

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

FLAVIA TRAMONTIN SILVEIRA SCHAFFKA

**INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DE ORIFÍCIO DA PLACA
DISTRIBUIDORA NA REGIÃO DE DEFLUIDIZAÇÃO EM LEITO
FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO UTILIZANDO ANÁLISE ESPECTRAL
GAUSSIANA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

PONTA GROSSA

2014

FLAVIA TRAMONTIN SILVEIRA SCHAFFKA

**INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DE ORIFÍCIO DA PLACA
DISTRIBUIDORA NA REGIÃO DE DEFLUIDIZAÇÃO EM LEITO
FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO UTILIZANDO ANÁLISE ESPECTRAL
GAUSSIANA**

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

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

PONTA GROSSA

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria
Nome da Coordenação
Nome do Curso



TERMO DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO ORIFÍCIO DA PLACA DISTRIBUIDORA NA REGIÃO DE DEFLUIDIZAÇÃO EM LEITO FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO UTILIZANDO ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA

por

FLAVIA TRAMONTIN SILVEIRA SCHAFFKA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 25 de novembro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Maria Regina Parise
Prof^a. Dr^a Orientadora

Prof. Dr^o Jhon Jairo Ramirez Behaine
Membro titular

Prof. Dr^a Erica Roberta Lovo da Rocha Watanabe
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

Dedico este trabalho à minha família e
amigos sem os quais esta conquista não
seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus**, por ter me dado forças em todas as horas que pensei em desistir, em me dar esta oportunidade de concluir o curso, pois sem ele nada seria possível.

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

À minha mãe **Roselia de Lourdes Ribeiro**, pelo companheirismo, dedicação e apoio que ela sempre deu a 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 em todos os momentos de dificuldades.

À minha orientadora Professora Doutora **Maria Regina Parise**, pela amizade e pelos seus ensinamentos, apoio e dedicação que teve comigo durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Doutor **Jhon Jairo Ramirez Behaine**, por ter emprestado alguns materiais na utilização do presente trabalho.

À minha amiga **Lariana Negrão Beraldo de Almeida** por ter me proporcionado a sua amizade e companheirismo durante a universidade.

Ao meu colega **Lucas Daldin** por ter me ajudado com alguns experimentos.

À **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.

A todos os **colegas de curso**, pelos tempos de convivência pautada pelo companheirismo e pela amizade demonstrada.

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. **Influência do diâmetro de orifício da placa distribuidora na região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido utilizando Análise Espectral Gaussiana.** Defesa realizada em 2014. 110. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

O fenômeno de defluidização pode ocorrer quando a velocidade superficial do ar está muito próxima à velocidade de mínima fluidização, podendo ocasionar o colapso no leito e a interrupção do processo. Uma maneira efetiva de identificar as alterações fluidodinâmicas provocadas pela defluidização é mediante o registro em tempo real das flutuações de pressão estática no interior do leito. Visando contribuir no desenvolvimento destas técnicas, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência do diâmetro de orifício da placa distribuidora na região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido utilizando a análise Espectral Gaussiana. Os ensaios experimentais foram realizados em uma coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e 1 m de altura, utilizando duas placas distribuidoras de ar do tipo perfuradas, com 1,2 e 1,5 mm de diâmetro de orifício e 4,25 e 5,30 mm de espaçamento, respectivamente. Foram utilizadas partículas de celulose microcristalinas com diâmetro médio de 0,165 mm e 0,275 mm, areia com diâmetro médio de 0,180 mm e 0,256 mm e esferas de vidro com diâmetro médio de 1,55 mm e 2,18 mm como partículas sólidas. Nos experimentos realizados alterou-se a altura de leito fixo, o diâmetro médio das partículas e o distribuidor de ar. O equipamento experimental 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 microcomputador e pelo *software* LabView 10.0™. A partir dos resultados obtidos verificou-se que há influência do diâmetro de orifício da placa distribuidora na região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido utilizando a técnica empregada.

Palavras-chave: Leito Fluidizado Gás-Sólido. Defluidização. Medidas de Flutuação de Pressão. Placa Distribuidora de Ar.

ABSTRACT

SCHAFFKA, Flavia Tramontin Silveira. **Influence of orifice diameter of the distributor plate in the region of defluidization in gas-solid fluidized bed using Gaussian Spectral Analysis.** Defesa realizada em 2014. 110. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2014.

The defluidization phenomenon can occur when the superficial air velocity is very close to the minimum fluidization velocity and may cause a collapse in the bed and interrupting the process. An effective way to identify changes caused by fluid dynamic defluidization is through the record online of the static pressure fluctuations in the bed. To contribute in the development of these techniques, this study aims to analyze the influence of the diameter of the orifice plate distributor in the region of defluidization in gas-solid fluidized bed using the Gaussian Spectral analysis. The assays were performed in an acrylic column of 0.11 m internal diameter and 1 m in height using two plates of the perforated air distribution type with 1.2 and 1.5 mm hole diameter and 4.25 and 5.30 mm spacing, respectively. Microcrystallines cellulose particles with an average diameter of 0.165 mm and 0.275 mm, sand with an average diameter of 0.180 mm and 0.256 mm and glass spheres with average diameter of 1.55 mm and 2.18 mm were used as solid particles. In the experiments were changed the height of the fixed bed, the average particle diameter and the air distributor. The experimental apparatus was instrumented with pressure transducers of rapid response, coupled to a signal acquisition and signal processing, consisting of a data acquisition card, and a microcomputer with the 10.0™ LabView software. From the results obtained it was found that there is influence of the orifice diameter of the distributor plate in the region of defluidization in gas-solid fluidized bed using the technique.

Keywords: Gas-Solid Fluidized Bed. Defluidization Measurements of Pressure Fluctuation. Air Distributor Plate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Regime de Fluidização – Leito Fixo.	21
Figura 2 – Mínima Fluidização	22
Figura 3 – Leito Fluidizado Particulado.	23
Figura 4 – Fluidização Borbulhante.....	24
Figura 5 – <i>Slugging</i> ou <i>slugs</i> axiais.....	24
Figura 6 – <i>Slug</i> Completo.....	25
Figura 7 – Leito Fluidizado Turbulento.....	26
Figura 8 – Transporte Pneumático.	27
Figura 9 – Regimes de Fluidização.	28
Figura 10 – Curva típica de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás.	30
Figura 11 – Classificação de Geldart (1973) de partículas com ar e em condições ambientais.....	32
Figura 12 – Tipos de placas distribuidoras de ar (a) placa perfurada; (b) placa porosa; (c) <i>tuyé</i> re tipo direcional (“directional nozzle”); (d) <i>tuyé</i> re tipo “simple nozzle”, bocal ou flauta; (e) placa perfurada côncava; (f) placa com grelhas; (g) <i>tuyé</i> re tipo “bubble cap” e (h) <i>tuyé</i> re tipo “slit nozzle”.	35
Figura 13 – Tipos de arranjo triangular e quadrado.	35
Figura 14 – Espectro de potência da CMC.	41
Figura 15 - Espectro de potência da CMC.	41
Figura 16 - Espectro de potência da CMC.	41
Figura 17 – Evolução da frequência central e da curva fluidodinâmica.....	46
Figura 20 – Sinal de pressão manométrica no <i>plenum</i>	57
Figura 21 – Pressão normalizada no domínio do tempo.	58
Figura 22 – Transformada de Fourier do sinal de pressão normalizada (espectro de pressão).	59
Figura 23 – Logaritmo natural da amplitude da transformada de Fourier com função de ajuste utilizando o <i>software</i> LabView 10.0 TM	64
Figura 24 – Especificações do filtro digital de resposta infinita ao impulso (IIR).	65
Figura 23 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de CMC com $d_p=0,165$ mm, $h_l=0,1$ m.....	74
Figura 24 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de CMC com $d_p=0,165$ mm, $h_l=0,2$ m.....	77
Figura 25 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de CMC com $d_p=0,275$ mm, $h_l=0,1$ m.....	79
Figura 26 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de CMC com $d_p=0,275$ mm, $h_l=0,2$ m.....	81
Figura 27 – Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Areia com $d_p=0,18$ mm, $h_l=0,1$ m	84
Figura 28 – Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Areia com $d_p=0,18$ mm, $h_l=0,2$ m	87

Figura 29 – Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Areia com $d_p=0,256$ mm, $h_l=0,1$ m	89
Figura 30 – Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Areia com $d_p=0,256$ mm, $h_l=0,2$ m	91
Figura 31 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Esferas de Vidro com $d_p=1,55$ mm, placa distribuidora de ar = 1,2 x 4,25 mm	96
Figura 32 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Esferas de Vidro com $d_p=2,18$ mm, placa distribuidora de ar = 1,2 x 4,25 mm	98
Fotografia 1 – Partículas utilizadas nos ensaios experimentais.	48
Fotografia 2 – Equipamento experimental.....	50
Fotografia 3 – Ciclone do tipo <i>Swift</i>	51
Fotografia 4 – Placas distribuidoras de ar.	52
Fotografia 5 – Placas de orifícios.	54
Quadro 1 – Vantagens e Desvantagens na Utilização de Leitos Fluidizados.	29
Quadro 2 – Características físicas dos materiais.	49
Quadro 3 – Placa distribuidora de ar.	52
Quadro 4 – Comparação da área livre e ocupada pelos orifícios de cada placa distribuidora de ar.....	53
Quadro 5 – Diâmetros dos orifícios.	54
Quadro 6 – Planejamento experimental.	67
Quadro 7 – Características dos experimentos.	72
Quadro 8 – Comparação resumida da placa que obteve o melhor desempenho na identificação da região de defluidização.....	93
Quadro 9 – Comparação da velocidade de mínima fluidização experimental com a velocidade de mínima fluidização da literatura.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos distribuidores.....	44
----------------------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, LETRAS GREGAS E SUBSCRITOS

LISTA DE ABREVIATURAS

A_e	Amplitude espectral medida	[Pa]
A_{leito}	Área da seção transversal do leito	[m ²]
$A_{orifício}$	Área do orifício	[m ²]
C	Coeficiente de descarga	[-]
D	Diâmetro interno do leito	[m]
d_p	Diâmetro médio da partícula	[m]
e	Fator de compressibilidade	[-]
e_k	Resíduo do ajuste da curva	[-]
f_k	Frequência do sinal	[Hz]
f_m	Frequência central	[Hz]
g	Gravidade	[m/s]
$G(f_k)$	Curva de distribuição normal	[-]
H	Altura de leito fixo	[m]
L	Altura da coluna	[m]
N	Número de pontos de pressão	[-]
P_1	Pressão absoluta a montante da placa de orifício	[Pa]
$P_{N,k}$	Pressão do leito normalizada	[Pa]
P	Pressão do leito	[Pa]
m_s	Massa de sólidos no leito	[kg]
\dot{m}	Vazão mássica do ar	[kg/s]
Re_d	Número de Reynolds	[-]
u_c	Velocidade do início da transição de fluidização borbulhante para a turbulenta	[m/s]
u_k	Velocidade do início da fluidização turbulenta	[m/s]
u	Velocidade	[m/s]

LISTA DE SIGLAS

FCC	<i>Fluid Catalytic Cracking</i>
FFT	Transformada Rápida de Fourier

LETRAS GREGAS

β	Relação entre o diâmetro do orifício da placa e diâmetro da tubulação	[-]
ΔP	Queda de pressão do leito	[Pa]
ϵ_m	Porosidade do leito	[-]
ϵ_{mf}	Porosidade de mínima fluidização	[-]
Φ	Esfericidade da partícula	[-]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[kg/m.s]
μ_x	Média dos 2.048 pontos de pressão	[Pa]
σ_p	Desvio padrão da flutuação de pressão	[Pa]
σ	Desvio padrão da distribuição espectral	[Hz]
ρ	Densidade	[kg/m ³]

