

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENGENHARIA QUÍMICA**

GRAZIELLE ALBUQUERQUE DE OLIVEIRA

**SECAGEM DE SUSPENSÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO EM
LEITO FLUIDIZADO UTILIZANDO ANÁLISE ESPECTRAL
GAUSSIANA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

GRAZIELLE ALBUQUERQUE DE OLIVEIRA

**SECAGEM DE SUSPENSÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO EM
LEITO FLUIDIZADO UTILIZANDO ANÁLISE ESPECTRAL
GAUSSIANA**

Trabalho de Conclusão de Curso 2
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química do Departamento de
Engenharia Química, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

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

PONTA GROSSA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Coordenação de Engenharia Química



TERMO DE APROVAÇÃO

SECAGEM DE SUSPENSÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO EM LEITO FLUIDIZADO UTILIZANDO
A ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA

por

Grazielle Albuquerque de Oliveira

Monografia apresentada no dia 29 de maio de 2017 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Everton Moraes de Matos
(UTFPR)

Prof. Dr. Vinícius Luiz de Carvalho
(UTFPR)

Profa. Dra. Maria Regina Parise
(UTFPR)
Orientadora

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

A folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do curso de Engenharia Química

Dedico este trabalho à minha família,
amigos e ao meu marido, pessoas sem as
quais esta conquista não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que possuem meu carinho e gratidão.

Agradeço a Deus por nunca me desamparar, e por me fornecer as ferramentas necessárias para seguir em frente nos momentos de dificuldades.

À minha orientadora professora doutora Maria Regina Parise, pela amizade e pelos seus ensinamentos, pelo seu lado humano e por todo apoio, dedicação e paciência dada a mim durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe Maria Salete Albuquerque por estar ao meu lado em todos os momentos e por acreditar em mim incondicionalmente.

Ao auxílio e apoio dado por toda minha família durante esta graduação.

Ao meu esposo Tairone Torri por todo amparo, incentivo e companheirismo nos momentos mais difíceis.

A minha colega Flávia Tramontim Silveira Schaffka, pelo apoio e auxílio no decorrer deste trabalho.

Aos meus amigos, que se transformaram em uma enorme família no decorrer desta jornada tornando-a mais leve, me fazendo rir e me amparando em momentos de dificuldades.

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

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa e estiveram conosco nestes anos.

Que os vossos esforços
desafiem as impossibilidades,
lembrai-vos de que as grandes coisas
do homem foram conquistadas do que
parecia impossível.
(Charles Chaplin)

RESUMO

OLIVEIRA, Grazielle Albuquerque. **Secagem de suspensão de carbonato de cálcio em leito fluidizado utilizando Análise Espectral Gaussiana**. Defesa realizada em 2017. 50. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

O fenômeno de defluidização parcial ou total de um leito fluidizado não é desejável em aplicações industriais, pois pode resultar na interrupção do processo. Por outro lado, a rápida detecção de alterações fluidodinâmicas do leito pode fazer com que o leito retorne às condições desejadas com o aumento da vazão de ar de fluidização e/ou com a redução de alimentação de suspensão. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo identificar a transição de regime fluidodinâmico em processo de secagem de suspensão de carbonato de cálcio, utilizando a análise espectral Gaussiana, que é uma técnica baseada em medidas de flutuação de pressão no leito. Os ensaios foram realizados em secador de leito fluidizado em escala laboratorial, que é constituído por uma coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e 1 m de altura. O material inerte utilizado foi esfera de vidro como diâmetro médio de Sauter de 0,334 mm, e suspensão aquosa de carbonato de cálcio com concentração de 15% em massa. A vazão de suspensão foi mantida em 6 mL/min e foram utilizadas duas temperaturas de secagem: 90 e 100 °C. Ao equipamento experimental foram acoplados transdutores de pressão de resposta rápida, juntamente com um sistema de aquisição e processamento de sinais, que composto por uma placa de aquisição de dados, um microcomputador e pelo *software* LabView 10.0™. Através dos resultados observou-se que a transição entre o regime borbulhante e a defluidização foi identificada utilizando a análise espectral Gaussiana. Adicionalmente, verificou-se que para ambas as temperaturas utilizadas, a temperatura do leito tende a se aproximar da temperatura de bulbo úmido, indicando saturação do leito, e, conseqüentemente, comprometendo o processo de secagem.

Palavras-chave: Análise Espectral Gaussiana. Defluidização. Leito fluidizado. Secagem de suspensão aquosa.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Grazielle Albuquerque. **Drying of calcium carbonate suspension in fluidized bed using the Gaussian spectral analysis.** Defesa realizada em 2017. 50. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2017.

The phenomenon of partial or total defluidization of a fluidized bed is not desirable in industrial applications, as it may result in the interruption of the process. On the other hand, rapid detection of fluid dynamics changes from the bed can cause the bed to return to desired conditions with increasing fluidization air flow and / or suspension feed reduction. In this context, the present work aims to identify the transition of fluidodynamic regime in the drying process of calcium carbonate suspension, using Gaussian spectral analysis, which is a technique based on measures of pressure fluctuation in the bed. The tests were carried out in a laboratory scale fluid bed dryer, which consists of an acrylic column of 0.11 m internal diameter and 1 m high. The inert material used was glass sphere as the mean Sauter diameter of 0.334 mm, and aqueous calcium carbonate suspension at 15% concentration by mass. Its suspension flow rate was maintained at 6 mL / min and two drying temperatures were used: 90 and 100°C. To the experimental equipment were pressure transducers coupled, of quick answer together a signals acquisition and processing system consisting of a data acquisition board, microcomputer and LabView software version 10.0. Through the results it was observed that the transition between the bubbling regime and the defluidization was identified using the Gaussian spectral analysis. Additionally, it was found that at both temperatures used, the bed temperature tended to approach the wet bulb temperature, indicating bed saturation, and, consequently, compromising the drying process.

Keywords: Defluidization. Drying of aqueous suspension. Fluidized bed. Gaussian Spectral Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Regimes de Fluidização.....	16
Figura 2 - Curva típica de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás.	19
Figura 3 - Classificação de Geldart (1973) de partículas com ar e em condições ambientais.....	21
Figura 4 - Espectro de potência da CMC.	26
Figura 5 - Espectro de potência da CMC.	27
Figura 6 - Espectro de potência da CMC.	27
Figura 7 - Evolução da frequência central e da curva fluidodinâmica.	30
Figura 8 - Exemplo de imagens microscópicas das esferas de vidro utilizadas para o cálculo do método de Peçanha e Massarani (1986).	34
Figura 9 - Desenho do secador de leito fluidizado.	35
Figura 10 - Esquema do sistema utilizado	35
Figura 11 - Localização do Plenum no Leito Fluidizado	36
Figura 12 - Perfil da frequência central (f_m) e do desvio padrão da distribuição (SD) durante o processo de secagem. $T_{ar} = 90\text{ }^\circ\text{C}$. (a) $H_b/D = 1.0$, (b) $H_b/D = 1.4$	43
Figura 13 - Perfil da frequência central (f_m) e do desvio padrão da distribuição (SD) durante o processo de secagem.	45
Figura 14 - Perfil de temperatura de bulbo úmido na saída da coluna e temperatura do leito durante a secagem.	46
Figura 15 - Perfil de temperatura de bulbo úmido na saída da coluna e temperatura do leito durante a secagem.	47
Fotografia 1 - Fotografia do sistema experimental. 1: coluna de fluidização; 2: bomba peristáltica; 3: transdutor de pressão; 4: ciclone; 5: filtro de mangas.	37
Quadro 1 - Dados do material inerte	31
Quadro 2 - Planejamento experimental e dados do ensaio.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS

A_{efk}	Amplitude espectral	[Pa]
A_{leito}	Área da secção transversal do leito	[m ²]
A_{st} :	Área da secção transversal	[m ²]
C	Coeficiente de descarga	
d	Diâmetro do orifício da placa	[mm]
D	Diâmetro da tubulação	[mm]
d_{cir}	Diâmetro circunscrito	[m]
d_{ins}	Diâmetro inscrito	[m]
d_i	Abertura da peneira	[mm]
d_p	Diâmetro médio da partícula	[m]
e	Fator de compressibilidade	
e_k	Resíduo de ajuste da curva	[-]
f_k	Frequência de sinal	[Hz]
f_m	Frequência central	[Hz]
G	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H/D	Razão entre altura e diâmetro interno do leito	
h_l	Altura do leito	[m]
$h_{l,mf}$	Altura do leito na mínima fluidização	[m]
\dot{m}	Vazão mássica do ar	[kg/s]
M	Massa total de partículas peneiradas	[kg]
M_{EV}	Massa de esferas de vidro	[kg]
m_s	Massa de sólidos no leito	[kg]
P_1	Pressão absoluta a montante da placa de orifício	[Pa]
u_c	Velocidade do início de transição de fluidização borbulhante para a turbulenta	[m/s]
u_0	Velocidade superficial do gás	[m/s]
u_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	[m/s]

LISTA DE SIGLAS

CMC	Celulose Microcristalina
FCC	<i>Fluid Catalytic Cracking</i> – Craqueamento Catalítico do Fluido
FFT	Transformada Rápida de Fourier
PI	Controlador Proporcional Integral
SD	Desvio Padrão da Distribuição

LETRAS GREGAS

ΔP	Queda de pressão do leito	[Pa]
β	Relação entre diâmetro do orifício da placa e tubulação	[-]
ε_m	Porosidade do leito	[-]
ε_{mf}	Porosidade do leito na mínima fluidização	[-]
Φ	Esfericidade da partícula	[-]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[kg/m.s]
σ	Desvio padrão da distribuição	[Hz]
ρ	Densidade do ar no <i>plenum</i>	[kg/m ³]
ρ_g	Densidade do fluido	[kg/m ³]
ρ_r	Densidade do gás ascendente na coluna	[g/cm ³]
ρ_p	Densidade da partícula	[kg/m ³]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	13
1.2 OBJETIVO GERAL	14
1.2.1 Objetivo Específico.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 FUNDAMENTOS DE FLUIDIZAÇÃO.....	15
2.1.2 Regimes de Fluidização	16
2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	20
2.3 CURVA FLUIDODINÂMICA E VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO	18
2.4 MEDIDAS DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO EM LEITO FLUIDIZADO	22
2.5 PROCESSO DE SECAGEM.....	23
2.6 PUBLICAÇÕES REFERENTES AO TEMA	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 MATERIAIS.....	31
3.1.1 Peneiramento.....	32
3.1.2 Diâmetro Médio de Sauter	32
3.1.3 Esfericidade	33
3.1.4 Determinação da densidade aparente	34
3.2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL	34
3.3 ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA.....	37
3.4 ORGANIZAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	41
3.4.1 Organização Experimental.....	41
3.4.2 Procedimento Experimental.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 ANÁLISE DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NO LEITO.....	42
4.2 PERFIS DA TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO E TEMPERATURA DO LEITO.....	45
5 CONCLUSÃO	48

REFERÊNCIAS.....	49
-------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

O leito fluidizado é um sistema constituído por partículas sólidas e um fluxo ascendente de fluido, proporcionando uma boa mistura entre fases e consequentemente altas taxas de transferência de calor e de massa.

