANG, Wen-Ching. **Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems**. New York - Basel: Taylor & Francis Group Llc, 2003. 851 p.

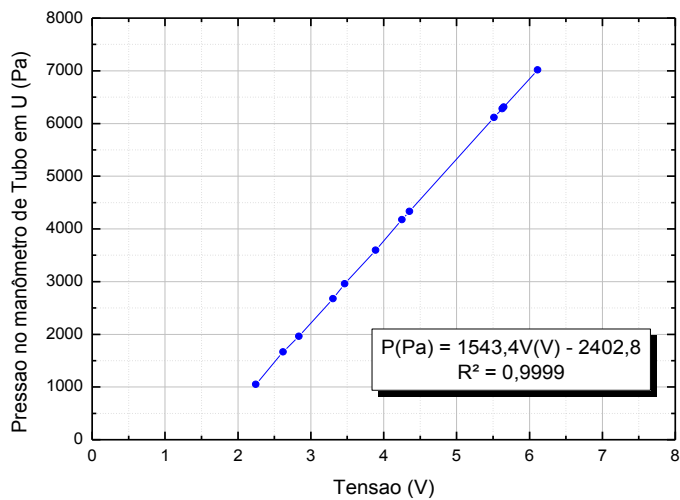
Wen, C.Y. YU, Y.H. A Generalized Method for Predicting Minimum Fluidization Velocity. **AIChE Journal**, New York, v.12, n. 3, p.610-&, 1996.

ZHAO, L. et al. Drying of a Dilute Suspension in a Revolving Flow Fluidized Bed of Inert Particles. **Drying Technology**, v. 22, n. 1 & 2, p.363-376, 2004.

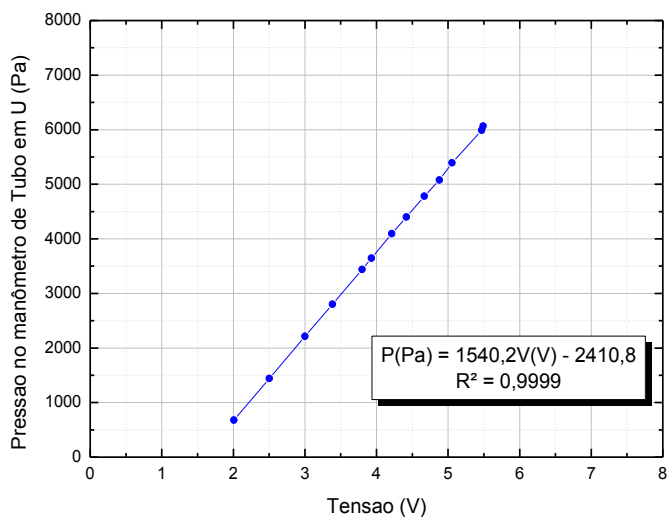
**APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO E DA
BOMBA PERISTÁLTICA**

Os transdutores de pressão à Montante e Queda de pressão na placa de orifício e no *Plenum* foram calibrados acionando o soprador de ar em vários estágios de rotação através do inversor de frequência, sem a presença de partículas no interior do leito. Estes valores de pressões foram medidos com manômetro de tubo em U, observando-se sua respectiva equivalência com o sinal em Volts, obtido pelo transdutor. Os Gráficos 27(a, b e c) mostram as curvas de calibrações obtidas em cada transdutor de pressão.

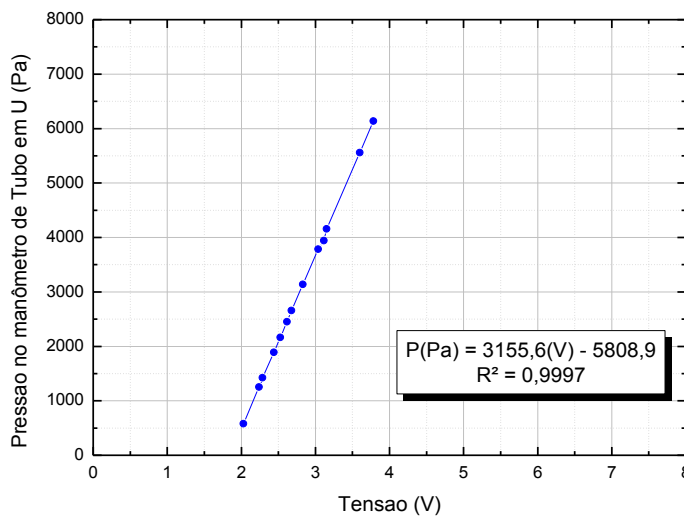
Gráfico 27 – Calibração do transdutor de pressão relacionado ao (a) *Plenum*, (b) à queda de pressão na placa de orifício e (c) à montante da placa de orifício