SUBSCRITOS

m	Relativo à mínima
máx	Relativo à máxima
mb	Relativo mínimo borbulhamento
mf	Relativo à condição de mínima fluidização
p	Relativo à partícula
o	Relativo à superficial do gás

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	17
1.2 HIPÓTESE.....	17
1.3 OBJETIVO GERAL	18
1.3.1 Objetivos específicos	18
1.4 JUSTIFICATIVA.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1 LEITO FLUIDIZADO	20
2.1.1 Regimes de Fluidização.....	20
2.1.2 Vantagens e Desvantagens na Utilização de Leitos Fluidizados.....	29
2.2 CURVA FLUIDODINÂMICA E VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO	30
2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	32
2.4 PLACA DISTRIBUIDORA DE AR	33
2.5 MEDIDA DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO EM LEITO FLUIDIZADO	36
2.6 PUBLICAÇÕES REFERENTES AO TEMA	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS E SUAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	47
3.2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL	50
3.2.1 Placa distribuidora de ar	52
3.2.2 Medidor de fluxo de ar: Placa de orifício.....	53
3.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA	57
3.3.1.1 Distribuição normal (curva Gaussiana)	59
3.3.1.2 Ajuste da curva exponencial Gaussiana no espectro de pressão	60
3.3.2 Especificação do filtro digital.....	65
3.4 PLANEJAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	65
3.4.1 Planejamento Experimental	66
3.4.2 Procedimento Experimental.....	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1 INFLUÊNCIA DA PLACA DISTRIBUIDORA DE AR NA REGIÃO DE DEFLUIDIZAÇÃO.....	73
4.1.1 Experimento 1	73
4.1.2 Experimento 2.....	76
4.1.3 Experimento 3.....	78
4.1.4 Experimento 4.....	81
4.1.5 Experimento 5.....	83
4.1.6 Experimento 6.....	86
4.1.7 Experimento 7.....	88
4.1.8 Experimento 8.....	90

4.2 COMPARAÇÃO RESUMIDA DOS RESULTADOS	93
4.3 INFLUÊNCIA NA ALTURA DO LEITO FIXO COM PARTÍCULAS DE ESFERA DE VIDRO	95
4.3.1 Experimento 9.....	95
4.3.2 Experimento 10.....	97
4.4 COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO EXPERIMENTAL COM A LITERATURA.....	99
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
5.1 CONCLUSÃO	102
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
REFERÊNCIAS.....	105

1 INTRODUÇÃO

A fluidização é uma operação na qual partículas sólidas entram em contato com um gás ou líquido, adquirindo propriedades de um fluido (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). A alta eficiência da mistura sólido-gás ou sólido-líquido garante um processo com altas taxas de transferência de calor e de massa (FELIPE, 2004).

Nas suas diversas configurações de leito, como borbulhantes ou circulantes, os sistemas fluidizados podem ser aplicados em processos químicos, como por exemplo, tipo de síntese e reações catalíticas, fermentações, combustão e gaseificação de carvão, regeneração catalítica, ativação de diferentes compostos, craqueamento de petróleo através do *Fluid Catalytic Cracking* – Craqueamento Catalítico do Fluido (FCC) (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

A fluidização pode ser empregada também em processos físicos, nos quais as boas características de transferência de calor e de massa são explorados, dando ênfase em: adsorção, processo de aglomeração e granulação de partículas, aquecimento e resfriamento de sólidos ou fluidos, filtração, processo de recobrimento de partículas e em secagem de diversos materiais (FELIPE, 2004).

Todas estas operações requerem condições adequadas da mistura gás-sólido. No entanto, às vezes não é possível adquiri-la, como no caso do processo de recobrimento de partículas, onde a adição da suspensão de recobrimento no sólido pode favorecer à sua aglomeração e, conseqüentemente, levar à defluidização (PARISE, 2007).

A defluidização é um fenômeno indesejável, que pode ocorrer parcialmente ou totalmente, quando a velocidade superficial do gás esta muito próxima da velocidade de mínima fluidização (PARISE, 2007).

Assim, se for possível alterar a fluidodinâmica do leito fluidizado e conseguir detectar antes de ocorrer a defluidização, tal fenômeno pode ser evitado pelo aumento da velocidade do gás e/ou, em alguns casos, através da alteração da vazão de sólidos alimentados no sistema (PARISE, 2007).

Portanto, identificando-se a região onde o leito está tendendo à defluidização, consegue-se atuar no processo no momento apropriado, e fazer com que a fluidização volte à condição apropriada.

Para detectar a região de defluidização pode ser utilizada a análise da flutuação de pressão no interior do leito. Esta técnica provém da possibilidade de fornecer informações importantes da dinâmica do leito, por não ser intrusiva, ser aplicável em uma ampla faixa de condições experimentais e ser economicamente viável (van der SCHAFF et. al., 2002).

Pela técnica citada acima, as flutuações de pressão são fáceis de serem obtidas, requerendo somente um transdutor de pressão conectado ao ponto de medida no leito através de um tubo pequeno (BROWN e BRUE, 2001).

Conforme Schouten e Van den Bleek (1998), 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 ou Fourier e pela análise estatística, através do domínio do tempo.

Assim, dando continuidade ao trabalho desenvolvido por Parise et. al. (2013), será aplicada a metodologia da análise espectral Gaussiana em leito fluidizado gás-sólido alterando-se o diâmetro de orifício da placa distribuidora, o tipo de sólido particulado, altura do leito fixo e diâmetro médio das partículas, a fim de detectar a região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Qual a influência do diâmetro de orifício da placa distribuidora de ar na região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido utilizando Análise Espectral Gaussiana?

1.2 HIPÓTESE

Há influência do diâmetro de orifício da placa distribuidora de ar na região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido utilizando Análise Espectral Gaussiana, que é baseada em medidas de flutuação de pressão do leito.

1.3 OBJETIVO GERAL

Esse trabalho tem como objetivo geral analisar a influência do diâmetro de orifício da placa distribuidora na região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido a partir da metodologia de análise espectral Gaussiana, que é uma técnica baseada em medidas de flutuação de pressão no leito.

1.3.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Selecionar as placas distribuidoras de ar do tipo perfuradas a serem utilizadas;
- Caracterizar o material particulado a ser utilizado no leito;
- Realizar testes preliminares para definir as melhores condições operacionais dos ensaios definitivos;
- Executar ensaios experimentais definitivos para identificação da região de defluidização utilizando a técnica de Análise Espectral Gaussiana com diferentes diâmetros de orifícios de placas distribuidoras de ar.

1.4 JUSTIFICATIVA

Para garantir o alto desempenho de processos que utilizam leito fluidizado gás-sólido é fundamental manter o regime de fluidização em condições estáveis, principalmente em processos onde há adição de líquidos no interior do leito, o que pode favorecer aglomeração e conseqüentemente a defluidização parcial ou total do leito. Este fenômeno pode ser evitado com o aumento da velocidade do ar e/ou através da alteração da descarga de sólidos. Uma maneira de detectar o instante inicial da defluidização é através da análise espectral Gaussiana. Nesse sentido, a identificação da região de defluidização visa reduzir a necessidade de interrupção de processos que utilizam leito fluidizado gás-sólido. Por outro lado, embora haja na literatura trabalhos que abordam a influência da placa distribuidora de ar na

qualidade da fluidização gás-sólido, não foi encontrado nenhum que estuda a influência do diâmetro de orifício da placa distribuidora de ar na identificação da região da defluidização utilizando a técnica análise espectral Gaussiana

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico são descritos os fundamentos de leito fluidizado, os regime de fluidização, as vantagens e desvantagens na utilização de leitos fluidizados, a obtenção da curva fluidodinâmica e da velocidade de mínima fluidização, a classificação das partículas sólidas, as características do distribuidor de ar, e as medidas de flutuação de pressão em leito fluidizado. Posteriormente, serão apresentados trabalhos publicados na literatura que apresentam e envolvem medidas de flutuação de pressão no leito fluidizado gás-sólido.

2.1 LEITO FLUIDIZADO

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. Isso ocorre devido à intensa mistura sólido-fluido (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

2.1.1 Regimes de Fluidização

Os diversos tipos de contato entre fases, denominado de regimes fluidodinâmicos, são caracterizados pelo estado de fluidização do leito, em que possuem características próprias, como: expansão do leito, formação de bolhas e de *slugs*, porosidade do leito, arraste de partículas, entre outras; e dependem de fatores, tais como: velocidade do fluido, características físicas do sólido como densidade aparente e diâmetro médio das partículas, e a geometria do leito (FELIPE, 2004).

Quando o fluido passa de forma ascendente através de um leito com partículas finas, conforme mostrado na Figura 1 a uma baixa vazão, o fluido apenas percola pelos espaços entre as partículas estacionadas. Nestas condições, o leito é denominado leito fixo (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

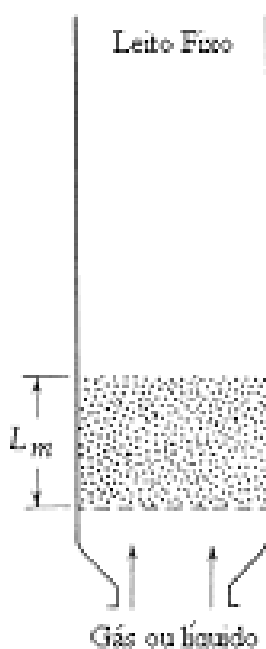


Figura 1 – Regime de Fluidização – Leito Fixo.
Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

Conforme há um aumento na vazão do fluido, ocorre expansão do leito com aparição de pequenas vibrações e movimentações em regiões restritas (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Com uma vazão maior ainda, 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, o leito está em condições de fluidização, sendo conhecido como leito fluidizado incipiente ou leito na mínima fluidização (Figura 2) (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

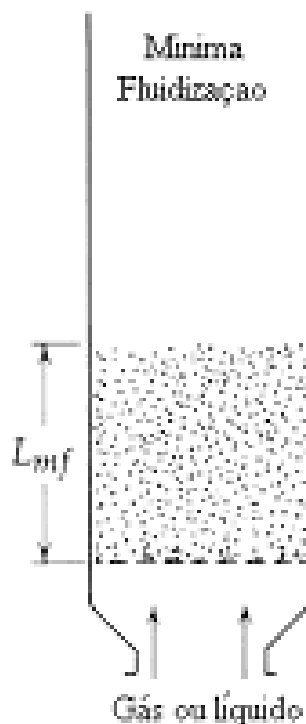


Figura 2 – Mínima Fluidização
Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

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 (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

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 denominada de leito fluidizado homogêneo, ou suave, ou leito fluidizado particulado, conforme mostra a Figura 3 (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

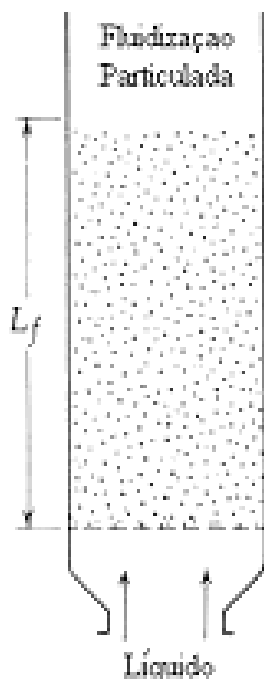


Figura 3 – Leito Fluidizado Particulado.
Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

Normalmente, as configurações de sistemas do tipo gás-sólido comportam-se diferentemente. Com um aumento da vazão acima da mínima fluidização, nota-se uma grande instabilidade do leito, com formação de bolhas e canais preferenciais de gás. Vazões ainda maiores provocam agitações mais violentas e o movimento dos sólidos torna-se mais vigoroso (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Pode-se observar também que o leito não expande muito, mantendo o seu volume próximo ao volume na condição de mínima fluidização. Este tipo de configuração dá-se o nome de leito fluidizado agregativo, leito fluidizado heterogêneo ou leito fluidizado borbulhante (Figura 4) (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

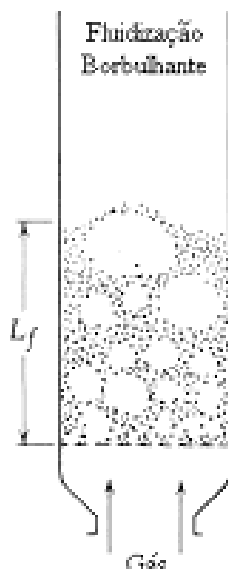


Figura 4 – Fluidização Borbulhante.
Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

Conforme explica Kunii e Levenspiel (1991) em sistemas gás-sólido, bolhas de gás coalescem e aumentam conforme ascensão no leito. Em um leito de 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, como mostra a Figura 5.