A fluidização é empregada em diversas operações industriais como a combustão e a gaseificação de carvão e biomassa, o recobrimento de partículas, a secagem de sólidos, o processamento de materiais, a recuperação de energia de gases e de sólidos quentes e FCC (*Fluid Catalytic Cracking* – Craqueamento Catalítico do Fluido) em refinarias de petróleo.

Uma mistura adequada entre o gás e as partículas sólidas durante a secagem em leito fluidizado, às vezes, não é possível, como é o caso dos processos de recobrimento de partículas e secagem de suspensão aquosa, onde a adição de suspensão no interior do leito pode favorecer a aglomeração e a defluidização parcial ou total do leito. Nesse sentido, é essencial a identificação dos momentos iniciais da defluidização, para que a fluidização retorne às condições requeridas. Uma maneira de identificar os momentos iniciais da defluidização é através de medidas de flutuação de pressão no leito (PARISE, 2007).

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O processo de secagem de suspensão aquosa em leito fluidizado gás-sólido depende de muitas variáveis, tornando o leito um ambiente que necessita de um amplo controle. Fatores como: umidade relativa, umidade absoluta, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e pressão atmosférica local influenciam no processo, bem como características do material particulado como: diâmetro médio das partículas, densidade do material, esfericidade e condutividade, além dos fatores de operação do sistema como: vazão de ar, temperatura do leito, entre outros.

1.2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral o estudo da fluidodinâmica do leito durante o processo de secagem de suspensão aquosa de carbonato de cálcio em leito fluidizado, utilizando a análise espectral Gaussiana, que é uma técnica baseada em medidas de flutuação de pressão no leito.

1.2.1 Objetivo Específico

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Efetuar a caracterização do material particulado;
- ✓ Realizar ensaios preliminares visando uma melhor definição das condições experimentais;
- ✓ Proceder com os ensaios definitivos;
- ✓ Analisar os resultados obtidos.

1.3 JUSTIFICATIVA

Nos processos que utilizam leito fluidizado gás-sólido é fundamental manter a estabilidade do estado de fluidização, de modo a obter uma boa mistura das fases gasosa e sólida, e conseqüentemente, alto desempenho nos processos. Entretanto, a adição de umidade no interior do leito pode gerar a aglomeração do material particulado.

Várias análises baseadas em medidas de flutuação de pressão no leito têm sido estudadas para analisar a transição de regimes fluidodinâmicos, dentre estes estão inseridos as análises estatísticas, espectral, *wavelet* e caos.

Neste sentido, no presente trabalho utilizar-se-á a análise espectral Gaussiana, esta técnica possui a capacidade de identificar os instantes iniciais da defluidização do leito, o que gera tempo hábil para a atuação nas variáveis necessárias, resultando no retorno do leito as condições adequadas de operação, reduzindo assim a necessidade de interrupção de processos que façam uso do leito fluidizado gás-sólido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste item ocorre a descrição dos fundamentos de um sistema de leito fluidizado, bem como os regimes fluidodinâmicos, a curva fluidodinâmica e a velocidade de mínima fluidização, a classificação das partículas sólidas, as medidas de flutuação de pressão no leito e as vantagens e desvantagens do processo adotado.

2.1 FUNDAMENTOS DE FLUIDIZAÇÃO

Fluidização é uma operação em que partículas sólidas tem comportamento similar ao de um fluido. As características fluidodinâmicas dependem do estado de fluidização do leito, estão entre essas características a expansão do leito, a formação de bolhas, a porosidade, o arraste das partículas, entre outras; e estas dependem de fatores como: características físicas do sólido (densidade aparente, diâmetro médio das partículas e esfericidade), geometria do leito e velocidade do fluido (FELIPE, 2004).

2.1.2 Regimes de Fluidização

A Figura 1 mostra os regimes de fluidização.

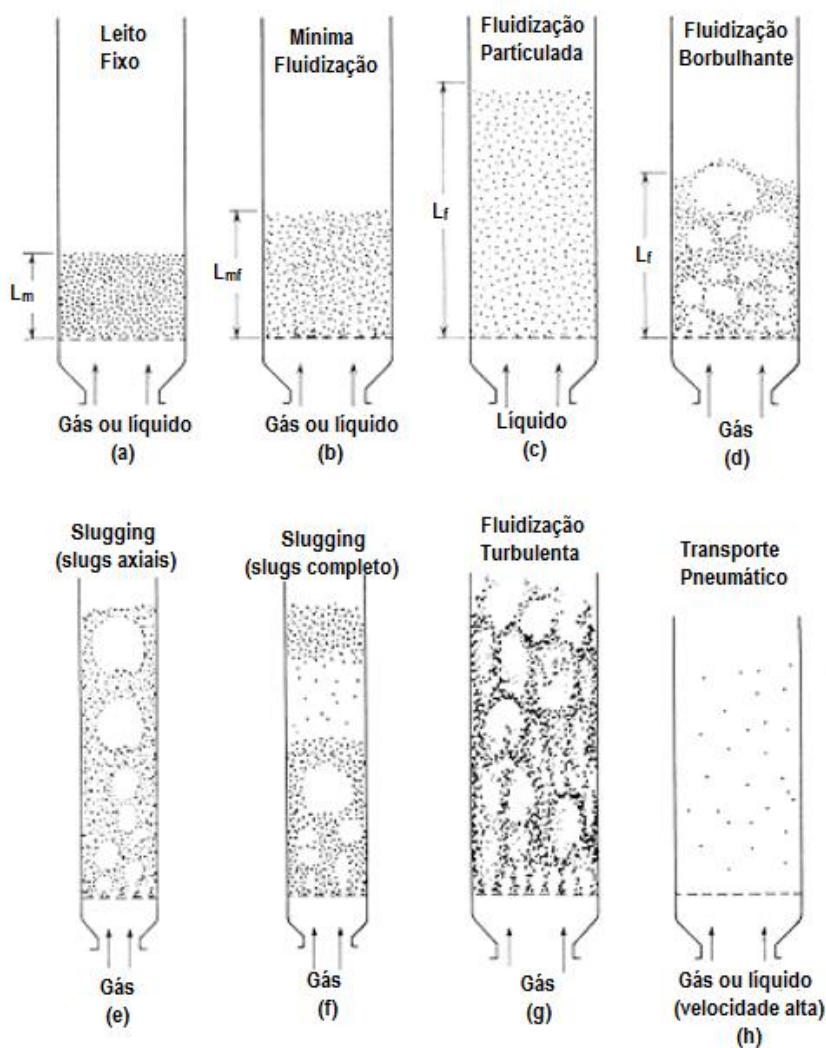


Figura 1 - Regimes de Fluidização.

Fonte: Kunii e Levenspiel (1991)

- Leito fixo: ocorre em baixas velocidades superficiais de gás (u_0), considerando o contato gás-sólido, as partículas sólidas permanecem em estado estacionário no leito, e o gás escoar através de interstícios gerados entre as partículas (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).
- Mínima fluidização: neste regime há a diminuição da concentração volumétrica de sólidos, a velocidade superficial do gás neste caso é a velocidade de mínima fluidização (u_{mf}), esta condição é conhecida por fluidização incipiente. O aumento da velocidade do gás proporciona um maior alcance o qual gera a

suspensão dos sólidos particulados ascendentemente. Neste momento ocorre um contrabalanço entre o fluído e a força de atrito entre as partículas com o peso delas. Ocorre desaparecimento da componente vertical da força de compressão entre as partículas adjacentes, tornando a queda de pressão através de qualquer secção do sistema igual ao peso do material particulado daquela secção (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

- Leito fluidizado particulado: também conhecido como leito fluidizado homogêneo ou suave, ocorre em sistemas líquido-sólido, quando há o aumento da vazão gerando uma velocidade acima da mínima fluidização acarretando na expansão progressiva do leito. As instabilidades de vazão permanecem pequenas, pois são amortizadas, e a heterogeneidade, ou vazios de líquido, não são visualizados em condições normais (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).
- Leito fluidizado borbulhante: conhecido também como leito heterogêneo, as configurações em sistemas gás-sólido fazem com que se comporte de forma diferente. Neste caso ao se elevar a vazão acima da mínima fluidização, percebe-se uma considerável instabilidade no leito, gerando a formação de bolhas e canais preferenciais para a passagem de gás, quanto maior a vazão do fluxo de ar, maiores são as agitações e mais vigorosa é a movimentação dos sólidos. Toda via não há uma grande expansão do leito, mantendo o volume do mesmo próximo ao obtido na mínima fluidização (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).
- *Slugging* também conhecido como *slugs* axiais, este regime ocorre em sistemas gás-sólido, no qual as bolhas de gás aumentam à medida que ascendem no leito, esse aumento é devido a aderência entre elas. Se o diâmetro do leito ser pequeno e profundo, as bolhas eventualmente se expandem pela coluna tomando toda sua secção transversal, estabelecendo assim um regime de escoamento pistonado, também conhecido como *slugging* (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).
- *Slug* completo: o regime pistonado faz com que a porção do leito que se encontra na parte superior seja lançada para cima, e as partículas arremessadas retornam para o próximo *slug* que se forma e assim sucessivamente (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).
- Leito fluidizado turbulento: ocorre quando a vazão de gás é alta excedendo assim a velocidade terminal dos sólidos, resultando em desaparecimento da

superfície superior do leito. Este regime é uma suspensão do sólido particulado mais vigorosa, gerando instabilidade na formação de bolhas. O sistema mostra uma movimentação turbulenta do agrupamento de sólidos e vazios de gás de formas e tamanhos diversificados. (KUNII e LEVENSPIEL, 1991)

- Transporte pneumático: também conhecido como leito disperso, diluído ou de fase leve. Neste processo a velocidade de vazão do gás se torna ainda maior fazendo com que as partículas sejam carregadas do leito juntamente com o fluido (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

2.2 CURVA FLUIDODINÂMICA E VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO

A curva fluidodinâmica (Figura 3) relaciona a queda de pressão do leito (ΔP) e a velocidade superficial do gás (u_0). A mesma é utilizada na determinação a velocidade mínima de fluidização, evidenciando graficamente o comportamento do material que se encontra no interior do leito durante os ensaios.

Na região representada (Figura 3) como leito fixo, não há a movimentação de partículas. Neste gráfico é possível visualizar que a velocidade de fluxo no leito é diretamente proporcional à queda de pressão, até que esta atinja seu valor máximo.

Esse aumento na queda de pressão ocorre devido à resistência que se dá através do atrito entre fluido e partícula. O pico representado pela, ΔP_{max} , indica o momento no qual o fluxo vence a resistência de interação do material particulado (TERRON, 2012).

Após a superação dessa resistência temos que a força de arraste exercida pelo fluido é igualada ao peso aparente do material particulado gerando uma ΔP constante que resulta na suspensão do mesmo e no aumento da porosidade do leito. Essa igualdade está representada pela parte estável do gráfico, sendo possível notar que no sentido contrário do gráfico não há pico algum, pois essa força existente inicialmente entre o material já foi vencida na fase inicial.