(a)



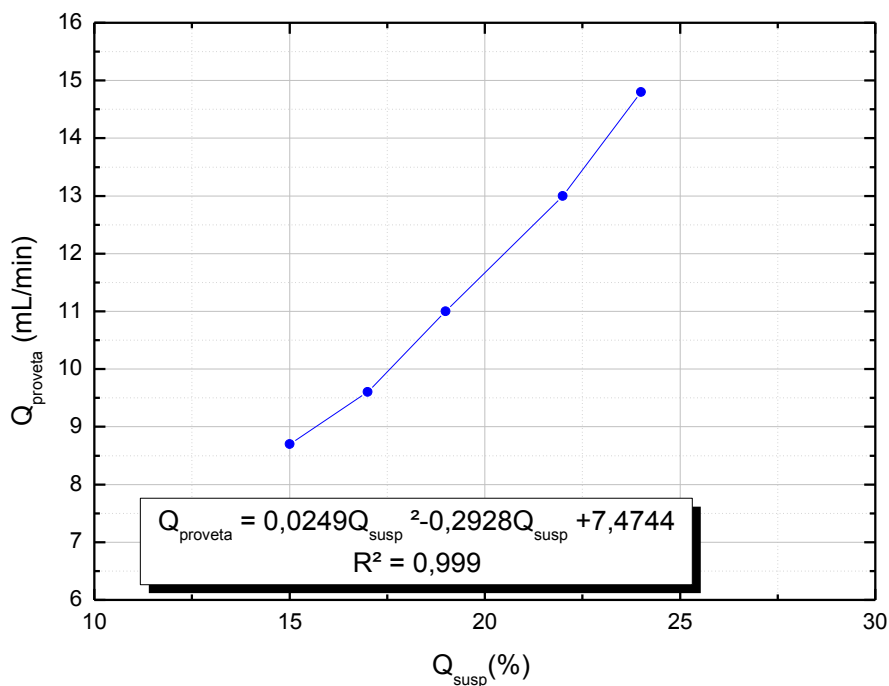
(b)



(c)

A bomba peristáltica foi calibrada (em triplicata) para utilização nos experimentos do processo de secagem de solução de CaCO_3 . O Gráfico 28 mostra a correlação do valor percentual da bomba (visualizado no visor digital da bomba, em porcentagem) com os valores reais (medido em uma proveta de 250 mL em um determinado tempo) para a concentração de solução de CaCO_3 de 15%, em massa.

Gráfico 28 - Calibração da bomba peristáltica com concentração da solução de CaCO_3 de 15%.



Fonte: Autoria Própria (2017)

APÊNDICE B - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS (u_0)

Para a determinação da velocidade superficial do gás, foi utilizada a Norma ASME MFC-14M-2003, realizando os seguintes cálculos:

A vazão mássica do ar na entrada da tubulação (\dot{m}_{ar}) é dada pela Equação (56):

$$\dot{m}_{ar} = \frac{e C_d A_{or} \sqrt{2 \rho_g \Delta P_{or}}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (56)$$

Onde:

e: Fator de compressibilidade, conforme Equação (57):

C_d : Coeficiente de descarga, adimensional;

A_{or} : Área do orifício da placa, m²;

ρ_g : Densidade do fluido, kg/m³;

ΔP_{or} : Queda de pressão na placa de orifício, Pa;

β : Razão do diâmetro do orifício da placa pelo diâmetro da tubulação, dada pela Equação (58), adimensional.

O fator de compressibilidade (e) é dado por:

$$e = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta P_{or}}{K P_1} \quad (57)$$

Onde:

P_1 : Pressão absoluta a montante da placa de orifício, Pa;

K: Coeficiente de perda de carga, dado pela Equação (59), adimensional.

Assim, a razão do diâmetro do orifício da placa pelo diâmetro da tubulação, deve estar na faixa de $0,15 \leq \beta \leq 0,7$ e $2,5 \leq D \leq 4$ cm, conforme descrito:

$$\beta = \frac{d_{or}}{D} \quad (58)$$

Onde:

d_{or} : Diâmetro do orifício da placa de orifício, m;

D: Diâmetro da tubulação, m.