Figura 5 – *Slugging* ou *slugs* axiais.
Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

Com partículas grandes, a porção do leito acima das bolhas é empurrada para cima, como um pistão; partículas "chovem" para o *slug* de baixo, 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 6) (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).



Figura 6 – Slug Completo.
Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

De acordo com Kunii e Levenspiel (1991), quando há fluidização a partir de partículas a uma vazão de gás suficientemente alta, a velocidade terminal dos sólidos é excedida, a superfície superior do leito desaparece, suspensões de partículas tornam-se mais firmes e a formação de bolhas passa a se apresentar instável, onde se observa um movimento turbulento de agrupamentos de sólidos e vazios de gás de vários tamanhos e formas. Esta configuração é denominada de leito fluidizado turbulento, conforme mostrado na Figura 7.



Figura 7 – Leito Fluidizado Turbulento.
Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

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 mostrado na Figura 8 (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).



Figura 8 – Transporte Pneumático.
Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

Kunii e Levenspiel (1991) explicam que na configuração de fluidização turbulenta ou do tipo de fase leve, grandes quantidades de partículas são elutriadas, impedindo operações em estado estacionário. Para operações em estado estacionário neste modo de contato, as partículas elutriadas tendem a ser coletadas em ciclones e retornadas ao leito.

Em configurações do tipo leito fluidizado turbulento, ciclones pequenos podem ser ajustados com taxa moderada de arraste, sendo conhecido como leito fluido. Em contrapartida, a taxa de arraste é muito grande em leitos fluidizados de fase leve, que usualmente necessitam de grandes ciclones coletores na saída do leito. Esta configuração de leito é conhecida como leito fluidizado rápido (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Para a boa operação de leitos fluidos e fluidizados rápidos, a recirculação dos sólidos constante e uniforme, através de dispositivos de coleta dos sólidos, é crucial. Assim estes leitos são chamados de leitos fluidizados circulantes (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

A Figura 9 ilustra a comparação dos diferentes regimes de fluidização.

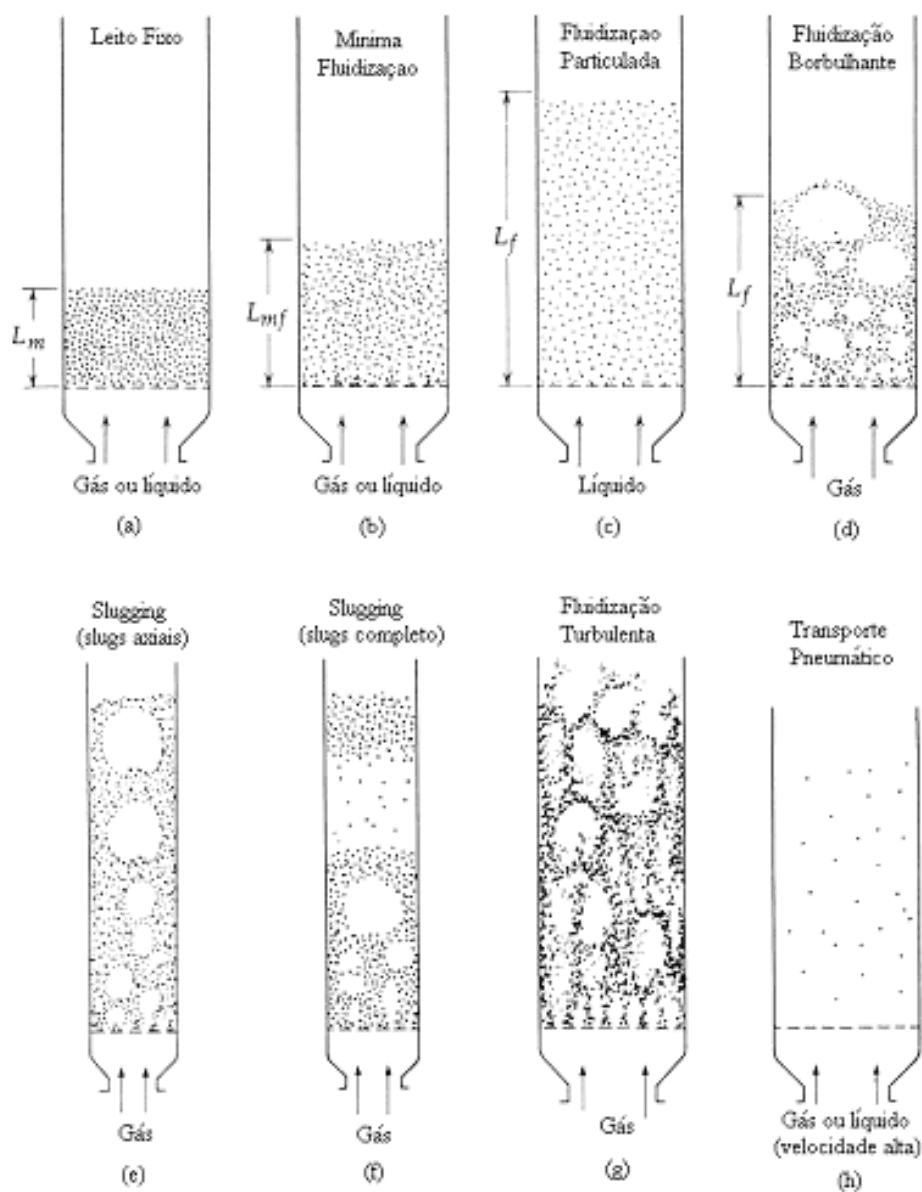


Figura 9 – Regimes de Fluidização.
Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

2.1.2 Vantagens e Desvantagens na Utilização de Leitos Fluidizados

Segundo Kunii e Levenspiel (1991), existem várias vantagens e desvantagens na utilização de leitos fluidizados, O Quadro 1 mostra algumas delas.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
O escoamento das partículas, como de um fluido uniforme, permite operações controladas continuamente e automaticamente com fácil manuseio.	Para leitos borbulhantes de partículas finas, o escoamento do gás é de difícil descrição, apresentando grandes desvios do "plug flow" . Sendo problemático quando a conversão do reagente gasoso é alta ou a reação intermediária é altamente seletiva.
Mistura adequada dos sólidos conduzem às condições isotérmicas no reator.	A rápida mistura dos sólidos no leito conduzem a tempos de residência não uniformes dos sólidos no reator. Comprometendo a uniformidade do produto, reduzindo o rendimento.
Mistura dos sólidos no leito apresenta uma resistência às rápidas mudanças nas condições de operação, respondendo lentamente e proporcionando uma margem de segurança para reações altamente exotérmicas.	Sólidos friáveis são pulverizados e arrastados pelo gás sendo necessário reciclá-los.
A circulação de sólidos entre dois leitos possibilita a remoção de calor produzido ou necessário em reatores grandes.	Erosão de tubos e colunas pela abrasão das partículas.
Adequada para operações de grande escala.	Operações não-catalíticas a altas temperaturas, aglomeração e sinterização de partículas finas podem requerer a diminuição da temperatura, muitas vezes reduzindo consideravelmente a taxa de reação.
Alta transferência de calor e massa entre o gás e as partículas.	
A taxa de transferência de calor entre o leito fluidizado e um objeto imerso é alta, sendo necessárias pequenas áreas de troca térmica para os trocadores de calor que utilizam o leito fluidizado.	

Quadro 1 – Vantagens e Desvantagens na Utilização de Leitos Fluidizados.
Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

2.2 CURVA FLUIDODINÂMICA E VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO

A Figura 10 apresenta uma curva típica da queda de pressão (ΔP) obtida experimentalmente, utilizando várias velocidades do gás (u_o) em um leito de partículas.

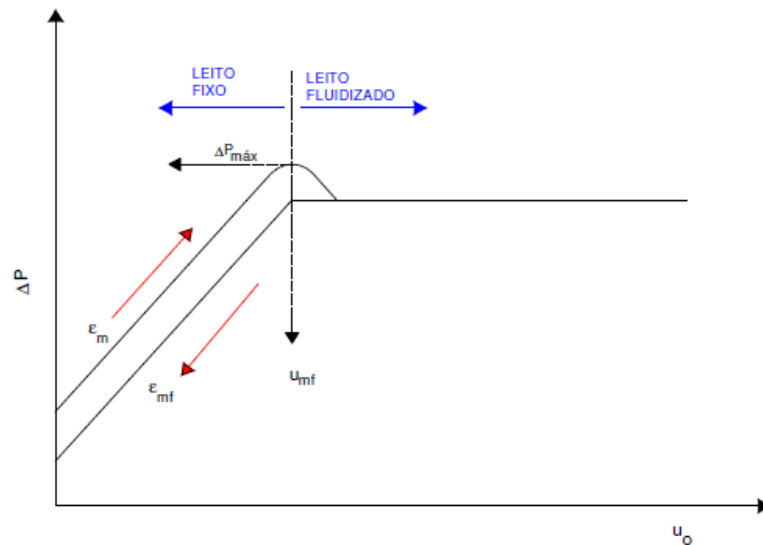


Figura 10 – Curva típica de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás.

Fonte: Parise, 2007, p. 8.

Observa-se na Figura 10 que, para velocidades superficiais do gás de valores baixos, o regime de fluidização é do tipo leito fixo, e a queda de pressão é proporcional à velocidade superficial do gás. Conforme aumenta-se a velocidade do gás, atinge-se uma queda de pressão máxima, chamada de $\Delta P_{máx}$, acima da pressão correspondente ao peso do leito.

A partir dessa localização, o aumento da velocidade do gás faz com que o leito fixo se expanda, aumentando a porosidade do leito de (ϵ_m) para porosidade mínima de fluidização (ϵ_{mf}). Esse aumento provoca uma redução na queda de pressão para o valor correspondente ao peso das partículas.

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. A partir deste estado, a queda de pressão no leito mantém-se praticamente constante, independente do aumento da velocidade superficial do gás.

Com a vazão interrompida, uma leve acomodação ou vibração do leito diminuirá a porosidade para o seu valor estável inicial da porosidade mínima (ε_m).