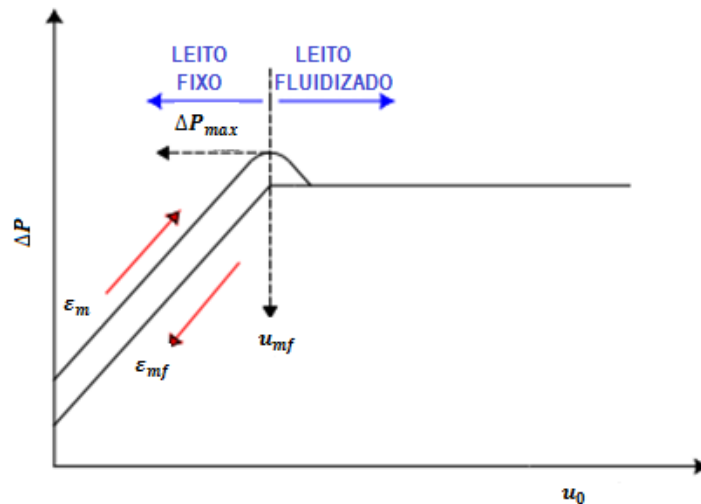


Figura 2 - Curva típica de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás.

Fonte: Parise, 2007

No momento em que a velocidade superficial do gás encontra-se acima da velocidade mínima de fluidização, as bolhas de gás tornam-se visíveis e ocorre a expansão do leito, tendo como resultado uma fluidização heterogênea. Com base nesse estado a queda de pressão no leito se mantém praticamente constante e independe da velocidade superficial do gás. (KUNII e LEVENSPIEL,1991)

Com a interrupção da vazão de gás, ocorre uma suave acomodação ou vibração do leito que gerará uma redução na porosidade do leito (ε_m) fazendo com que esta retorne a seu valor inicial. Usualmente a velocidade mínima de fluidização (u_{mf}) é obtida como a intersecção da linha de ΔP versus velocidade do gás (u_0) do leito fixo de porosidade ε_{mf} , sendo a linha horizontal onde ΔP se encontra com a constante correspondente ao leito fluidizado. (KUNII e LEVENSPIEL,1991).

A queda de pressão em função da velocidade do fluido na região da mínima fluidização é representada equação de Ergun (1952): Equação 1

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \cdot \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (1)$$

Onde:

ε_{mf} : porosidade na mínima fluidização (adimensional);

ϕ : esfericidade da partícula (adimensional);
 d_p : diâmetro médio da partícula (m);
 u_{mf} : velocidade do gás na mínima fluidização (m/s);
 ρ_g : densidade do fluido (kg/);
 ρ_p : densidade da partícula (kg/m³);
 μ : viscosidade dinâmica do fluido (kg/ms);
 g : aceleração da gravidade (m/s²).

No que se diz respeito à porosidade na mínima fluidização, é possível calculá-la através da seguinte equação:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{m_s}{\rho_p A_{st} h_{lmf}} \quad (2)$$

Onde:

ε_{mf} : porosidade na mínima fluidização (adimensional);
 m_s : massa de sólidos no leito (kg);
 ρ_p : densidade da partícula (kg/m³);
 A_{st} : área da secção transversal do leito (m²);
 h_{lmf} : altura do leito na mínima fluidização (m).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS

Geldart (1973) *apud* Nitz e Guardani (2008) efetuou uma classificação no comportamento de sólidos fluidizados por gases em quatro categorias, sendo ela representadas pela Figura 2.

O diagrama de Geldart (1973) *apud* Kunii e Levenspiel (1991) faz a representação da relação que se tem entre as características físicas do material particulado e a densidade do fluido, com os diversos regimes de fluidização. Esta representação se dá em quatro grupos que serão melhores descritos a seguir:

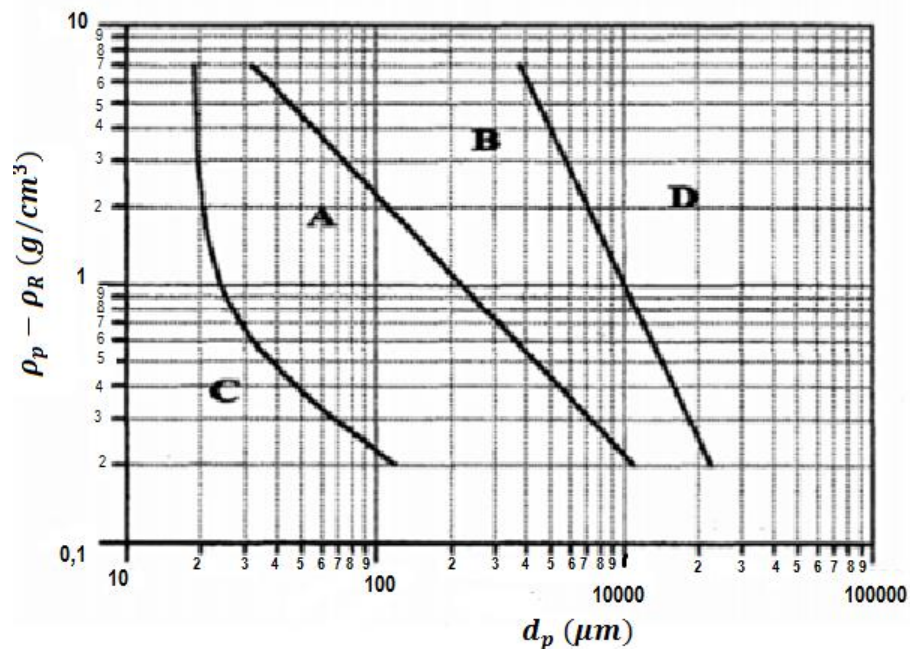


Figura 3 - Classificação de Geldart (1973) de partículas com ar e em condições ambientais.

Fonte: Kunii e Levenspiel (1991)

- Grupo A: suas partículas possuem um diâmetro médio pequeno e/ou densidade baixa, sendo ela inferior a 1400 kg/m^3 . Quando há a fluidização desses sólidos o leito sofre uma expansão homogênea ao atingir a velocidade de mínima fluidização, e à medida que se aumenta a velocidade do gás obtêm-se uma fluidização borbulhante. A representação desse grupo se dá pelo FCC (*Fluid Catalytic Cracking*) (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).
- Grupo B: é representado por materiais com tamanhos médio de partícula (faixa de 40 a $500 \mu m$), estando sua densidade entre 1400 e 4000 kg/m^3 , as bolhas são formadas logo que ocorre a superação da velocidade de mínima fluidização (u_{mf}). Esse tipo de material particulado acarreta apenas a fluidização borbulhante. Um exemplo de partículas pertencentes a esse grupo seria a areia (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).
- Grupo C: essas partículas são altamente coesivas ou muito finas, possuindo uma fluidização extremamente difícil, isto se deve as forças existentes entre as partículas, sendo estas superiores as forças resultantes da ação do gás, gerando facilmente a formação de canais preferenciais e/ou *slugs* os materiais que pertencem a esse grupo são a farinha de trigo, o amido, o pó facial, entre outros (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

- Grupo D: a este grupo pertence os materiais grossos e/ou densos, e nestas condições a ascensão de bolhas ocorre à uma velocidade inferior a do gás nos interstícios da partícula. Em caso de leito profundo a fluidização é mais difícil, pois a expansão do leito com esse material particulado é pequena, gerando uma baixa mistura do material. Geralmente sua fluidização ocorre de forma mais eficiente em leito de jorro. Neste grupo encontramos partículas como ervilha e grão de café (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

2.4 MEDIDAS DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO EM LEITO FLUIDIZADO

As medidas de flutuação de pressão trazem a possibilidade de uma melhor percepção da dinâmica do leito, pois sinalizam a pressão em diversos pontos do sistema, demonstrando possíveis problemas ou alterações no processo como um todo.

Segundo SCHOUTEN e Van Den BLEEK (1998), as medidas de flutuação de pressão viabilizam a percepção de fenômenos como: a turbulência, a formação, a passagem e a erupção das bolhas de gás.

Os fatores que podem gerar alterações na natureza da flutuação de pressão em leitos fluidizados gás-sólido são o tamanho do material particulado, o modelo de placa distribuidora, a velocidade superficial do gás, o diâmetro do leito, a localização das tomadas de pressão do sistema e a altura do leito fixo. (DHODAPKAR e KLINZING, 1993).

De acordo com JOHNSON *et al.*, 2000, as séries temporais de sinais de pressão no leito podem ser analisadas pelo:

- Domínio do tempo, tendo seu estudo focado no desvio padrão, e na variância da amplitude do sinal.
- Domínio da frequência, a qual utiliza a transformada de Fourier;
- Espaço-estado, conhecido como análise do caos.

2.5 PROCESSO DE SECAGEM

O termo secagem envolve as operações de transferência de calor e massa, e refere-se à vaporização e ao arraste de umidade contida no material a ser seco no leito.

2.5.1 Classificação dos Materiais

Segundo Foust (1982), os materiais são classificados em duas fases, de acordo com o comportamento do material durante o período de secagem:

Primeira fase: composta por sólidos cristalinos ou granulados que efetuam a retenção de umidade através de interstícios gerados entre as partículas ou em poros superficiais. Neste caso a movimentação da umidade tem maior liberdade que se deve a interação das forças gravitacionais e de tensão superficial (ou capilares). Usualmente o sólido do processo costuma ser inorgânico, sendo então pouco afetado pela presença do líquido e pelo processo de secagem em si, logo há a possibilidade de escolha das condições de secagem mais voltada para a comodidade e as vantagens econômicas. (FOUST, 1982)

Segunda fase: Constituída por sólidos orgânicos, sendo eles amorfos, fibrosos ou gelatinosos. Nestes materiais ocorre uma movimentação mais lenta da umidade que se deve a difusão do líquido pela estrutura sólida, ocorrendo a retenção de umidade como parte integral da estrutura ou através da sua penetração em fibras e poros delgados internos. Neste caso os sólidos são afetados pelo processo de secagem, pois há uma significativa quantidade de água retida intimamente na estrutura desses sólidos, o que resulta em rachaduras ou empenamentos da amostra em caso de uma alta taxa de secagem ou na formação de um revestimento parcialmente seco que impeça a continuidade do processo, pois acentua a desigualdade dos teores de umidade da amostra, podendo gerar a deterioração da mesma. Logo neste caso a prioridade para a escolha dos parâmetros do processo de secagem é a manutenção da qualidade amostral. (FOUST, 1982)

2.6 TRABALHOS DA LITERATURA REFERENTES AO TEMA

Serão descritos a seguir alguns trabalhos referentes ao tema abordado no presente trabalho.

Dhodapkar e Klinzing (1993) *apud* Parise (2007) fizeram um estudo a respeito da qualidade do regime de fluidização através da flutuação de pressão, fazendo uso de partículas dos Grupos A e B de Geldart (1973). Através do qual observaram que em leitos profundos ($H/D > 5$) o comportamento da flutuação de pressão difere significativamente quando comparada a leitos rasos, isto ocorre devido a contínua variação do estado de fluidização ao longo da altura do leito devido a expansão do gás. Também efetuaram a verificação da complexidade da função de flutuação de pressão que envolve propriedades de partículas, diâmetro do leito, localização dos medidores de pressão, tipo de distribuidor e da altura estática do leito; sendo a medida de flutuação de pressão um método simples de controle e monitoramento da qualidade do processo de fluidização.