O coeficiente de perda de carga é dado por:

$$K = \frac{2w}{\rho_g v_{ar,t}^2} \quad (59)$$

Onde:

$v_{ar,t}$: Velocidade do ar na tubulação, descrito conforme Equação (60), m/s;

w: Coeficiente de perda de pressão estática, descrito conforme Equação (61), adimensional;

ρ_g : Densidade do fluido, kg/m³.

$$v_{ar,t} = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_g \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad (60)$$

Assim, o coeficiente de perda de pressão estático é dado por:

$$w = \frac{\sqrt{1 - \beta^4} - C_d \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4} + C_d \beta^2} \Delta P_{or} \quad (61)$$

Sendo, C_d dado pela Equação (62):

$$\begin{aligned}
 C_d = & \left[0,5991 + \frac{0,0044}{D} \right. \\
 & + \left(0,3155 + \frac{0,0175}{D} \right) \left(\left(\frac{d_{or}}{D} \right)^4 + 2 \left(\frac{d_{or}}{D} \right)^{16} \right) \left. \right] \sqrt{1 - \left(\frac{d_{or}}{D} \right)^4} \\
 & + \left[\frac{0,52}{D} - 0,192 \right. \\
 & \left. + \left(16,48 - \frac{1,16}{D} \right) \left(\left(\frac{d_{or}}{D} \right)^4 + 4 \left(\frac{d_{or}}{D} \right)^{16} \right) \right] \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{d_{or}}{D} \right)^4}{Re_D}}
 \end{aligned} \tag{62}$$

Onde:

Re_D : Número de *Reynolds* da tubulação, referente ao diâmetro da tubulação, adimensional, com faixa de $Re_D \geq 1000$.

A velocidade superficial do gás (u_0) pode ser obtida pela Equação (63):

$$u_0 = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_g \cdot A_{st}} \tag{63}$$

Onde:

u_0 : Velocidade superficial do ar, m/s;

ρ_g : Densidade do fluido no *plenum*, kg/m³;

A_{st} : Área da seção transversal do leito conforme Equação (64), m².

$$A_{st} = \frac{\pi D_{int}^2}{4} \tag{64}$$

Onde:

D_{int} : Diâmetro interno do leito (m).

APÊNDICE C - CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS DO AR

Com os dados fornecidos pelos termohigrômetros, como umidade relativa do ar e temperatura do bulbo seco, foram obtidas a temperatura de bulbo úmido, a temperatura de orvalho, a umidade absoluta do ar e a umidade absoluta do ar na condição de saturação, as eficiências de evaporação e a força de secagem, utilizando o *software* LabVIEW™ versão 10.0.

A umidade absoluta do ar (Y) foi calculada através da Equação (65):

$$Y = 0,62198 \left(\frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \right) = 0,62198 \left(\frac{P_{vs}(T_{bs})UR}{P_{atm} - P_{vs}(T_{bs})UR} \right) \quad (65)$$

Onde:

P_v : Pressão de vapor de água, kPa;

P_{atm} : Pressão atmosférica do ar, kPa;

P_{vs} : Pressão de vapor de água saturado, kPa;

T_{bs} : Temperatura de bulbo seco, °C;

UR: Umidade relativa do ar, %.

A pressão de vapor de água saturado (P_{vs}) foi calculada pela equação de Antoine. Esta é válida para temperatura do ar na faixa de 11°C a 168°C, conforme Equação (66).

$$P_{vs}(T_{bs}) = \exp \left[16,2886 - \frac{(3816,44)}{(-46,13 + (T_{bs} + 273,15))} \right] \quad (66)$$

Onde:

$P_{vs}(T_{bs})$: Pressão de vapor de água saturado na temperatura de bulbo seco, kPa;

T_{bs} : Temperatura de bulbo seco, °C;

Cálculo da umidade absoluta na condição de saturação (Y_s^{bu}) e da temperatura de bulbo úmido (T_{bu})

A conservação da entalpia específica (hI_p) à pressão constante aplicada a um processo estritamente adiabático está descrito conforme Equação (67) (ASHRAE, 2001):

$$hI_p + (Y_s^{bu} - Y)h_w^* = h_s^* \quad (67)$$

Onde:

hI_p : Entalpia específica à pressão constante, kJ/kg;

Y_s^{bu} : Umidade absoluta na condição de saturação, kg água/kg ar seco;

Y : Umidade absoluta do ar, kg água/ kg ar seco;

h_w^* : Entalpia específica da água líquida, kJ/kg;

h_s^* : Entalpia específica do ar na saturação, kJ/kg.

Os valores de h_w^* e h_s^* são funções da temperatura de bulbo úmido (T_{bu}) para um valor fixo de pressão. Os valores de entalpia e umidade absoluta dependem da temperatura de bulbo seco (T_{bs}) e da umidade relativa (UR), os quais foram medidas pelos sensores de umidade instalados no sistema.