Há várias correlações na literatura para predizer a velocidade de mínima fluidização, sendo uma das mais utilizadas a correlação de Ergun adaptada (1952), que é dada por:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_s} \cdot \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \Phi_s^2} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad (2.1)$$

Onde:

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

Φ : esfericidade da partícula (adimensional);

d_p : diâmetro médio da partícula (m);

U_{mf} : velocidade de mínima fluidização (m/s);

ρ_g : densidade do fluido (kg/m^3);

ρ_p : densidade da partícula (kg/m^3);

μ : viscosidade dinâmica do fluido (kg/m.s);

g : aceleração da gravidade (m/s^2).

Em relação à porosidade na mínima fluidização, esta pode ser calculada a partir da equação:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{m_s}{\rho_p \cdot A_{st} \cdot h_{l,mf}} \quad (2.2)$$

Onde:

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

m_s : massa de sólidos no leito (kg);

ρ_p : densidade da partícula (kg/m^3);

A_{st} : área da seção transversal (m^2);

$h_{l,mf}$: altura do leito na mínima fluidização (m).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS

Geldart (1973) *apud* Kunii e Levenspiel (1991) classificou as partículas em quatro categorias, como mostra a Figura 11. As características de cada tipo de partículas são apresentadas a seguir.

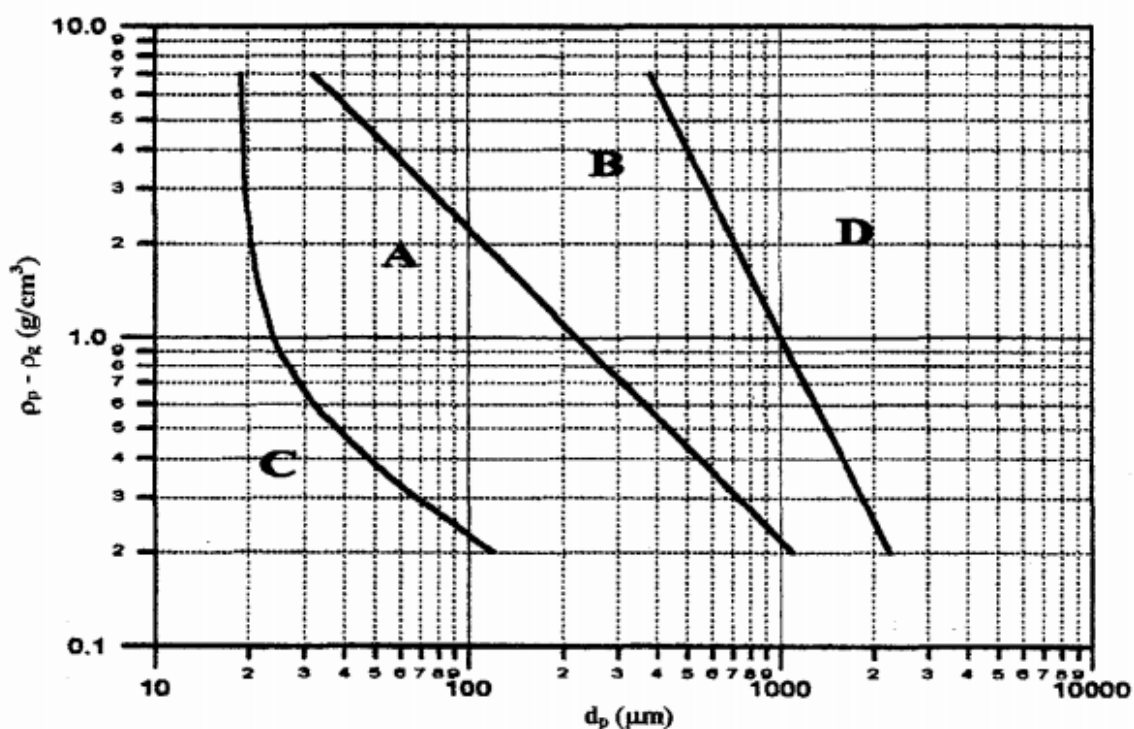


Figura 11 – Classificação de Geldart (1973) de partículas com ar e em condições ambientais.
Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

- Grupo C - partículas consideradas coesivas ou 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 melhorada através da utilização de agitadores mecânicos ou vibradores para evitar a formação de canais preferenciais. A fluidização com este tipo de partículas caracteriza-se por uma intensidade de mistura muito baixa. Exemplo de materiais sólidos pertencentes a esse grupo é possível citar o amido, farinha de trigo e pó facial.

- Grupo A - partículas com diâmetro médio pequeno e/ou densidade baixa (menor que 1400 kg/m^3) são consideradas de Grupo A. 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 rápido que o fluxo de gás e percolam pela emulsão. Um exemplo característico deste grupo pode ser considerado pelo FCC catalítico (*Fluid Catalytic Cracking*).

- Grupo B – neste grupo 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, $u_{mb}/u_{mf} \cong 1$. 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. A denominação de fluidização dessas partículas é considerada fluidização borbulhante. A partícula característica desse grupo é a areia.

- Grupo D – neste grupo são consideradas partículas jorráveis, ou grandes (geralmente maiores que 1 mm) e/ou densas, maiores que 4000 kg/m^3 . A fluidização é difícil se o leito dessas partículas for profundo. Este grupo oferece pequena expansão do leito, baixa mistura das partículas. As forças coesivas interpartículas são menores comparadas com a força de arraste. Como exemplo, estão as esferas de vidro e grãos de café.

A classificação de Geldart (1973) foi utilizada para escolher as partículas sólidas do presente trabalho.

2.4 PLACA DISTRIBUIDORA DE AR

Os Distribuidores ou também denominada placas distribuidoras de ar em leitos fluidizados são comumente usados como suporte para o leito estático e para assegurar uma distribuição de gás uniforme dentro do leito (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Através de processamento de sólidos, os distribuidores são responsáveis pela rápida dispersão dos sólidos alimentados. Nas aplicações onde altas conversões de gases reagentes são requeridas, os distribuidores devem produzir uma distribuição de gás uniforme e com bolhas pequenas (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

As placas distribuidoras de gás devem ser fortes o suficiente para resistir a deformação nas condições sob as quais são submetidas e devem operar por longos períodos sem obstrução, devem ser de fácil desobstrução, devem evitar a erosão e os atritos das partículas, assim como operar com uma baixa queda de pressão, para minimizar o consumo de energia (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

A função da placa distribuidora de gás é de distribuir o ar de fluidização de modo uniforme em toda seção transversal do leito. Esta uniformidade deve ser mantida em todas as condições operacionais do ensaio (BASU, 2006).

A placa distribuidora de ar/gás deve ser compatível com cada tipo de material utilizado, este tipo de placa deve homogeneizar a distribuição do gás de fluidização no leito de sólidos, pois não há outro meio físico para influenciar a distribuição de ar através dos sólidos. Através da fluidização que o ar tem que levantar certa quantidade de massa de sólidos contra a gravidade e superar a resistência da placa de distribuição (BASU, 2006).

Existem vários tipos de placas distribuidoras de ar, conforme mostrado na Figura 12, sendo: (a) placa perfurada; (b) placa porosa; (c) tuyère tipo direcional (“directional nozzle”); (d) tuyère tipo “simple nozzle”, bocal ou flauta; (e) placa perfurada côncava; (f) placa com grelhas; (g) tuyère tipo “bubble cap”; e (h) tuyère tipo “slit nozzle” (BASU, 2006).

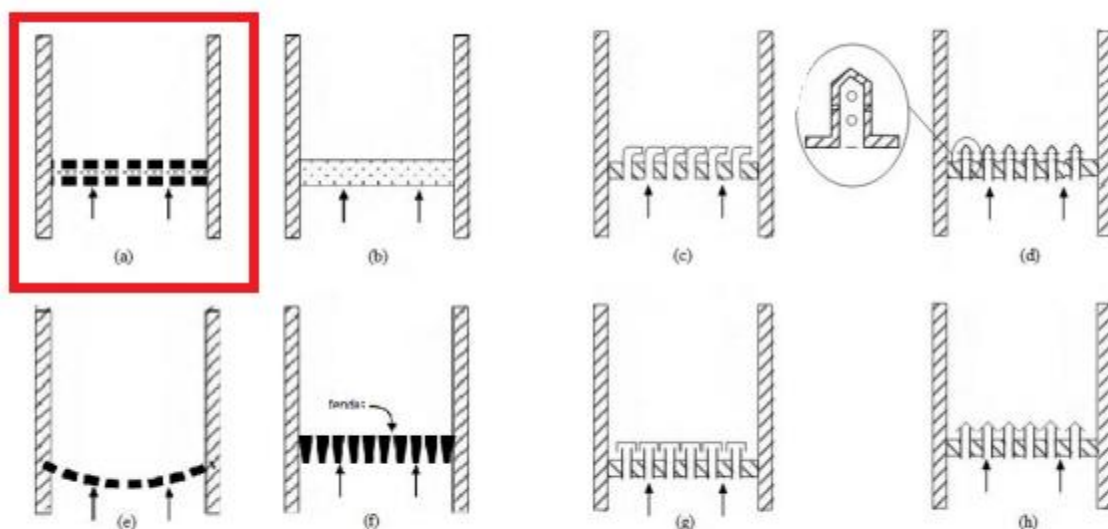


Figura 12 – Tipos de placas distribuidoras de ar (a) placa perfurada; (b) placa porosa; (c) *tuyé*re tipo direcional (“directional nozzle”); (d) *tuyé*re tipo “simple nozzle”, bocal ou flauta; (e) placa perfurada côncova; (f) placa com grelhas; (g) *tuyé*re tipo “bubble cap” e (h) *tuyé*re tipo “slit nozzle”.

Fonte: Kaminski et. al. (2011).

A placa perfurada possui arranjo conforme os seus orifícios, que podem ser do tipo triangular ou quadrado, como mostrado na Figura 13.

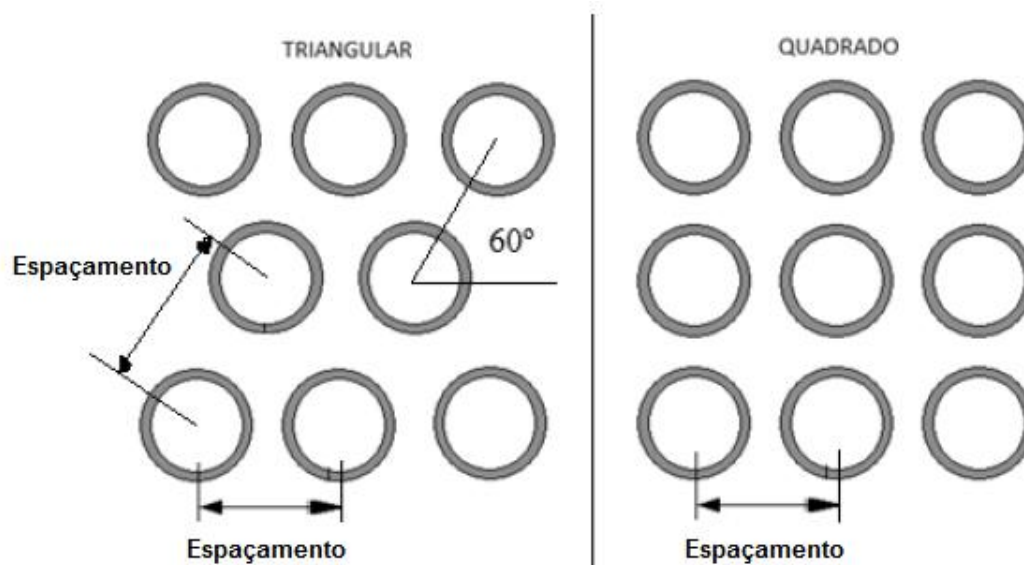


Figura 13 – Tipos de arranjo triangular e quadrado.