Ao realizar um estudo baseado em Kage et. al. (1993), Fonseca (2009) efetuou uma análise de comportamento do leito baseada na análise de frequência utilizando a Transformada de Fourier, para medidas de flutuações de pressão captadas no *plenum* do leito fluidizado com partículas sólidas. Observaram que duas frequências possuíam variações de acordo com as frequências de geração de erupção de bolhas, e a frequência natural do leito, em que depende do volume do *plenum* e da quantidade de partículas do leito.

Os autores notaram a relação da frequência de geração de bolhas com a queda de pressão na placa distribuidora, através da observação de medidas de flutuação de pressão tomadas no *plenum* do leito, a partir de diversos diâmetros de abertura no distribuidor de gás.

Bai et. al. (1996) *apud* Parise (2007), estudaram a velocidade de transição da fluidização borbulhante para a fluidização turbulenta, através de uma análise estatística, para esse estudo utilizaram medidas de flutuação de pressão em processo de fluidização. Verificaram em seus dados a variação do desvio padrão da flutuação de pressão em função da velocidade superficial do gás. A caracterização desta transição entre regime borbulhante e regime turbulento do leito foi realizada em ensaios com fração de partículas grossas.

Os pesquisadores notaram que há um aumento no desvio padrão quando se tem um acréscimo da velocidade do gás $u_0 < u_c$ (velocidade de transição de fluidização borbulhante para turbulenta). Também foi possível observar que quando há uma diminuição na velocidade, é gerado um acréscimo de partículas grossas que resulta em uma elevação de u_c (BAI et. al., 1996 *apud* PARISE, 2007).

Utilizando a análise de flutuação de pressão os autores notaram que os sinais de flutuação de pressão podem ser utilizados para caracterizar e distinguir o comportamento do escoamento de diferentes classes de partículas da classificação dada por Geldart (1973). Leitos com partículas classificadas por Geldart (1973) como A e B demonstraram flutuações de escalas e picos de frequência dominantes, isso se deve a movimentação das bolhas, entretanto para partículas do grupo C as flutuações de pressão foram menores devido a não formação de bolhas (BAI et. al., 1996 *apud* PARISE, 2007).

A partir da avaliação das flutuações de pressão no domínio da frequência, aplicando a Transformada de Fourier Felipe (2004), conseguiu identificar e caracterizar os vários regimes de fluidização em leitos fluidizados gás-sólido.

Felipe (2004) utilizou diferentes pontos para tomada de pressão no leito e no *plenum*, sendo essas obtidas a partir de transdutores de pressão (absoluto e diferencial), foram utilizados diversos materiais sólidos o que permitiu que o autor observa-se em seu trabalho efeitos que influenciaram na conclusão obtida, em que para que haja uma estimativa confiável não é recomendável a instalação de sensores de pressão próximo ao distribuidor de ar e que o plenum é o lugar adequado para captação dos sinais de pressão.

Em seus experimentos foram utilizadas duas colunas de fluidização, feitas em acrílico, sendo uma (coluna 1) com diâmetro interno de 0,11 m e altura de 1,5 m e a outra (coluna 2) com diâmetro interno de 0,14 m e altura de 0,8 m. As pesquisas foram realizadas com 12 tipos diferentes de material particulado, sendo de acordo com a classificação de Geldart (1973), 5 pertencentes ao grupo B, 5 pertencentes ao grupo A e 2 pertencentes ao grupo C; e sete diferentes regimes de fluidização (leito fixo, fluidização particulada, fluidização borbulhante simples, múltipla e explosiva, slugging de parede e flutuante). Durante o experimento a frequência de amostragem de 100 Hz foi mantida e foram obtidas 8192 medidas de pressão (FELIPE, 2004).

Na identificação e caracterização dos regimes de fluidização, foi observado que espectros de mesmo regime, obtidos com sólidos diferentes, possuem frequências dominantes aproximadas e também bandas semelhantes (FELIPE, 2004).

Segundo Felipe (2004), banda do espectro é gerada pela diversidade de tamanho das bolhas de gás formadas durante a fluidização. Nas figuras 4, 5 e 6, nota-se que o aumento da velocidade superficial do gás (u_0) resulta não apenas no deslocamento do espectro para a extremidade direita, mas também no estreitamento de sua banda, que ocorre até o momento em que se alcança o regime *slugging*, observado através da Figura 6, onde o espectro caracteriza-se por demonstrar um único pico, que de acordo com Felipe (2004), se deve ao fato das bolhas neste regime apresentarem uma maior uniformidade em seu tamanho, gerando assim a redução da banda do espectro. Para o regime de *slugging* também foi obtido por Silva (1998) um espectro com um único pico, que segundo Felipe (2004) parece indicar que, o formato do espectro independe do tipo de equipamento usado, quando falamos de um mesmo regime de fluidização.

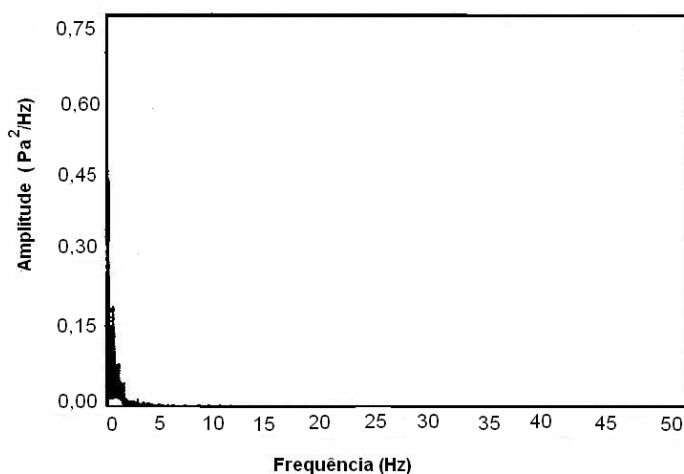


Figura 4 - Espectro de potência da CMC.

Leito Fixo – $u_0 = 0,05$ m/s.

Fonte: Felipe (2004).

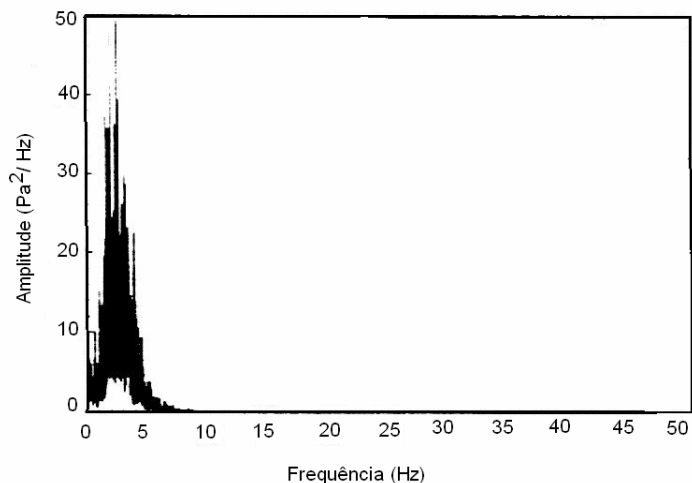


Figura 5 - Espectro de potência da CMC.
Fluidização Borbulhante – $u_0 = 0,12$ m/s.
Fonte: Felipe (2004).

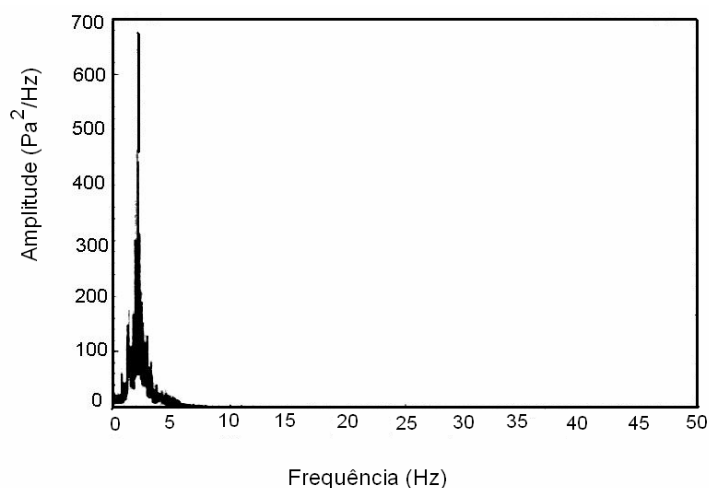


Figura 6 - Espectro de potência da CMC.
Fluidização *Slugging* – $u_0 = 0,32$ m/s.
Fonte: Felipe (2004).

Foram realizados também no mesmo trabalho experimentos de recobrimento de partículas, visando observar o fenômeno de aglomeração de partículas, pela metodologia de monitoramento da fluidização, fazendo uso da transformada de Fourier (FELIPE, 2004).

Na pesquisa de Parise (2007) foi estudada a aplicação da distribuição espectral normal em leito fluidizado gás-sólido, onde foram desenvolvidos diversos experimentos com partículas de areia e celulose microcristalina (CMC), nesses ensaios foram alterados a altura do leito e o diâmetro médio das partículas, buscou-

se identificar a região onde o leito demonstra uma tendência a defluidização, possibilitando assim a atuação no processo, visando impedir que a perda de eficiência ou até mesmo a necessidade de interromper a produção ocorra.

O estudo tem por objetivo desenvolver uma metodologia que possua a capacidade de identificação da região de defluidização durante a operação de um leito fluidizado gás-sólido, através da análise de medidas de flutuação de pressão utilizando a transformada de Fourier em conjunto com a Distribuição Exponencial Gaussiana. A partir deste método houve a possibilidade de identificar visivelmente a região onde há a tendência de defluidização, onde o estudo possui aplicações industriais através do controle em tempo real de processos em leito fluidizado gás-sólido (PARISE, 2007).

Neste mesmo trabalho, foram realizados experimentos de secagem fazendo uso de partículas de celulose microcristalina, buscando obter a identificação do ponto crítico de umidade, através da frequência dominante e do desvio padrão da flutuação de pressão, como também a metodologia proposta (PARISE, 2007)

Silva et. al. (2011) aplicaram a metodologia da distribuição espectral Gaussiana de pressão para o monitoramento e controle da defluidização em processos de recobrimento de partículas em leito fluidizado, fazendo uso da celulose microcristalina como sólido particulado.

Este trabalho possuiu duas etapas, na primeira era efetuado o monitoramento dos regimes de fluidização durante o processo de recobrimento sem controle, já na segunda fazia-se o controle da taxa de fluxo de ar e da taxa de fluxo de suspensão de recobrimento utilizando controlador proporcional integral (PI) (SILVA et. al., 2011). Neste estudo, vários parâmetros foram alterados durante o processo, sendo eles: massa da partícula sólida, velocidade do ar em excesso em relação a velocidade de fluidização mínima com temperatura de 70 °C e fluxo de suspensão de recobrimento (SILVA et. al., 2011).