A umidade absoluta na condição de saturação (Y_s^{bu}) para a temperatura de bulbo úmido foi calculada conforme a Equação (68):

$$Y_s^{bu} = 0,62198 \left(\frac{P_{vs}^{bu}(T_{bu})}{P_{atm} - P_{vs}^{bu}(T_{bu})} \right) \quad (68)$$

Onde:

P_{vs}^{bu} : Pressão de vapor de água saturado na temperatura de bulbo úmido, calculada também pela equação de Antoine, dada pela Equação (69), kPa;

$$P_{vs}^{bu}(T_{bu}) = \exp\left[16,2886 - \frac{(3816,44)}{(-46,13 + (T_{bu} + 273,15))}\right] \quad (69)$$

Os valores das entalpias específicas foram dados pelas Equações (70), (71), (72) e (73):

$$h_{lP} = (1,01 + 1,87Y)(T_{bs}) + 2501Y = 1,01(T_{bs}) + Y(2501 + 1,87T_{bs}) \quad (70)$$

$$h_w^* = 4,186(T_{bu}) \quad (71)$$

$$h_s^* = (1,01 + 1,87Y_s)(T_{bu}) + 2501Y_s = 1,01(T_{bu}) + Y_s(2501 + 1,87T_{bu}) \quad (72)$$

$$f(T_{bu}) = Y - \left[\frac{(2501 - 2,411T_{bu})Y_s^{bu} - 1,006(T_{bs} - T_{bu})}{2501 + 1,775T_{bs} - 4,186T_{bu}} \right] = 0 \quad (73)$$

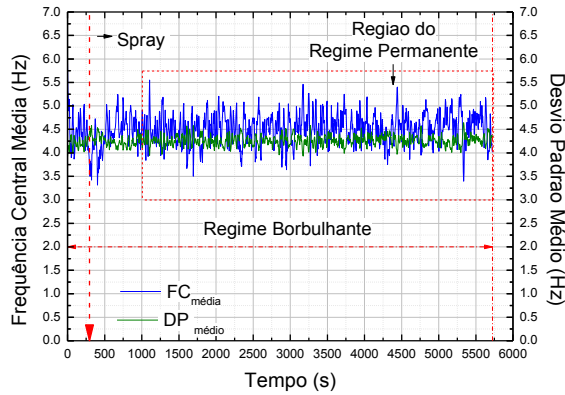
Para cada temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar medidos pelos sensores, uma temperatura de bulbo úmido foi calculada à pressão constante, pela solução da Equação (73).

Os dados da temperatura de bulbo úmido foram validados em carta psicrométrica da cidade de Ponta Grossa/Paraná.

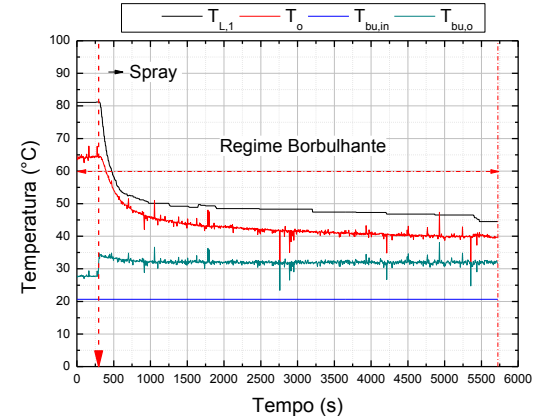
**APÊNDICE D - RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS
RELACIONADOS A FLUIDODINÂMICA E BALANÇOS PSICROMÉTRICOS EM
LEITO FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO**

A seguir são mostrados os demais resultados dos ensaios experimentais realizados nesta dissertação.

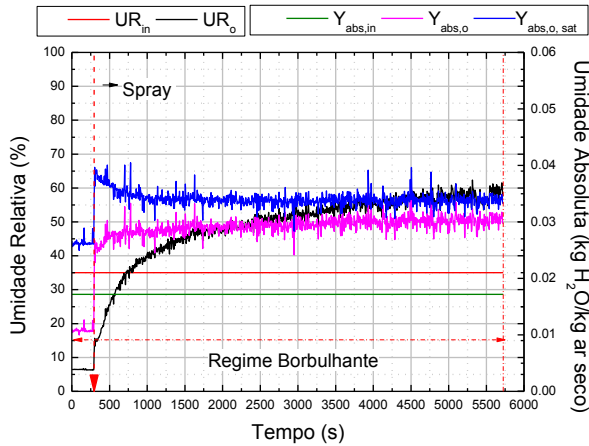
Gráfico 29 – Esfera de Vidro, Condições Operacionais: $C_{susp}=9\%$ e $Q_{susp}=11$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros de eficiência de secagem e da força de secagem