Fonte: Kaminski et. al. (2011).

O tipo de placa utilizada no referente trabalho será do tipo placa perfurada com arranjo triangular e possui como vantagens: simples fabricação, baixo custo de fabricação, facilidade de modificações (diâmetro do orifício, ampliação ou redução) e facilidade de limpeza; e possui como desvantagens a: limitação da área disponível para orifícios, ou seja, limita a velocidade de injeção (KAMINSKI et. al., 2011).

2.5 MEDIDA DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO EM LEITO FLUIDIZADO

O método envolvendo medidas de flutuação de pressão no interior de leitos fluidizados tem sido usualmente utilizado para o estudo do comportamento de sistemas gás-sólido.

De acordo com Schouten e van den Bleek (1998), afirma que a vantagem do emprego desses sinais de pressão, é que eles incluem os efeitos de distintos fenômenos (dinâmicos) que acontecem no processo de fluidização, como a formação de bolhas de gás, a turbulência do escoamento, e a passagem e erupção dessas bolhas.

Dhodapkar e Klinzing (1993) destacam que a natureza da flutuação de medidas de pressão em processos de fluidização é singularmente afetada pelo tipo de placa distribuidora, diâmetro do leito, altura do leito fixo, tamanho das partículas, velocidade superficial do gás e localização das tomadas de pressão no leito.

2.6 PUBLICAÇÕES REFERENTES AO TEMA

A seguir, serão descritos alguns trabalhos referentes ao tema do presente trabalho em ordem cronológica.

Conforme Dhodapkar e Klinzing (1993) citado por Fonseca (2009) foi observado que os principais motivos que levam a afetar as medidas de pressão em leito fluidizado são localização das tomadas, densidade das partículas, diâmetro do leito, velocidade superficial do gás, diâmetro das partículas e altura do leito.

Dhodapkar e Klinzing (1993) estudaram a qualidade do regime de fluidização através da flutuação de pressão, utilizando partículas dos grupos A e B da classificação de Geldart (1973). Os autores observaram que o comportamento da flutuação da pressão em leitos profundos ($H/D > 5$) difere significativamente

comparando com leitos rasos, isto é atribuído a uma contínua variação do estado de fluidização ao longo da altura do leito devido à expansão do gás. Além disso, verificaram que a flutuação da pressão é uma função complexa que envolve o diâmetro do leito, propriedades das partículas, tipo de distribuidor, da localização dos medidores de pressão e da altura estática do leito; e a medida de flutuação de pressão representa um método simples de controle e monitoramento da qualidade da fluidização.

Fonseca (2009) ao realizar um estudo de Kage et. al. (1993) preparou uma análise de como o leito se comportava através da análise de frequência utilizando a Transformada de Fourier, para as medidas de flutuações de pressão localizadas no *plenum* do leito fluidizado com partículas sólidas. Verificaram que as variações de duas das frequências utilizadas estavam de acordo com as frequências de geração e erupção de bolhas, e a outra frequência foi atendida como a frequência natural do leito, em que depende da quantidade de partículas do leito e do volume do *plenum*.

Os autores observaram as medidas de flutuação de pressão tomadas no *plenum* do leito fluidizado, e notaram a relação da frequência de geração de bolhas com a queda de pressão na placa distribuidora, a partir de diferentes diâmetros de abertura no distribuidor de gás.

Bai et. al. (1996) *apud* Parise (2007), empregaram um diagnóstico estatístico para examinar como a velocidade de transição da fluidização borbulhante para a fluidização turbulenta, utilizando medidas de flutuação de pressão em processo de fluidização. Em seus dados verificaram a variação do desvio padrão da flutuação de pressão em função da velocidade superficial do gás. A caracterização desta variação da transição do regime de fluidização do tipo borbulhante para o regime de fluidização turbulenta, foi realizada em ensaios com fração de partículas grossas.

Os pesquisadores perceberam que ao haver um acréscimo da velocidade do gás quando $u_0 < u_c$ (velocidade de transição de fluidização borbulhante para turbulenta) há um aumento do desvio padrão. Da mesma forma, quando se diminui a velocidade, observaram que o acréscimo de partículas grossas resulta em um aumento de u_c (BAI et. al., 1996 *apud* PARISE, 2007).

Bai et. al. (1999) *apud* Parise (2007), observaram como se comportava o escoamento de partículas no fluido no processo de fluidização, utilizando a análise de flutuação de pressão. Através dos sinais de flutuação de pressão eles puderam concluir que mesmo utilizando distintas classes de partículas caracterizadas por

Geldart (1973), pode-se utilizar desta técnica para verificar o comportamento deste escoamento. Para a classificação de partículas do grupo C as flutuações de pressão foram menores comparados ao grupo A e B, com classificação foi observada flutuações de pressão com escalas e picos de frequência altos devido ao comportamento das bolhas, o grupo C não obteve o mesmo processo por não formar bolhas nítidas.

Sathiyamoorthy e Horio (2003) estudaram a influência do distribuidor na uniformidade da fluidização e a relação altura de leito e diâmetro da coluna (H/D) na qualidade de fluidização crítica que corresponde à queda de pressão máxima experimental sobre a teórica no leito.

Os autores utilizaram dois tipos de distribuidores com multi-orifício e três tipos de materiais particulados, como alumina, zircônia e *rutile*, utilizando ar em condições ambientes. A influência do distribuidor, da queda de pressão e a velocidade de operação para atingir a fluidização uniforme são analisadas no trabalho. A relação altura de leito e diâmetro da coluna tem mostrado um papel significativo na seleção do distribuidor (SATHIYAMOORTHY e HORIO, 2003).

Ainda no trabalho de Sathiyamoorthy e Horio (2003) verificaram que o tipo de distribuidor, tamanho e velocidade operacional influenciam na qualidade da fluidização. Existe uma relação altura de leito e diâmetro da coluna crítico, onde a qualidade da fluidização é máxima e é influenciada pela velocidade superficial do gás que se está operando, bem como o tipo de distribuidor. A relação altura de leito e diâmetro da coluna crítico encontrado diminui de forma linear com o aumento da velocidade de operação. A razão da queda de pressão (experimental sobre teórica) no distribuidor do leito tem sido expressada como uma função da relação altura de leito e diâmetro da coluna crítico e estes resultados são comparados com os dados da literatura.

Com relação à análise estatística, análise espectral e análise de caos, Johnsson et. al. (2000) compararam estas diferentes análises para verificar como se comportava as flutuações de pressão em processos de fluidização. Os resultados que os autores obtiveram foi a partir da análise de caos e frequência dominante (espectro de potência) e verificaram que ambas as análises estão em acordo entre si e podem ser empregadas para se complementar.

Em 2004, Felipe em seu estudo, conseguiu identificar e caracterizar os diversos regimes de fluidização no processo de leito fluidizado do tipo gás-sólido

através de flutuações de pressão. O tipo de análise utilizada foi através da análise de frequência aplicando em seu estudo a Transformada de Fourier.

Felipe (2004) utilizou das diferentes localizações da medida de pressão no leito e no *plenum*; o método de medida, do tipo diferencial e do tipo absoluta, e com diversos materiais sólidos são efeitos que o autor pode observar em seu trabalho que influenciaram na conclusão que obteve, em que para uma estimativa confiável não é recomendável instalar os sensores de pressão muito próximo ao distribuidor de ar e que o *plenum* é um lugar adequado para a aquisição dos sinais de pressão.

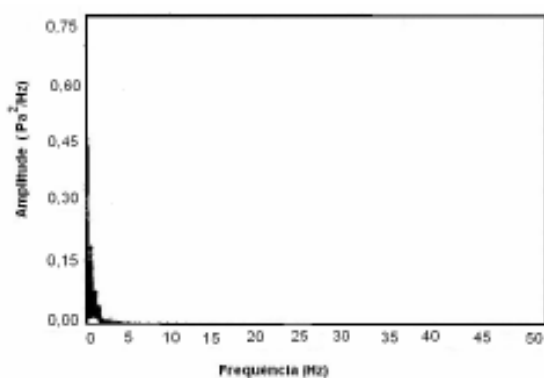
Em seu estudo, foram utilizadas duas colunas de fluidização em acrílico, com diâmetro interno e altura de 0,11 m e 1,5 m (coluna I), e 0,14 m e 0,80 m (coluna II), respectivamente (FELIPE, 2004).

Os experimentos foram realizados com 12 tipos diferentes de material sólido, sendo que 5 deles pertenciam ao grupo B de Geldart (1973), 5 ao grupo A e 2 ao grupo C; em sete diferentes regimes fluidodinâmicos (leito fixo, fluidização particulada, fluidização borbulhante simples, múltipla e explosiva, *slugging* de parede e flutuante). As medidas de pressão foram efetuadas no *plenum* e em 5, 15, 25 e 35 cm acima da placa distribuidora, sendo obtidas a partir de transdutores de pressão (absoluto e diferencial). A frequência de amostragem foi mantida em 100 Hz e foram adquiridas 8.192 medidas de pressão (FELIPE, 2004).

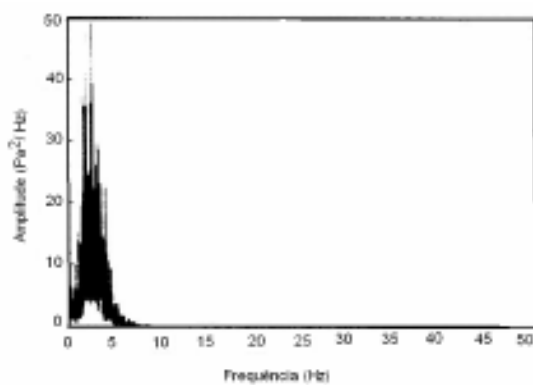
Em relação à identificação e distinção de regimes de fluidização, Felipe (2004) observou que os espectros de mesmo regime obtidos com sólidos diferentes não possuem somente frequências dominantes aproximadas, mas também, bandas semelhantes.

De acordo com o autor, a banda do espectro deve-se à diversidade de tamanho das bolhas de gás formadas durante a fluidização. Nas Figuras 14, 15 e 16, observa-se que o aumento da velocidade superficial do gás (u_0) resulta não somente no deslocamento do espectro para a extremidade direita, mas também no estreitamento da sua banda. Este estreitamento ocorre até alcançar o regime *slugging*, observada na Figura 16, onde o espectro é caracterizado por apresentar um único pico, que, conforme afirma Felipe (2004), é devido ao fato que neste regime as bolhas apresentam tamanho mais uniforme, causando assim a redução da banda do espectro. Para o regime *slugging*, o espectro com um único pico foi também obtido por Silva (1998) sendo que este autor utilizou leito de jorro. Felipe,

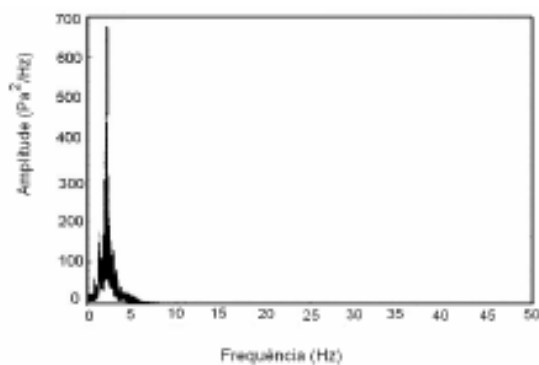
2004 afirma que parece indicar que, para um mesmo regime de fluidização, o formato do espectro independe do tipo de equipamento utilizado.