A partir dessa metodologia, houve a possibilidade de identificação das transições dos regimes de fluidização, e também permitiu a definição de uma frequência de 6 Hz a 7 Hz de regime estável, a qual foi utilizada como valor de *set point* do controlador para manipulação do sinal de comando do conversor de frequência, e para a bomba peristáltica. Experimentos em circuitos fechados demonstraram que o uso de um sistema de controle pode permitir uma melhoria na

obtenção de condições fluidodinâmicas do leito em relação ao processo sem controle (SILVA et. al., 2011).

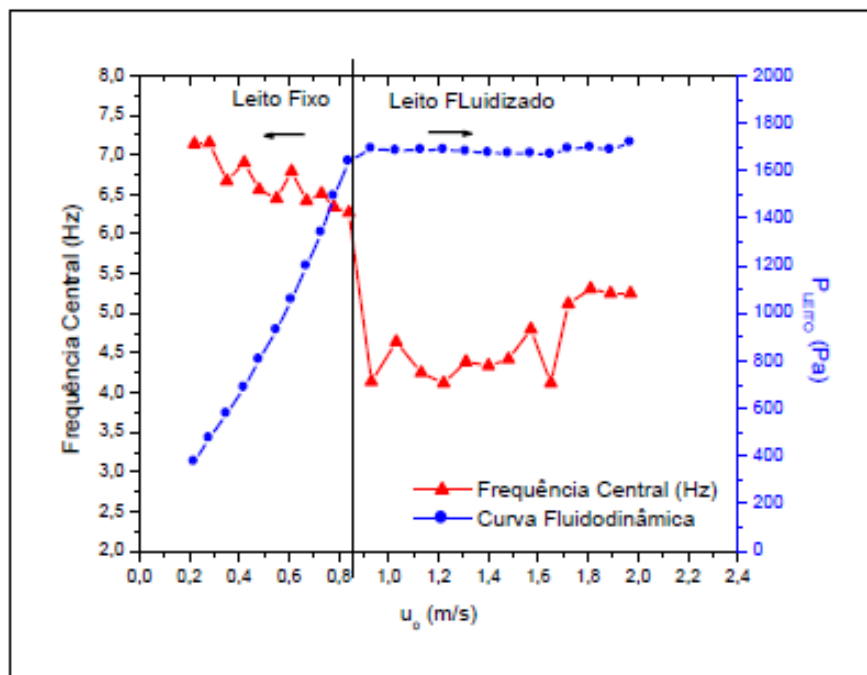
Parise et. al. (2013) realizaram uma análise a respeito da detecção da região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido através de medidas de flutuação de pressão no leito. Para isto foi utilizada a metodologia da análise espectral Gaussiana.

Para a realização desses experimentos utilizou-se uma coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e 1 m de altura. O material particulado possuía diâmetro de 1 a 2 mm, neste caso foram utilizadas esferas de vidro. A influência da alteração da massa no leito e o diâmetro das partículas foram analisados durante o experimento. O experimento foi instrumentado com transdutores de pressão de resposta rápida, acoplado a um sistema de aquisição processamento de sinais, que possui em sua composição uma placa de aquisição de dados, um computador e o *software* LabView 10.0™ (PARISE et. al., 2013).

Esta pesquisa demonstrou a evolução da frequência central sobre a curva fluidodinâmica, para as esferas de vidro, adquiridas a partir da redução da velocidade superficial do ar. Notaram que houve um acréscimo no valor da frequência central, no momento em que o leito tende à defluidização, ou seja, quando a velocidade superficial do ar se encontra próxima a mínima fluidização, o que pode ser melhor visualizado com o auxílio da curva fluidodinâmica (PARISE et. al., 2013).

A Figura 7 (a) faz referência a uma altura de leito de 0,1m e diâmetro médio de partículas de 1,55 mm, enquanto que a Figura 7 (b) faz referência a uma altura de leito de 0,2m e diâmetro médio de partículas de 1,55 mm – diâmetro interno da coluna (H/D) possui valor aproximado de 1 para a Figura 7 (a) e 2 para a Figura 7 (b). Notou-se que nas duas condições experimentais é possível identificar de forma clara a região de defluidização. Sendo esta região definida através do valor de frequência central mínima que posteriormente sofre um acréscimo, até que atinja o regime de leito fixo (PARISE et. al., 2013).

a)



b)

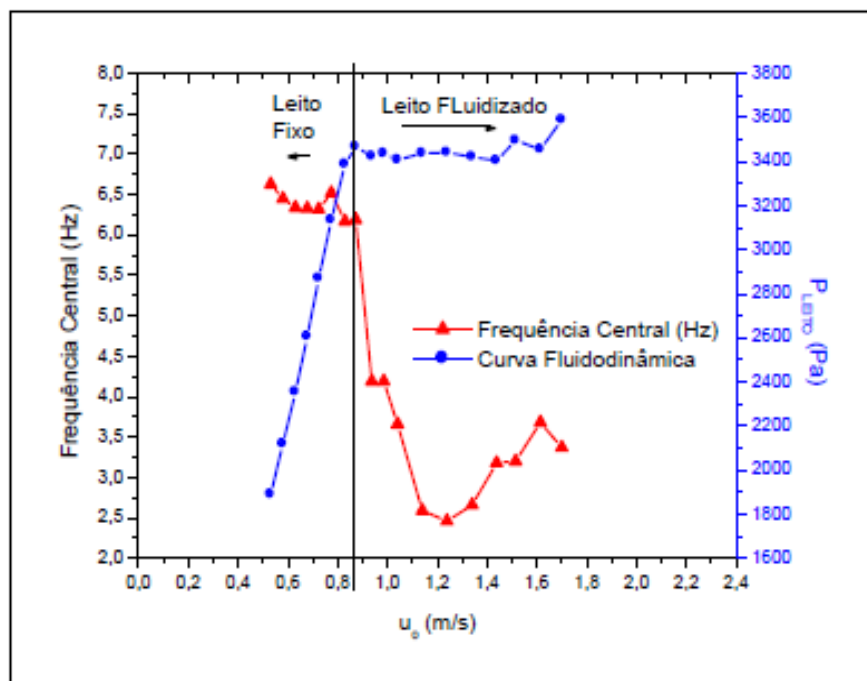


Figura 7 - Evolução da frequência central e da curva fluidodinâmica.

(a) $d_p=1,55$ mm; $h_i=0,10$ m; (b) $d_p=1,55$ mm; $h_i=0,20$ m.

Fonte: Parise et. al, 2013, p. 4.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo encontra-se os materiais utilizados, bem como suas características físicas, a descrição do sistema experimental e o procedimento desenvolvido. A metodologia utilizada para a localização da região onde há tendência de defluidização, será melhor detalhada neste capítulo, assim como a descrição da parte que envolve a aquisição e o processamento de sinais que são empregados para a coleta de dados em cada teste.

3.1 MATERIAIS

Neste trabalho foi utilizada suspensão aquosa de carbonato de cálcio e, como material inerte utilizou-se esferas de vidro.

As características físicas dos materiais que foram determinadas nesse trabalho são: diâmetro médio, densidade aparente e esfericidade. A análise granulométrica das partículas foi realizada por peneiramento em peneiras padronizadas pelo sistema Tyler. A densidade aparente é determinada através de picnometria líquida, sendo esta uma técnica baseada no deslocamento de líquido pela adição das partículas sólidas. Para obtenção da esfericidade do material inerte realizou-se a técnica de Peçanha e Massarani (1986).

A seguir temos uma tabela que apresenta as características físicas do material inerte (esferas de vidro) utilizado neste trabalho:

Características físicas do material	
Tipo de partícula	Esferas de vidro
Diâmetro médio do material (mm)	0,334
Densidade da amostra (kg/m ³)	2355,2
Esfericidade	0,96
Classificação de Geldart	B

Quadro 1 - Dados do material inerte
Fonte: Autoria própria

3.1.1 Peneiramento

Existem muitas padronizações de peneiras, sendo as mais conhecidas as séries de Tyler e a ASTM. As peneiras que foram utilizadas nesse experimento são as da série de Tyler que possuem 14 peneiras, tendo como parâmetro a peneira de 200 mesh (mesh é o número de malhas por polegada linear), esta é constituída com fio de arame de 0,053mm de espessura, possuindo assim uma abertura livre de 0,074mm. As demais peneiras são: 150, 100, 65, 48, 35, 28, 20, 14, 10, 8, 6, 4 e 3 mesh, porém, estes valores podem ser estendidos. (TERRON, 2012)

O processo de peneiramento consiste na passagem de um conjunto de partículas, por malhas de peneiras progressivamente menores coletando e pesando as partículas retidas em cada peneira, este processo pode ser realizado para que se encontre o diâmetro médio do material inerte (esferas de vidro), visto que este é um dos parâmetros que necessitam ser determinados para que se inicie os ensaios de secagem.

Após o peneiramento foi definida a faixa de 250 a 500 μm para este trabalho.

3.1.2 Diâmetro Médio de Sauter

A equação utilizada para o cálculo do diâmetro médio de Sauter é:

$$d_{ps} = \frac{1}{\sum x_i / d_i} \quad (3)$$

Sendo:

x_i : a fração mássica de partículas em cada peneira;

d_{ps} : diâmetro médio de Sauter;

d_i : abertura da peneira (mm).

O cálculo para a obtenção da fração mássica das partículas nos intervalos é:

$$x_i = \frac{m_i}{M} \quad (4)$$

Sendo:

m_i : a massa retida na peneira;

M: massa total de partículas peneiradas.

O cálculo para a obtenção da abertura da peneira é:

$$d_i = \frac{d_{hi} + d_{ji}}{2} \quad (5)$$

Sendo:

d_{hi} : a média da malha que reteve;

d_{ji} : a média da malha anterior.

3.1.3 Esfericidade

A esfericidade do material inerte é outra variável que interfere no processo de secagem de um leito fluidizado, pois envolve a forma como é disposta a superfície de contato entre material inerte e a suspensão aquosa a ser seca, sendo também utilizada no cálculo da velocidade mínima de fluidização na Equação de Ergun (1952), apresentada como Equação 1, neste trabalho.

O cálculo da esfericidade foi realizado através do método de Peçanha e Massarani (1986), no qual ela é dada através da seguinte equação:

$$\phi = \frac{d_{ins}}{d_{cir}} \quad (6)$$

Sendo:

ϕ : esfericidade (adimensional);

d_{ins} : diâmetro inscrito (diâmetro menor em m);

d_{cir} : diâmetro circunscrito (diâmetro maior em m).

Para efetuar este cálculo, foi utilizada uma câmera da marca Evolution® LC, acoplada ao microscópio óptico da marca Olympus®, modelo BX60, e enviadas ao software AnalySIS®, sendo a Figura 8 uma das imagens realizadas por este equipamento, pertencente ao Laboratório de Preparação Metalográfica da UTFPR/Ponta Grossa. Foi calculada a esfericidade de trinta esferas aleatórias.