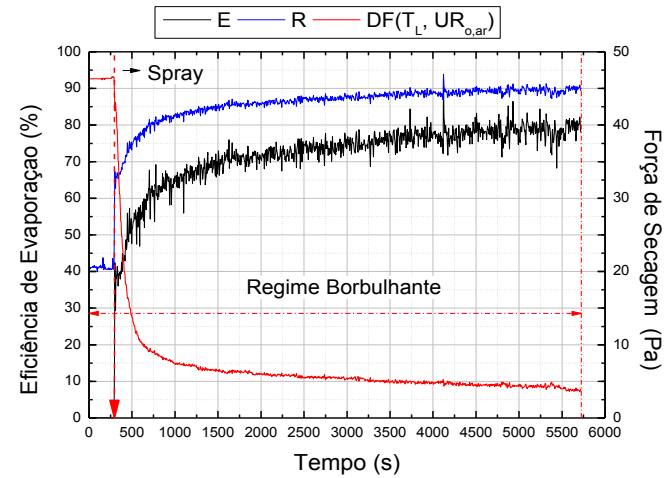
(a)



(b)



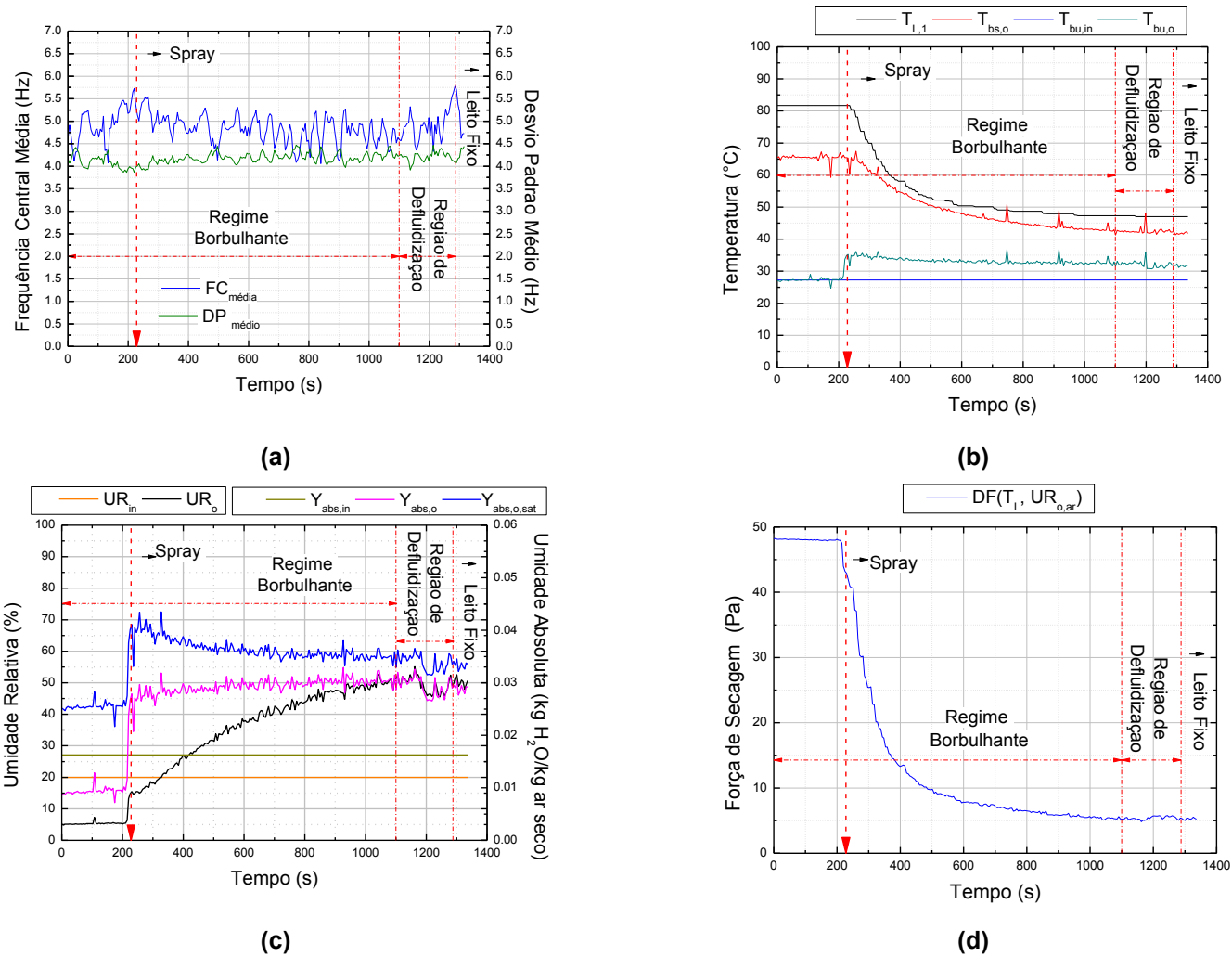
(c)