**Figura 14 – Espectro de potência da CMC.
Leito Fixo – $u_o = 0,05$ m/s.
Fonte: Felipe (2004).**



**Figura 15 - Espectro de potência da CMC.
Fluidização Borbulhante – $u_o = 0,12$ m/s.
Fonte: Felipe (2004).**



**Figura 16 - Espectro de potência da CMC.
Fluidização *Slugging* – $u_o = 0,32$ m/s.
Fonte: Felipe (2004).**

No mesmo trabalho, também foram realizados experimentos de recobrimento de partículas, com o objetivo de observar o fenômeno de aglomeração de partículas, através da metodologia de monitoramento de fluidização, utilizando a transformada de Fourier (FELIPE, 2004).

No trabalho de Parise (2007), a autora cita Li et. al. (2005) onde os autores utilizaram medidas de flutuação de pressão em análise espectral (frequência dominante) para caracterizar fluidodinamicamente em processos de leito fluidizado de misturas binárias. Ao realizar os procedimentos dos experimentos puderam perceber em seus resultados que a localização da tomada de pressão no leito, onde possui uma influência menor no valor do domínio da frequência foi considerada independente.

De acordo com Parise (2007) *apud* Li et. al. (2005) perceberam que em uma posição especificada da tomada de pressão no leito, havia uma amplitude média máxima que era dependente do tamanho das partículas adicionadas no leito e da velocidade superficial do gás. Verificaram também conforme maior o valor da frequência dominante menor seria a altura do leito fixo, ou seja, eram inversamente proporcionais (PARISE, 2007 *apud* LI et. al., 2005).

Em 2007, Parise estudou sobre a aplicação da distribuição espectral normal em leito fluidizado gás-sólido, onde realizou diversos experimentos com partículas de areia e celulose microcristalina (CMC), alterando-se a altura do leito e o diâmetro médio das partículas, para identificar a região onde o leito está tendendo a defluidização, para que desta maneira possa atuar no processo impedindo que haja perda de eficiência ou até mesmo a necessidade de parada da produção.

O objetivo do estudo anterior foi de desenvolver uma metodologia capaz de identificar a região de defluidização em um processo de leito fluidizado gás-sólido, através de medidas de flutuação de pressão analisadas utilizando a transformada de Fourier juntamente com a Distribuição Exponencial Gaussiana. Com o método utilizado, foi possível identificar visivelmente a região onde o leito está tendendo à defluidização, onde o mesmo possui aplicações industriais através do controle em tempo real de processos em leito fluidizado gás-sólido (PARISE, 2007).

Este estudo proposto obteve uma metodologia em que foi de grande valia para a detecção da mudança de regime de fluidização para a relação altura do leito e diâmetro da coluna de fluidização (H/D) superiores à unidade (PARISE, 2007).

No mesmo trabalho, realizou experimentos de secagem utilizando partículas de celulose microcristalina, para obtenção da identificação do ponto crítico de umidade, utilizando a frequência dominante e desvio padrão da flutuação de pressão, como também a metodologia proposta (PARISE, 2007).

Santos et. al. (2007) abordam sobre o efeito da área livre do distribuidor de ar na expansão do leito fluidizado borbulhante e para isto, eles investigam experimentalmente o efeito de diferentes distribuidores de ar na fluidização borbulhante com partículas de microesferas de vidro, através do monitoramento *online* (tempo real) de um sinal de pressão no leito e da análise espectral de potência.

Eles observaram que a flutuação local da pressão no leito e a frequência dominante de percolação das bolhas de ar no leito são significativamente dependentes do projeto do distribuidor (SANTOS et. al., 2007).

Os testes realizados foram com placas distribuidoras de ar de aço de aproximadamente 4 mm de espessura com furos de 2 mm e área livre de aproximadamente 4%, 8%, 12% e também uma placa sinterizada com microesferas de bronze (permeabilidade de $9,886.10^{-11}$) (SANTOS et. al., 2007).

Santos et. al. (2007) concluíram que a utilização de sinais simples de pressão na tentativa de observar o efeito de cada distribuidor de ar, na fluidização borbulhante, apresentou resultados satisfatórios; o efeito do aumento da área livre do distribuidor de ar ficou mais evidenciado nos diagramas de flutuações de pressão e no valor médio da pressão do que propriamente nos gráficos de espectros de potência; o aumento da área livre do distribuidor é diretamente proporcional ao aumento da amplitude das flutuações de pressão ou da expansão do leito; os espectros de potência para a placa sinterizada apresentaram comportamentos similares àqueles obtidos para o distribuidor de menor área livre (4%).

Chyang, Lieu e Hong (2008) estudaram o comportamento de dispersão de gás em leito fluidizado do tipo borbulhante. O gás utilizado foi o dióxido de carbono. A maior parte da injeção de gás a partir de distribuidores do tipo *tuyéres* foram para o mesmo sentido, paralelo com o eixo longitudinal. O movimento das partículas na direção lateral foi reforçada pela dinâmica de jatos de gás na horizontal dentro do leito.

Os autores utilizaram sete tipos de distribuidores de gás, conforme citado na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos distribuidores.

NÚMERO DO DISTRIBUIDOR	TIPO DE DISTRIBUIDOR	TAMANHO DO ORIFÍCIO	NÚMEROS DE ORIFÍCIOS	% ÁREA LIVRE
#1	<i>Tuyére</i> Multi-Orifícios	3	106	0,94
#2	<i>Tuyére</i> Multi-Orifícios	3	18	2,3
		5	88	
#3	<i>Tuyére</i> Multi-Orifícios	3	18	3,8
		6,5	88	
#4	<i>Tuyére</i> simples orifício	6,5	32	1,33
		3	10	
#5	<i>Tuyére</i> simples orifício (eliminação da zona morta)	3	10	1,41
		6,5	32	
#6	<i>Nozzle</i> Horizontal	11,3	32	4
#7	Placa perfurada	3	457	4

Fonte: Chyang, Lieu e Hong (2008).

Os resultados experimentais mostraram que o efeito da velocidade superficial do gás na mistura depende do tipo de distribuidor. Comparando com um distribuidor do tipo placa perfurada, o melhor desempenho na mistura do gás foi observado enquanto o leito estava com um distribuidor do tipo *nozzle* (CHYANG; LIEU; HONG, 2008).

Portanto, os autores verificaram com os resultados experimentais obtidos no estudo que o efeito da altura do leito fixo no grau de dispersão de gás não é significativa (CHYANG; LIEU; HONG, 2008).

No entanto, o fator dominante para dispersão de gás é o projeto do distribuidor. Para determinado tipo de distribuidor, o melhor grau de dispersão de gás pode ser obtido enquanto o distribuidor com menor relação de área aberta é empregada. O grau de dispersão de gás pode ser melhorado através da eliminação de zonas mortas no interior do leito fluidizado. Portanto, a seleção de um projeto de distribuidor adequado é a chave para obter uma fluidização com sucesso (CHYANG; LIEU; HONG, 2008).

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). Devido ao aumento da velocidade superficial do gás foi possível realizar experimentos desde o leito fixo até leito fluidizado rápido. Através das tomadas de pressão, as quais foram analisadas no domínio da frequência aplicando Transformada Rápida de Fourier, em que foi possível distinguir o comportamento dos regimes de fluidização do leito.

Silva et. al. (2011) estudaram sobre o fenômeno de defluidização, aplicaram 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 celulose microcristalina como sólido particulado.

O trabalho foi realizado em duas etapas, onde a primeira obtia o monitoramento dos regimes de fluidização durante o processo de recobrimento sem controle, e a segunda etapa tinha 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).

No estudo, parâmetros como massa da partícula sólida, 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 (SILVA et. al., 2011).

Com esta metodologia, foi possível identificar as transições dos regimes de fluidização e permitiu definir uma frequência de 6 Hz a 7 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. Os experimentos em circuito fechado 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).

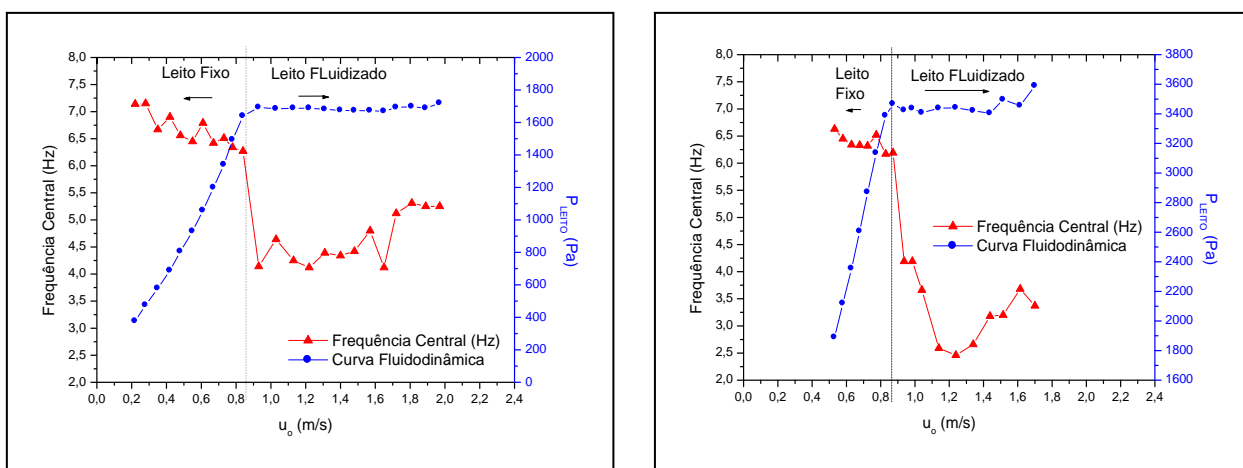
Parise et. al. (2013) analisam sobre a detecção da região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido através de medidas de flutuação de pressão no leito. Neste trabalho foi utilizada a metodologia da análise espectral Gaussiana.

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 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 no experimento 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 TM (PARISE et. al., 2013).

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. Verificaram que o valor da frequência central sofre um acréscimo quando o leito está tendendo à defluidização, isto é, quando a velocidade superficial do ar está próxima à velocidade do ar na mínima fluidização, o que pode ser verificado com o auxílio da curva fluidodinâmica (PARISE et. al., 2013).

A Figura 17 (a) refere-se ao diâmetro de partículas de 1,55 mm e altura do leito de 0,10 m e a Figura 17 (b) refere-se ao diâmetro de partículas de 1,55 e altura do leito de 0,20 m, equivalendo a uma relação altura de leito - diâmetro interno da coluna (H/D) de aproximadamente 1,0 e 2,0, respectivamente. 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.



(a)

(b)

Figura 17 – Evolução da frequência central e da curva fluidodinâmica.

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

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

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados, suas características físicas, a descrição do sistema experimental e o procedimento realizado para obtenção dos dados. Assim, apresentam-se detalhes da metodologia empregada para detecção da região de defluidização, além da configuração para a aquisição e processamento de sinais usados para a coleta de dados em cada teste.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS E SUAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

No presente trabalho escolheram-se três diferentes tipos de partículas, sendo estas: areia, celulose microcristalina (CMC) e esferas de vidro.

Essa escolha foi realizada levando em conta a diferença de densidade e tamanho, classificando-se em diferentes classificações de Geldart (1973) do tipo A, B e D, além de serem bastante utilizadas na literatura, estas partículas estão disponíveis no Laboratório de Sistema Gás- Sólido, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Ponta Grossa.