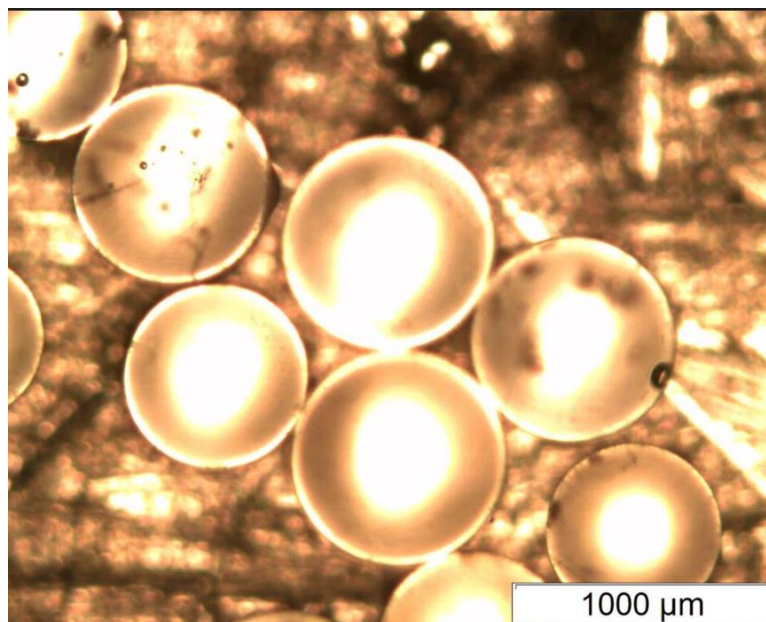


Figura 8 - Exemplo de imagens microscópicas das esferas de vidro utilizadas para o cálculo do método de Peçanha e Massarani (1986).

Fonte: Autoria própria

3.1.4 Determinação da densidade aparente

A densidade aparente do material particulado foi determinada por picnometria líquida. Esta é uma técnica que tem como princípio o deslocamento do líquido através da adição das partículas sólidas.

3.2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

No presente trabalho, os experimentos foram realizados em um secador de leite fluidizado de escala laboratorial (Figura 9), que encontra-se localizado no Laboratório de Sistemas Gás-Sólido, da UTFPR/PG.



Figura 9 - Desenho do secador de leito fluidizado.

Fonte: autoria própria

O sistema como um todo é melhor exemplificado a seguir pela Figura 10:

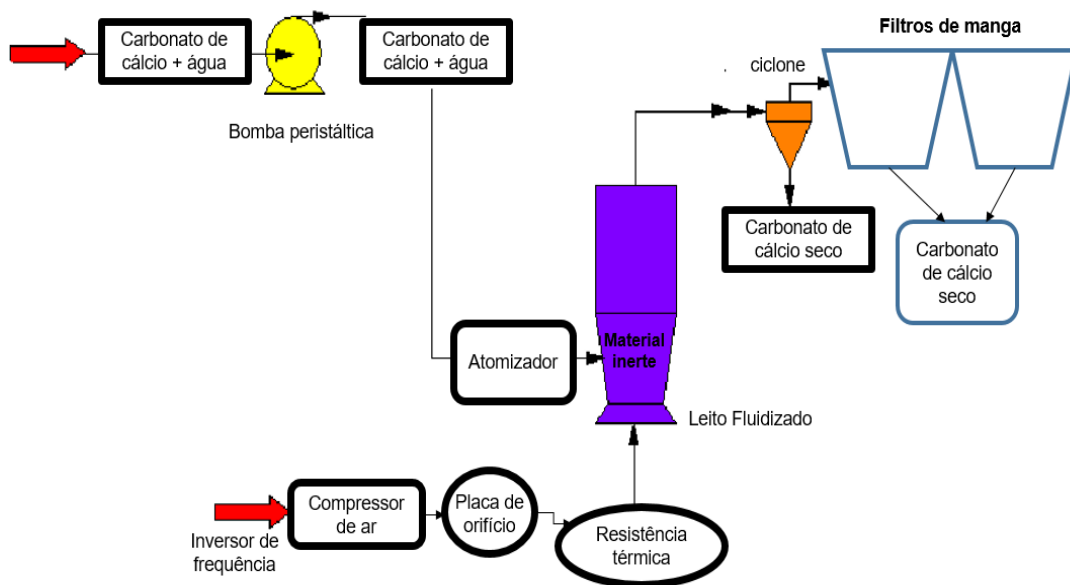


Figura 10 - Esquema do sistema utilizado

Fonte: Autoria própria

O sistema é composto por uma coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e 1,0 m de altura. O ar utilizado na fluidização das partículas foi fornecido por um soprador radial da marca Elan®, modelo CRE04, que se encontra acoplado a um motor de 4 cv. Este soprador está conectado ao leito através de uma tubulação de aço que possui 0,038 m de diâmetro interno. A rotação do motor do soprador foi regulada com auxílio de um inversor de frequência da marca WEG®, modelo CFW080160T2024POA1Z.

A vazão mássica do ar destinado ao leito de partículas é determinada mediante a uma placa de orifício (construída a partir da Norma NBR-ISO 5167-1, ABNT, 1994). Para isso, a pressão manométrica na linha e a queda de pressão através da placa de orifício foram obtidas através do uso de transdutores de pressão (Cole Parmer®, modelo 98073-14, de 0 a 12442 Pa, e do modelo 68071-14, de 0 a 6227 Pa, respectivamente). O aquecimento do ar fluidizante se deu através de resistências elétricas e um regulador tipo PID (NOVUS®, modelo N1100) que utilizou-se para controlar a temperatura do ar no *plenum* (Figura 11). Os sinais de pressão provenientes do *plenum* foram obtidos utilizando um transdutor diferencial de pressão (Cole Parmer®, modelo 68071-14, com faixa de 0 a 6227 Pa).

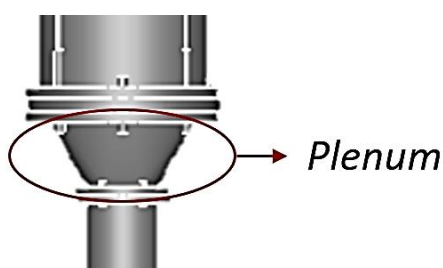


Figura 11 - Localização do Plenum no Leito Fluidizado

Fonte: A autoria própria

Todos os transdutores de pressão utilizados foram acoplados a um sistema de aquisição de dados (National Instruments™, modelo NI USB 6211). Foram utilizados dois termo-higrômetros, (marca: Novus®, modelos: RHT-XS e N322 RHT, respectivamente). Para realizar as medidas de temperatura na coluna de fluidização, utilizou-se termopares tipo T, conectados a indicadores de temperatura da marca Novus®. Os sinais de pressão do leito, umidade e temperatura eram visualizados e processados a partir de um microcomputador com *software* LabView™ versão 10.0. Foram coletados 2048 pontos de pressão no *plenum* a uma taxa de amostragem de

400 Hz. Um bico atomizador do tipo duplo fluido (Spraying Systems®, SU11-SS) atomizou a suspensão diluída provinda de uma bomba peristáltica (Vallair®, modelo SVP4H2B1SZAA). O compressor do tipo pistão (Schulz®, modelo 821410, 2 cv), forneceu o ar utilizado na atomização, o qual passou por um regulador de pressão (Fluir®, modelo AW200002U). Um ciclone *Swift* conectado a um filtro de mangas tipo jato pulsante (Multiman®) realizou a coleta de pó seco.

A Fotografia 1 ilustra o sistema experimental:



Fotografia 1 - Fotografia do sistema experimental. 1: coluna de fluidização; 2: bomba peristáltica; 3: transdutor de pressão; 4: ciclone; 5: filtro de mangas.

Fonte: Autoria própria

3.3 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS

A velocidade superficial do gás foi calculada a partir das seguintes equações (Norma ASME MFC-14M-2003):

$$\dot{m} = \frac{eCA_{orificio}\sqrt{2\rho\Delta P}}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (7)$$

Onde,

\dot{m} é a vazão mássica do ar [kg/s]

e é o fator de compressibilidade, dado por:

$$e = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta P}{KP_1} \quad (8)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (9)$$

Onde:

d : diâmetro do orifício da placa;

D : diâmetro da tubulação;

ΔP : queda de pressão na placa de orifício [Pa];

P_1 : Pressão absoluta a montante da placa de orifício [Pa]

$$K = \frac{2w}{\rho V_{tubo}^2} \quad (10)$$

e

$$w = \frac{\sqrt{1-\beta^4-C\beta^2}}{\sqrt{1-\beta^4+C\beta^2}} \Delta P \quad (11)$$

Onde C representa o coeficiente de descarga, que se dá através da seguinte equação:

$$C = \left[0,5991 + \frac{0,0044}{D} + \left(0,3155 + \frac{0,0175}{D} \right) \left(\left(\frac{d}{D} \right)^4 + 2 \left(\frac{d}{D} \right)^{16} \right) \right] \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4} + \left[\frac{0,52}{D} - 0,192 + \right. \\ \left. \left(16,48 - \frac{1,16}{D} \right) \left(\left(\frac{d}{D} \right)^4 + 4 \left(\frac{d}{D} \right)^{16} \right) \right] \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4}{Re_D}} \quad (12)$$

Logo, a velocidade superficial do gás é obtida por:

$$u_0 = \frac{\dot{m}}{\rho A_{leito}} \quad (13)$$

Sendo:

u_0 : Velocidade superficial do ar (m/s);

ρ : Densidade do ar no *plenum* (kg/m³)

A_{leito} = Área da secção transversal do leito (m²)

Onde:

$$A_{leito} = \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (14)$$

D_i : diâmetro interno do leito.

3.4 ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA

A análise espectral Gaussiana é uma metodologia desenvolvida por Parise (2007) com o objetivo de identificar o momento de transição do regime fluidodinâmico. Para a realização dessa metodologia, inicialmente coleta-se 2048 pontos de pressão manométrica do leito, sendo esta a pressão obtida no *plenum* a uma frequência de amostragem de 400 Hz.

Após esse procedimento, os sinais de pressão captados no leito são filtrados através de um filtro digital (IRR- resposta de impulso infinito - do tipo passa baixa, com topologia *Butterworth*, com frequência de corte de 20 Hz), e então será realizada a centralização na média (*mean centring*).

O cálculo da transformada discreta de Fourier é implementado a partir de um algoritmo especial conhecido como Transformada Rápida de Fourier (FFT), sendo este método mais eficiente. A partir deste algoritmo é possível calcular a transformada discreta de Fourier com $N \log_2 N$ multiplicações complexas, logo para isso é necessário que o número de pontos utilizados seja uma potência de 2, ou seja, $N=2^p$, onde p

deve ser um número inteiro (PARISE, 2007). Com a aplicação da Transformada de Fourier neste sinal centralizado, obtém-se um espectro de pressão.

Após esse procedimento, aplica-se o logaritmo natural na amplitude desse espectro e realiza-se um ajuste, utilizando o método dos mínimos quadrados, dado pela seguinte equação (Equação 15):

$$e_k = \sum_{k=0}^{N-1} \{\ln[A_e(f_k)] - \ln[G(f_k)]\}^2 \quad (15)$$

Sendo:

$A_e f_k$: esta é a amplitude espectral obtida, que é referente a Transformada de Fourier do sinal normalizado;

$G(f_k)$: representa a distribuição exponencial Gaussiana;

e_k : é o resíduo deixado pelo ajuste da curva.