(d)

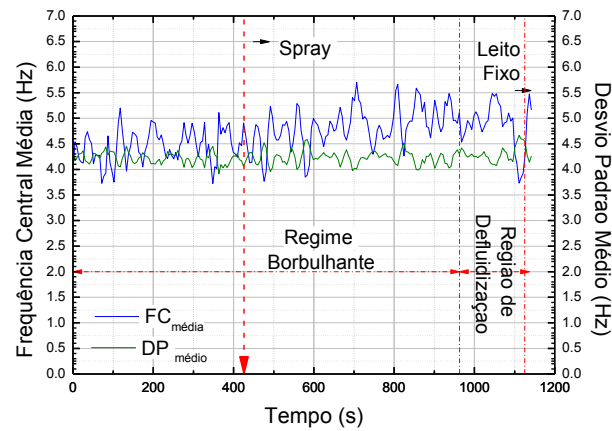
Fonte: Autoria Própria (2017)

Gráfico 30 – Esfera de Vidro, Condições Operacionais: $C_{susp}=9\%$ e $Q_{susp}=13$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros da força de secagem

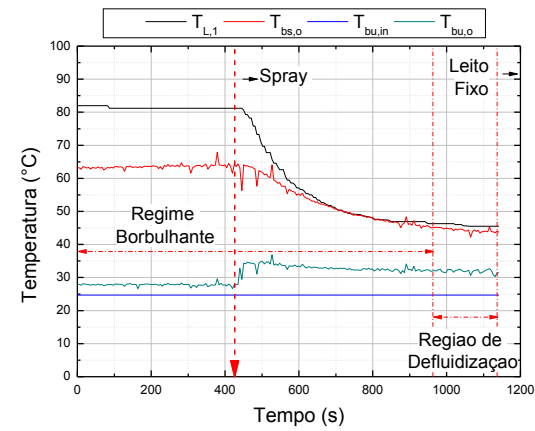


Fonte: Autoria Própria (2017)

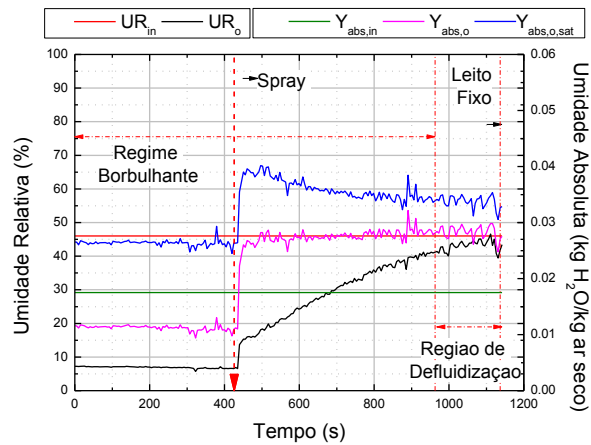
Gráfico 31 – Esfera de Vidro, Condições Operacionais: $C_{susp}=15\%$ e $Q_{susp}=11$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros da força de secagem



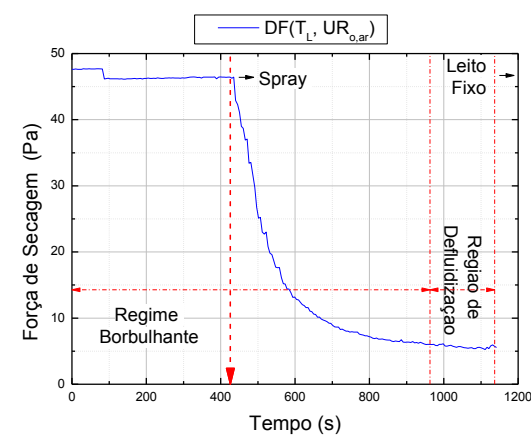
(a)



(b)



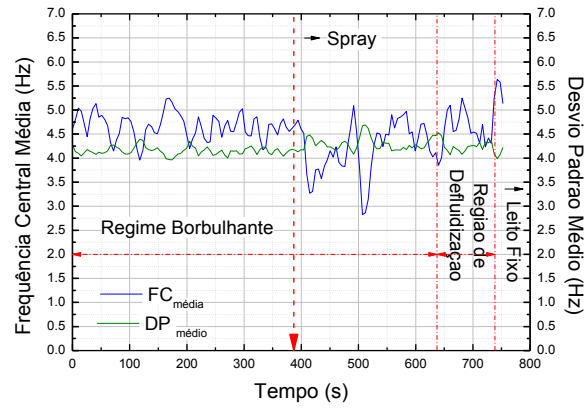
(c)