A Fotografia 1 ilustra o aspecto das partículas utilizadas neste estudo.



(a)



(b)



(c)

**Fotografia 1 – Partículas utilizadas nos ensaios experimentais.
(a) Areia; (b) CMC e (c) Esfera de vidro.**

As características físicas dos sólidos determinadas neste trabalho foram diâmetro médio das partículas, densidade aparente e esfericidade.

- Análise granulométrica das partículas: foi realizada por peneiramento em peneiras padronizadas Tyler.
- Densidade aparente das partículas: foi determinada através de picnometria, que é baseada no deslocamento do líquido pela adição das partículas sólidas.
- Esfericidade: foi calculada através da razão do maior diâmetro inscrito e o menor diâmetro circunscrito na área projetada ($d_i=d_c$), a partir do método de Peçanha e Massarani (1986).

O Quadro 2 refere-se as características físicas dos sólidos utilizados neste trabalho.

PARTÍCULAS UTILIZADAS	CLASSIFICAÇÃO DE GELDART (1973)	DIÂMETRO MÉDIO DE PARTÍCULAS (mm)*	DENSIDADE APARENTE (kg/m ³)	ESFERICIDADE
Celulose Microcristalina	A	0,165 (-0,180 + 0,150)	1472	0,82
	B	0,275 (-0,300 + 0,250)		
Areia	B	0,18 (-0,212 + 0,150)	2572	0,72
	B	0,256 (-0,300 + 0,212)		
Esferas de vidro	D	1,55 (-1,70 + 1,40)	2450	1,00
	D	2,18 (-2,36 + 2,00)		

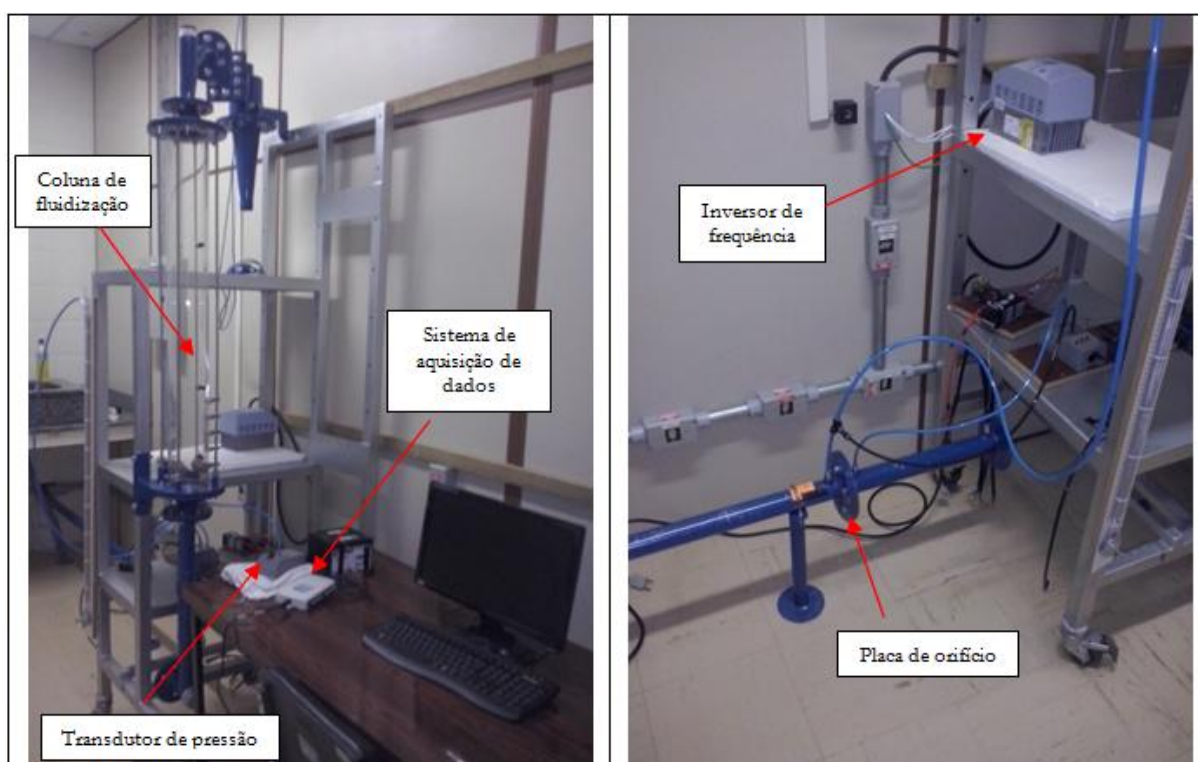
*Abertura da peneira para classificação de tamanho.

Quadro 2 – Características físicas dos materiais.

3.2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

O sistema experimental utilizado neste trabalho está situado no laboratório de Sistema Gás- Sólido, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Ponta Grossa. Os experimentos foram realizados em uma coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e com 1 m de altura.

Na Fotografia 2, pode-se visualizar a coluna de fluidização, o transdutor de pressão, o inversor de frequência, o sistema de aquisição de dados e a placa de orifício.



Fotografia 2 – Equipamento experimental.

O ar utilizado para a fluidização das partículas fornecido por um soprador radial da marca Elan®, modelo CRE04, que estará acoplado a um motor de 4 cv. A rotação do motor do soprador é regulada com o auxílio de um inversor de frequência da marca WEG®, modelo CFW080160T2024POA1Z.

A vazão mássica do ar destinado ao leito de partículas será determinada mediante uma placa de orifício. Para isso, a pressão manométrica na linha e a queda de pressão através da placa de orifício foram obtidas utilizando dois

transdutores diferenciais de pressão da marca Cole Parmer®, modelo 98073-14, de 0 a 12.454,1 Pa e modelo 68071-14, de 0 a 6.227 Pa, respectivamente

Os sinais de pressão provenientes do *plenum* serão obtidos utilizando um transdutor diferencial de pressão da marca Cole Parmer®, modelo 68071-14 de 0 a 6.227 Pa.

Todos os transdutores de pressão utilizados foram acoplados a um sistema de aquisição de dados da marca National Instruments™, modelo NI USB 6211. Os sinais que serão obtidos por esses instrumentos serão visualizados e processados a partir de um microcomputador com *software* LabView™ versão 10.0. Serão coletados 2.048 pontos de pressão no *plenum* a uma taxa de amostragem de 400 Hz.

Na parte superior da coluna de fluidização, há uma tubulação em aço que faz conexão a um ciclone do tipo *Swift* de alta eficiência, com a finalidade de separar as partículas provenientes do leito (Fotografia 3).



Fotografia 3 – Ciclone do tipo *Swift*.

As placas distribuidoras do ar utilizadas nos experimentos são de aço com 3,50 mm de espessura, do tipo perfurada, que serão detalhadas no item 3.2.1. Na parte superior dessa placa foi instalada uma tela de aço inoxidável com abertura de 75 μm , com o propósito de que as partículas sólidas que estavam sobre ela não passassem por seus orifícios e caíssem no *plenum*.

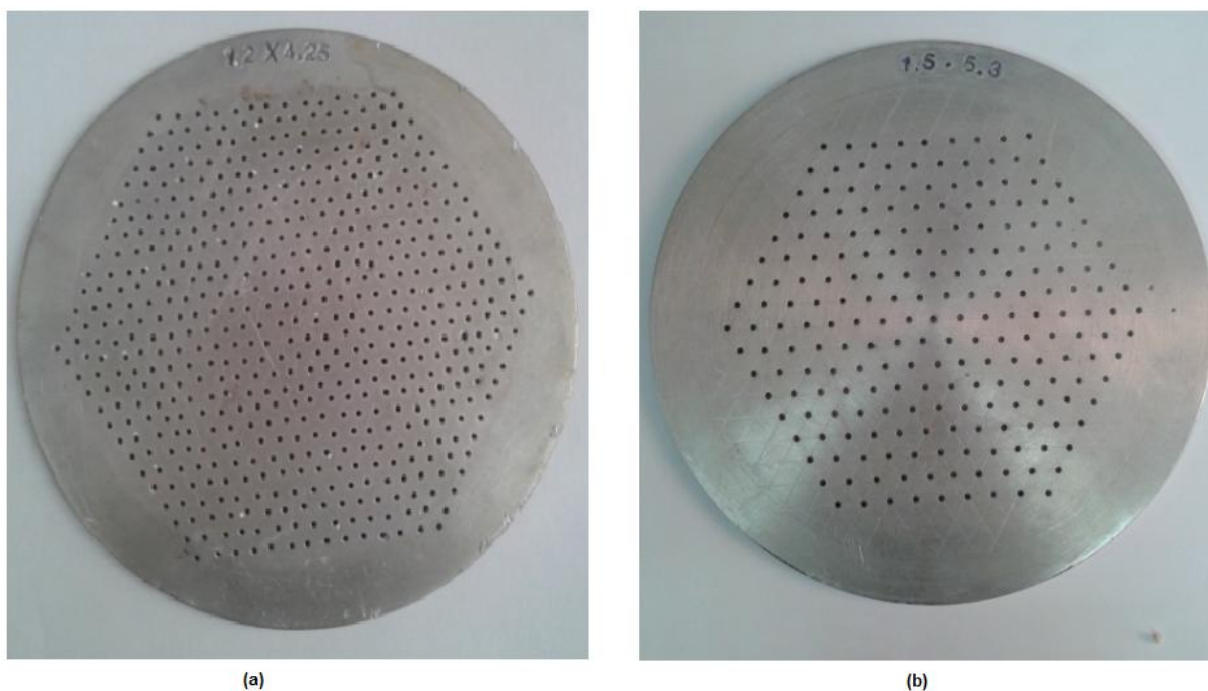
3.2.1 Placa distribuidora de ar

Em relação à escolha da placa distribuidora de ar, foram realizados alguns ensaios preliminares, com intuito de verificar se as partículas teriam uma curva fluidodinâmica coerente com a finalidade do trabalho. Assim, os ensaios definitivos foram realizados com duas placas distribuidoras de ar, conforme mostra o Quadro 3.

PLACA	DIÂMETRO DOS ORIFÍCIOS DA PLACA (mm)	ESPAÇAMENTO (mm)	ESPESSURA DA PLACA (mm)	ARRANJO
Placa Distribuidora de Ar 1	1,20	4,25	3,50	Triangular
Placa Distribuidora de Ar 2	1,50	5,30	3,50	Triangular

Quadro 3 – Placa distribuidora de ar.

A placa utilizada no referente trabalho foi do tipo placa perfurada com arranjo triangular. A Fotografia 4 ilustra as placas distribuidoras de ar 1 e 2, conforme indicado.



Fotografia 4 – Placas distribuidoras de ar.

(a) $d_{or}=1,20$ mm x espaçamento=4,25 mm (b) $d_{or}=1,50$ mm x espaçamento=5,30 mm.

Em relação à área livre e ocupada pelos orifícios de cada placa, segue o Quadro 4 para comparações.

PLACA DISTRIBUIDORA DE AR	DIÂMETRO DE ORIFÍCIO 1,2 mm e ESPAÇAMENTO 4,25 mm	DIÂMETRO DE ORIFÍCIO 1,5 mm e ESPAÇAMENTO 5,30 mm
Número de orifícios da placa	547	217
Área de um orifício (m ²)	1,13E-06	1,77E-06
Área total de orifício (m ²)	6,18E-04	3,8E-04
Área da Placa (m ²)	9,5E-03	9,5E-03
% Área Livre (%)	6,18E-02	3,83E-02

Quadro 4 – Comparação da área livre e ocupada pelos orifícios de cada placa distribuidora de ar.