Onde,

$$G(f_k) = A e^{-\frac{(f_k - f_m)^2}{2\sigma^2}} \quad (16)$$

Sendo:

f_k e f_m : referem-se ao valor da frequência do sinal e à frequência média da distribuição Gaussiana (frequência central), respectivamente;

σ : é o desvio padrão dessa distribuição (Hz);

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

$N = 2.048$

Pela equação 16, obter-se-á a frequência central (f_m) e o desvio padrão da distribuição (SD ou σ), que são os parâmetros utilizados para o estudo da defluidização do leito do presente trabalho.

3.5 ORGANIZAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Essa secção apresenta o planejamento e o procedimento seguidos para a realização de cada ensaio deste trabalho.

3.5.1 Organização Experimental

A organização experimental encontra-se no Quadro 2:

Ensaio	H/D	m_{ev} (kg)	C_{CaCO_3} (%)	Q_{susp} (mL/min)	u_o (m/s)	T_{ar} (°C)
1	1.00	1.47	15.0	6.0	0.23	90
2	1.40	1.96	15.0	6.0	0.25	90
3	1.00	1.47	15.0	6.0	0.23	100
4	1.40	1.96	15.0	6.0	0.25	100

Quadro 2 - Planejamento experimental e dados do ensaio

Fonte: Autoria própria

3.5.2 Procedimento Experimental

As etapas que foram necessárias para a obtenção dos resultados desses ensaios, são as seguintes:

- ✓ Inserção do material inerte na coluna de fluidização;
- ✓ Ativação do inversor de frequência,
- ✓ Acionamento do software, LabView™ versão 10.0, responsável pela geração dos dados do leito, para o regular o motor do soprador de ar;
- ✓ Início do ensaio;

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão mostrados os resultados referentes aos ensaios experimentais citados no Quadro 2.

Os resultados apresentados neste trabalho são em termos de:

- Perfis de frequência central (f_m) e desvio padrão espectral de pressão (SD) obtidos através da análise de flutuação de pressão no leito, com o intuito de verificar a qualidade da fluidização;
- Perfis de temperatura bulbo úmido e temperatura do leito.

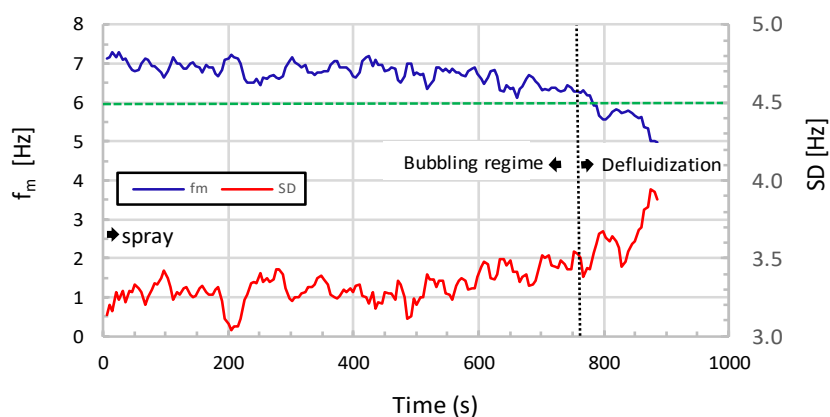
4.1 Análise de flutuação de pressão no leito

Como mencionado anteriormente, sinais de pressão no leito foram utilizados para identificar as alterações fluidodinâmica durante o processo de secagem de suspensão aquosa de carbonato de cálcio. Para esse objetivo, empregou-se a técnica de análise espectral Gaussiana, onde a frequência central (f_m) e o desvio padrão da distribuição (SD) foram os parâmetros utilizados. É importante mencionar que todos os experimentos foram iniciados em regime borbulhante e finalizados assim que se atingia o leito fixo. A seguir serão mostrados os resultados obtidos através desses dois parâmetros.

As Figuras 12 e 13 ilustram os perfis da frequência central (f_m) e do desvio padrão da distribuição (SD) *versus* tempo de secagem para temperatura do ar de secagem (T-1) de 90°C e 100°C, respectivamente. Para ambas as figuras, a transição entre o regime de leito fluidizado borbulhante e a defluidização pode ser identificada quando o valor da frequência central decresce significativamente, caracterizando por valores inferiores a 6 Hz, os quais estão em concordância com os resultados obtidos por PARISE et al (2011), sendo que estes realizaram experimentos de recobrimento de partículas em leito fluidizado. De maneira geral, o valor da frequência central está diretamente relacionado à atividade das bolhas de ar no leito, as quais são drasticamente reduzidas durante a defluidização, pois esta gera a paralização do leito e o sistema retorna ao leito fixo, onde não ocorre mais a movimentação de partículas. Por esse motivo, os valores da frequência central para essa condição de fluidização são significativamente menores que para o regime borbulhante.

A Figura 12 (a) e (b) ilustra que o regime borbulhante foi mantido durante aproximadamente 760 s do processo de secagem de suspensão, com valores de f_m superiores à 6 Hz. Após esse tempo, os valores da frequência central reduzem significativamente, indicando que a presença da defluidização. Esse comportamento é consistente com as observações visuais durante o processo de secagem, os quais mostraram redução do movimento do leito e das atividades das bolhas, e o comportamento fluidodinâmico era similar à condição de mínima fluidização. O leito estava tornando-se cada vez mais úmido com a contínua aspersão de suspensão sobre as partículas, pois a mistura entre as fases não era suficiente para manter a secagem em condições adequadas, conseqüentemente, reduzindo drasticamente a qualidade da fluidização.

a



b

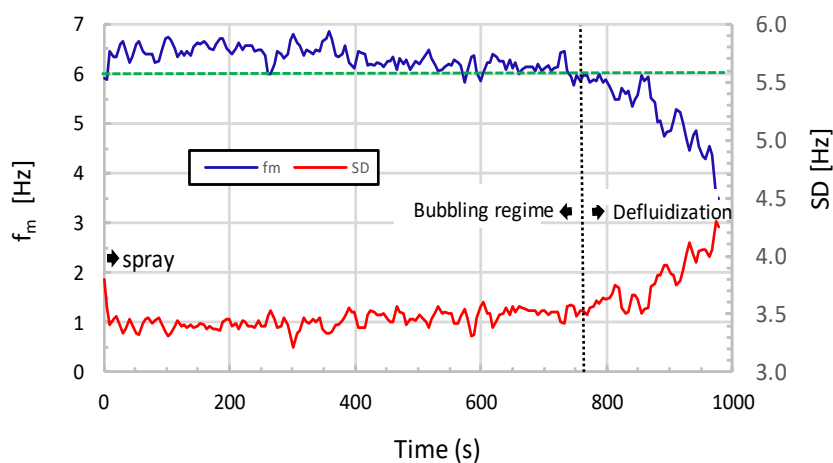


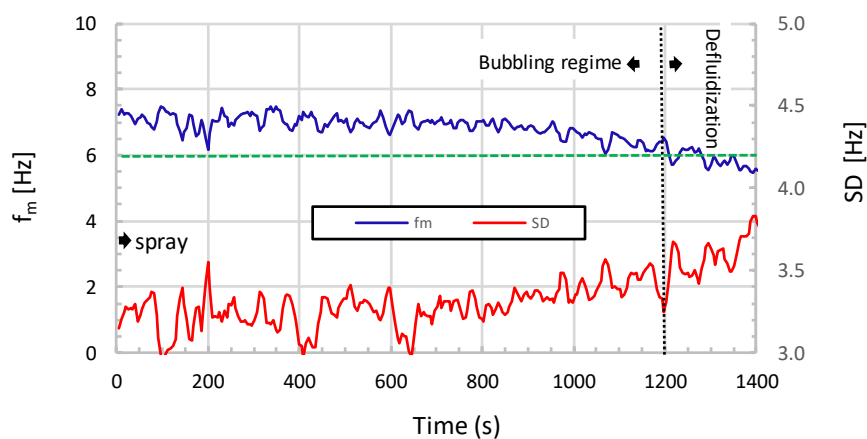
Figura 12 - Perfil da frequência central (f_m) e do desvio padrão da distribuição (SD) durante o processo de secagem. $T_{ar} = 90$ °C. (a) $H_b/D = 1.0$, (b) $H_b/D = 1.4$.

A Figura 13 mostra que usando temperatura de ar de secagem de 100° C, o regime borbulhante é mantido estável por aproximadamente 1200 s. Como esperado, o tempo de secagem foi maior que para o caso da Figura 13 (a) e (b), pois neste caso há um aumento a temperatura do ar, sendo assim a taxa de secagem é incrementada, resultando na permanência de condições estáveis de fluidização por um tempo maior.

As Figuras 12 e 13 apresentam também a evolução do desvio padrão da distribuição (SD) *versus* tempo de secagem. Para todos os casos, o parâmetro SD aumenta com o surgimento da defluidização. De maneira geral, o desvio padrão da distribuição indica o quanto o espectro de pressão se distancia em relação à uma função exponencial Gaussiana. Para a condição de defluidização (fluidização instável), a forma do espectro de pressão tende a um maior distanciamento da forma da função exponencial Gaussiana, por esse motivo, o valor de SD é superior em relação ao regime borbulhante (fluidização estável).

Em geral, pode-se observar nas Figuras 12 e 13 que com o incremento da relação altura do leito e diâmetro da coluna, não há alterações significativas nos valores da frequência central e do desvio padrão da distribuição.