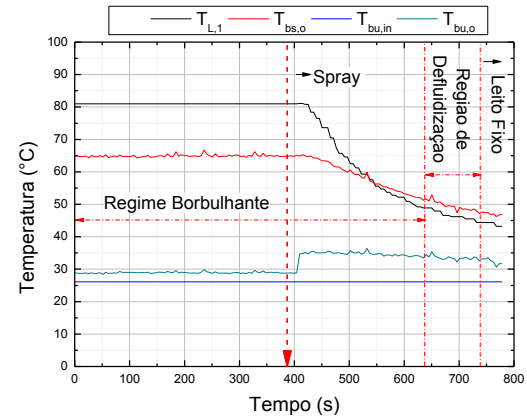
(d)

Fonte: Autoria Própria (2017)

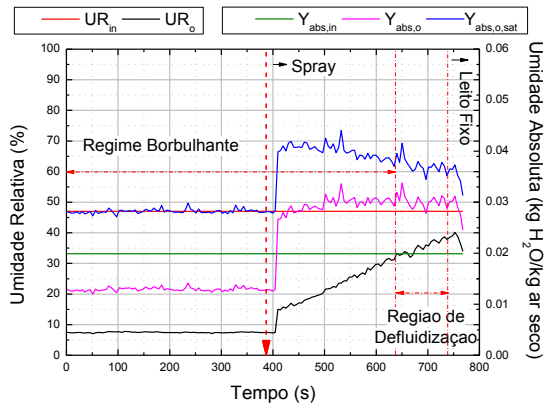
Gráfico 32 – Esfera de Vidro, Condições Operacionais: $C_{susp}=15\%$ e $Q_{susp}=13$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros da força de secagem



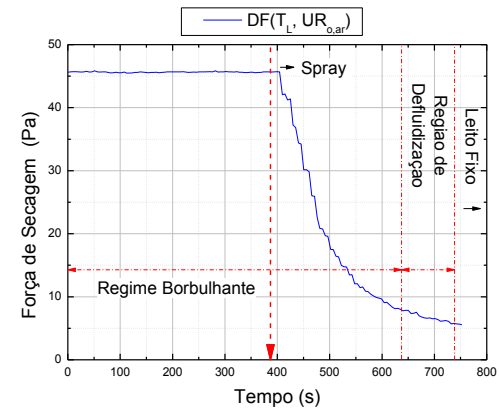
(a)



(b)



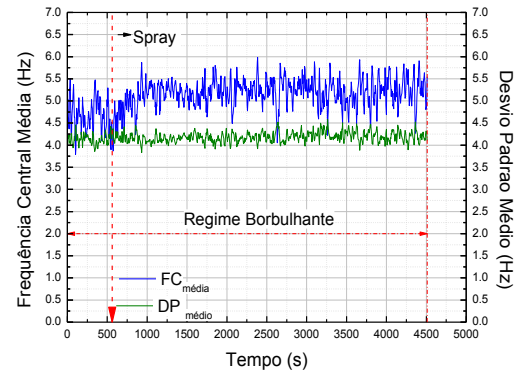
(c)



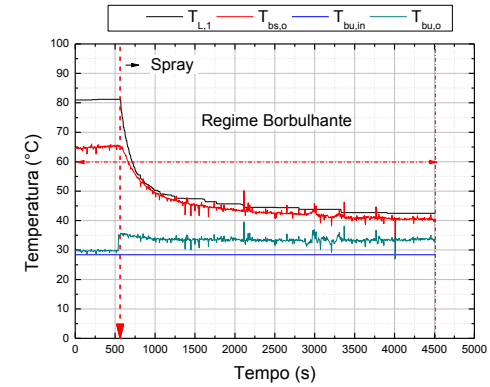
(d)

Fonte: Autoria Própria (2017)

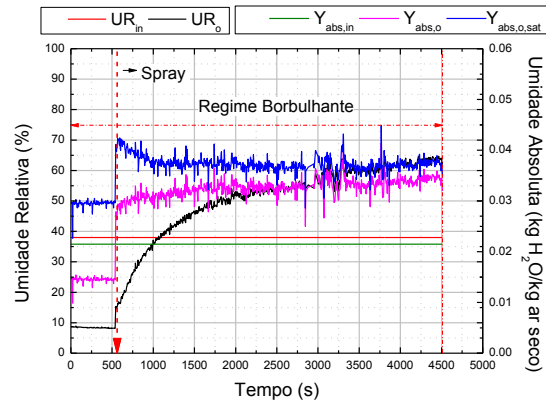
Gráfico 33 – Esfera de Alumínio, Condições Operacionais: $C_{susp}=15\%$ e $Q_{susp}=11$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros de eficiência de secagem e da força de secagem



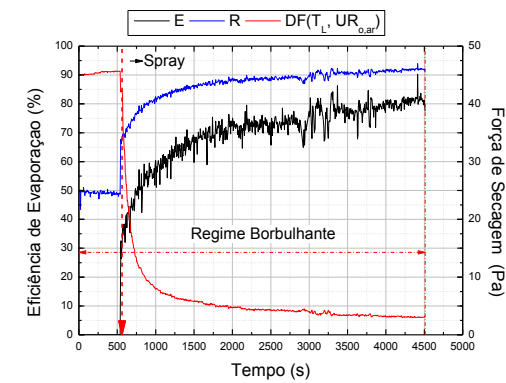
(a)



(b)



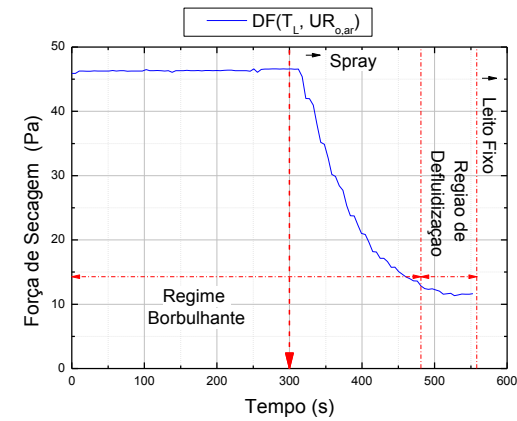
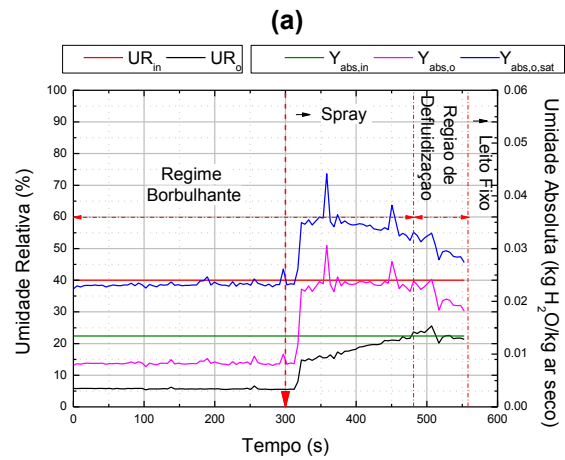
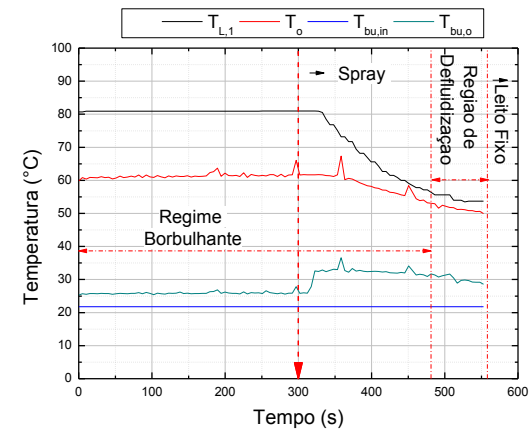
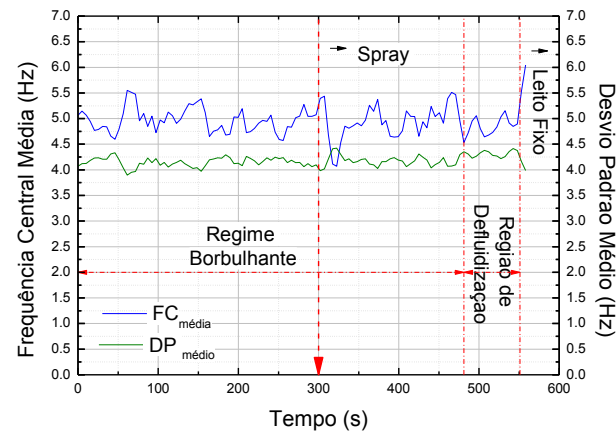
(c)



(d)

Fonte: Autoria Própria (2017)

Gráfico 34 – Esfera de Alumínio, Condições Operacionais: $C_{susp}=15\%$ e $Q_{susp}=13$ mL/min (a) Evolução da Frequência Central Média e do Desvio Padrão Médio da Distribuição Espectral; (b) Perfil de temperatura do ar e do leito; (c) Perfil de umidade do ar; (d) Parâmetros da força de secagem



Fonte: Autoria Própria (2017)