a



b

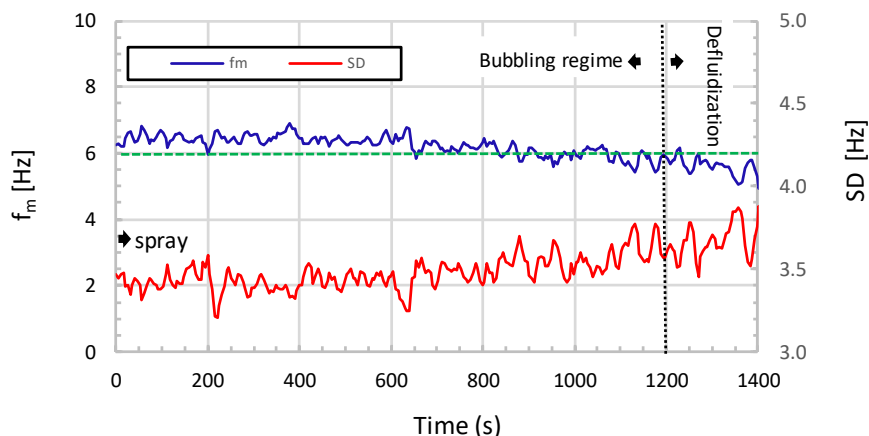


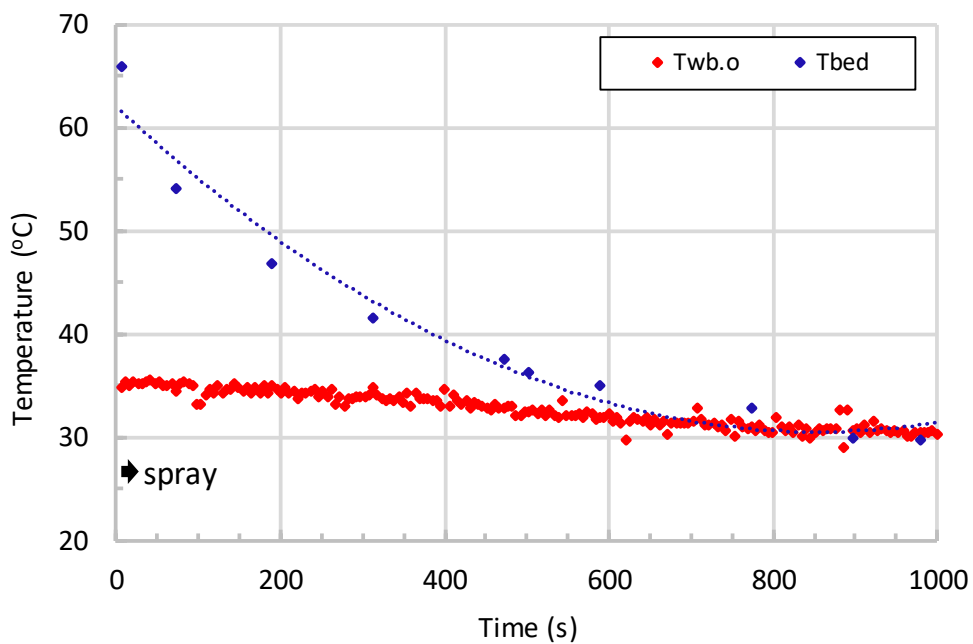
Figura 13 - Perfil da frequência central (f_m) e do desvio padrão da distribuição (SD) durante o processo de secagem.

$T_{ar} = 100 \text{ °C}$. (a) $H_b/D = 1.0$, (b) $H_b/D = 1.4$.

4.2 Perfis da temperatura de bulbo úmido e temperatura do leito

As Figuras 14 e 15 apresentam os perfis da temperatura de bulbo úmido do ar na saída da coluna de fluidização e da temperatura do leito para temperatura de secagem de 90 °C e 100 °C , respectivamente. Para todos os casos, pode-se observar um decréscimo significativo do perfil da temperatura do leito devido à elevada quantidade de umidade no leito. Adicionalmente, pode ser visualizado que há um momento em que a temperatura do leito é aproximadamente similar à temperatura de bulbo úmido. Este comportamento indica que o leito estava praticamente saturado, conseqüentemente, a qualidade da fluidização estava reduzida e o processo de secagem estava comprometido

a



b

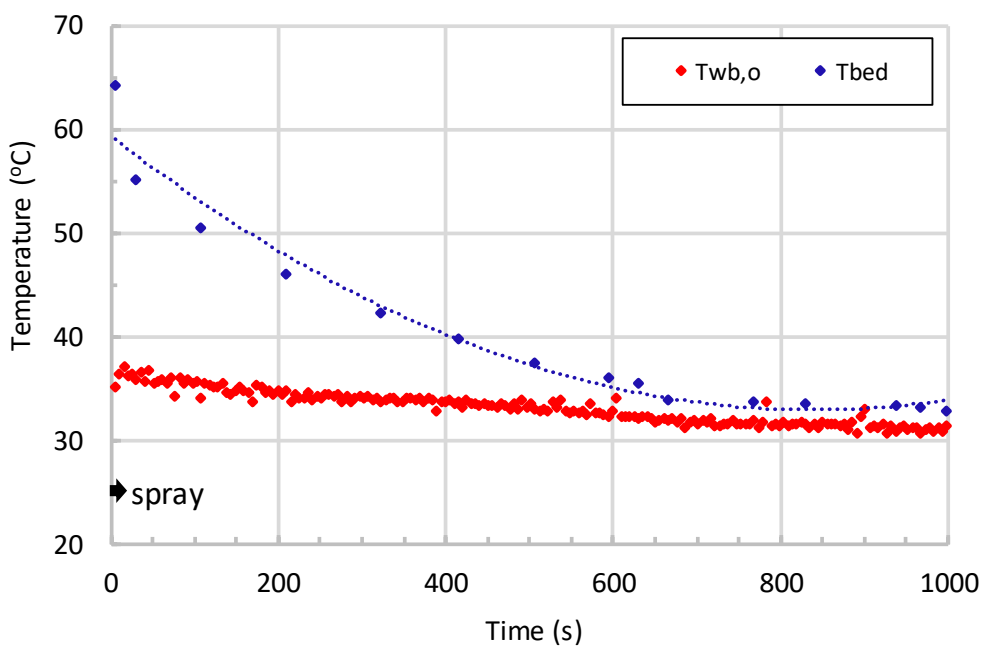


Figura 14 - Perfil de temperatura de bulbo úmido na saída da coluna e temperatura do leito durante a secagem.

$T_{ar}=90$ °C. (a) $H_b/D = 1.0$, (b) $H_b/D= 1.4$.

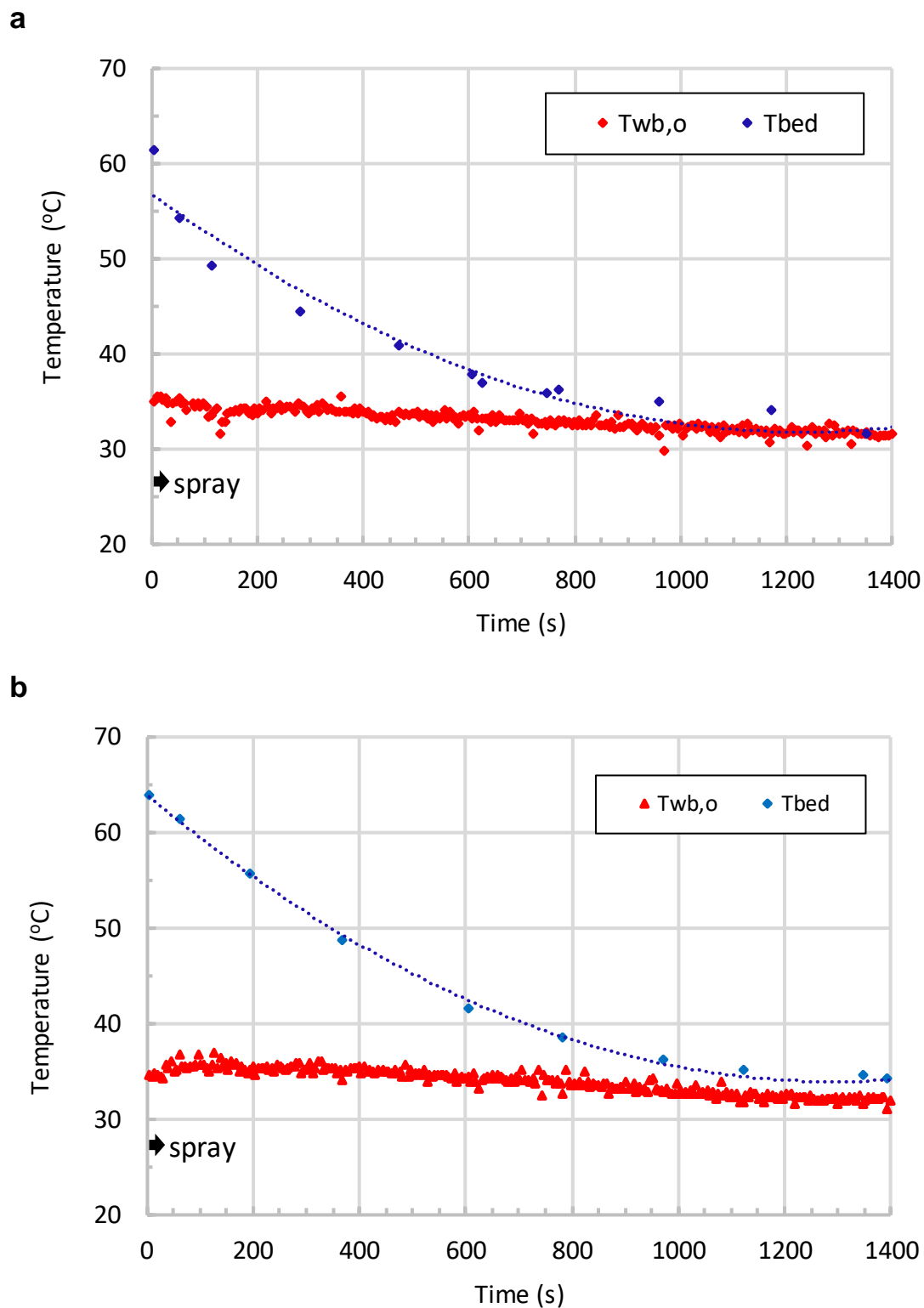


Figura 15 - Perfil de temperatura de bulbo úmido na saída da coluna e temperatura do leito durante a secagem.

$T_{ar} = 100\text{ °C}$. (a) $H_b/D = 1.0$, (b) $H_b/D = 1.4$.

5. CONCLUSÃO

Através dos resultados, pode-se concluir que:

- O momento de transição entre o regime de leito fluidizado borbulhante e a defluidização pode ser identificado quando o valor da frequência central decresce significativamente. Sendo que de maneira geral, o valor da frequência central encontra-se diretamente relacionado a atividade de bolhas de ar no leito, as quais são reduzidas de forma drástica durante o processo de defluidização;
- Com o incremento da relação altura do leito e diâmetro da coluna, não há alterações significativas nos valores da frequência central e do desvio padrão da distribuição.
- Para as temperaturas de ar de secagem utilizadas, verificou-se que há um momento em que a temperatura do leito é similar à temperatura de bulbo úmido, indicando que o leito estava praticamente saturado, comprometendo a mistura entre as fases, e conseqüentemente o processo de secagem.

REFERÊNCIAS

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

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

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

FOUST, Alan S. et al. **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1982. 670 p.

JOHNSSON, F., ZIJERVELD, R.C., SCHOUTEN, J.C., van der BEEK, C.M., LECKNER, B. F. **Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations**. International Journal of Multiphase Flow, v. 26, p. 663-715, 2000.

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

NITZ, Marcello; GUARDANI, Roberto. **Fluidização Gás-Sólido – Fundamentos e Avanços**. Revista Brasileira de Engenharia Química, São Paulo, dez. 2008. 13p. Disponível em: <<http://maua.br/files/artigos/artigo-fluidizacao-gas-solido-prof-nitz.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2017.

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

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, Carlos A. M. et al. **Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution.** Campinas: Elsevier, 2011. Powder technology, v. 212, p. 445-458, 2011.

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

TERRON, Luiz Roberto. **Operações Unitárias para Químicos Farmacêuticos e Engenheiros: Fundamentos e Operações Unitárias do Escoamento de Fluidos.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, p. 589, 2012.

van der SCHAFF, J. SCHOUTEN, J.C., JOHNSON, F., van der BLEEK, C.M. **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.