3.2.2 Medidor de fluxo de ar: Placa de orifício

A placa de orifício é utilizada para obter a medição de fluxos. Esse tipo de placa tem como vantagem os seguintes aspectos: simplicidade, custo relativamente baixo, ausência de partes móveis, pouca manutenção, aplicação para muitos tipos de fluido e instrumentação externa; e como desvantagens: provoca considerável perda de carga no fluxo, a faixa de medição é restrita e desgaste da placa (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

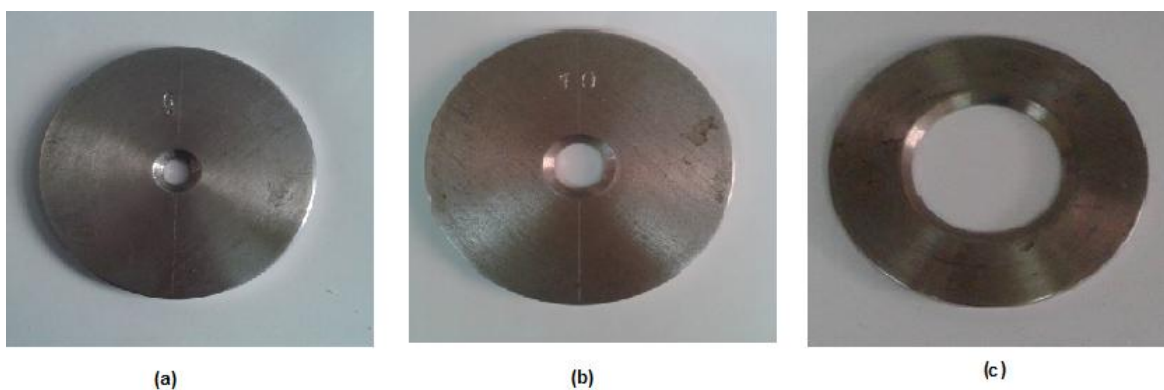
As medidas de pressão a montante e a da queda de pressão através da placa de orifício permitiram a determinação da vazão mássica do gás destinada ao leito de partículas (PARISE, 2007).

Houve uma necessidade de utilizar placas de orifícios com diferentes diâmetros de orifício, devido ao fato de se trabalhar com partículas de densidades distintas e com várias alturas de leito fixo. No Quadro 5 são mostrados os diâmetros dos orifícios utilizados conforme o tipo de diâmetro de partícula.

MATERIAIS	DIÂMETRO MÉDIO DE PARTÍCULAS (mm)	DIÂMETRO DO ORIFÍCIO DA PLACA DE ORIFÍCIO (m)
Areia	0,18	0,010
	0,256	0,010
Celulose Microcristalina (CMC)	0,165	0,006
	0,275	0,010
Esferas de vidro	1,55	0,028
	2,18	0,028

Quadro 5 – Diâmetros dos orifícios.

A Fotografia 5 ilustra as placas de orifícios de diâmetro de 6, 10 e 28 mm, conforme indicado.



Fotografia 5 – Placas de orifícios.
(a) 6 mm; (b) 10 mm; (c) 28 mm.

Para a determinação da velocidade superficial do gás de fluidização, foram utilizadas as seguintes equações (Norma ASME MFC-14M-2003):

$$Q_m = \frac{e C A_{orificio} \sqrt{2 \rho \Delta P}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad [\text{kg/s}] \quad (3.1)$$

Onde:

e: fator de compressibilidade, é dado por:

$$e = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta P}{K P_1} \quad (3.2)$$

Onde:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (3.3)$$

d: diâmetro do orifício da placa;

D: diâmetro da tubulação

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

P1: pressão absoluta a montante da placa de orifício [Pa];

$$K = \frac{2w}{\rho v_{\text{tubo}}^2} \quad (3.4)$$

e

$$w = \frac{\sqrt{1 - \beta^4} - C\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4} + C\beta^2} \Delta P \quad (3.5)$$

C: coeficiente de descarga, e é dado por:

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

(3.6)

Logo, a velocidade superficial do gás é obtida por:

$$u_0 = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_{leito}}$$

(3.7)

u_0 = velocidade superficial do ar (m/s);

ρ = densidade do ar no *plenum* (kg/m³);

\dot{m} = vazão mássica do ar (kg/s);

A_{leito} = área da seção transversal do leito (m²).

$$A_{leito} = \frac{\pi d^2}{4}$$

(3.8)

d = diâmetro interno do leito (m).

3.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA

A metodologia de análise espectral gaussiana foi desenvolvida por Parise (2007) e foi utilizada no presente trabalho para identificar a região de defluidização, utilizando partículas de celulose microcristalina, areia e esfera de vidro. A seguir, será descrito o procedimento desta técnica.

Primeiramente foram coletados 2.048 pontos de pressão manométrica no *plenum* a uma taxa de amostragem de 400 Hz, obtendo-se assim um sinal no qual poderá ser visualizado na Figura 20.

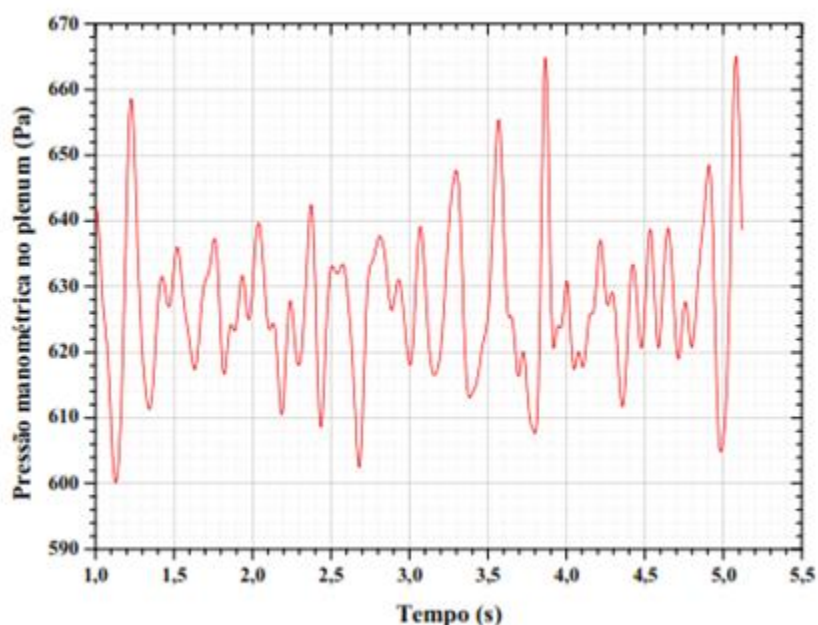


Figura 18 – Sinal de pressão manométrica no *plenum*.

Depois de ter coletados os pontos de pressão no *plenum* e da sua filtragem digital, foi possível extrair do valor coletado o valor médio, para obter a eliminação do nível constante da pressão no leito.

Este procedimento impõe a uma normalização chamada de “centralização na média” ou como mais conhecida (*mean centring*) (LOPES, 2004), na qual consiste em diminuir o valor médio de um vetor (μ_x) a cada elemento desse vetor, que é dada pela Equação 3.9 (PARISE, 2007).

$$P_{N,k} = P_k - \mu_x \quad (3.9)$$

Onde:

P_n : pressão do leito normalizada (Pa);

P : pressão do leito (Pa);

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

N : número de pontos de pressão;

μ_x : valor médio dos N pontos de pressão;

Na Figura 21 é apresentada a pressão normalizada no domínio do tempo.

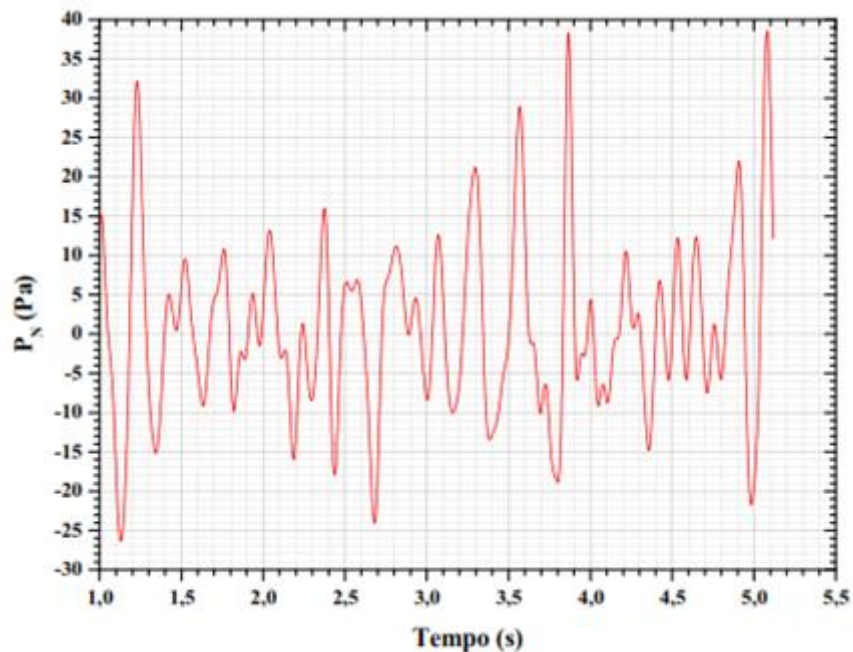


Figura 19 – Pressão normalizada no domínio do tempo.

Dessa forma, é possível obter a aplicação da Transformada de Fourier no sinal de pressão normalizada, a qual é apontada na Figura 22.

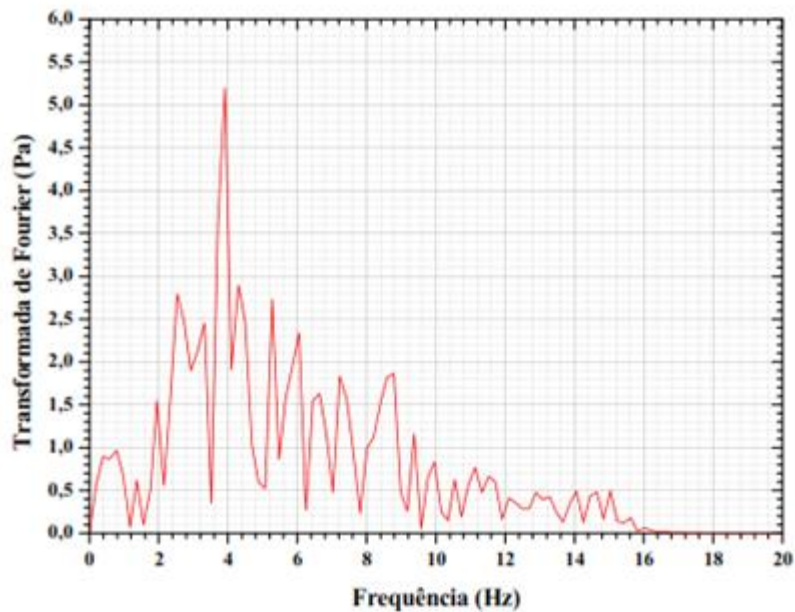


Figura 20 – Transformada de Fourier do sinal de pressão normalizada (espectro de pressão).

Depois de obtido a Transformada de Fourier do sinal de pressão normalizado, é possível realizar um ajuste de uma curva exponencial semelhante à distribuição normal (curva Gaussiana) nesse sinal (PARISE, 2007).

3.3.1.1 Distribuição normal (curva Gaussiana)

A distribuição normal é utilizada nas suas variadas 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 descrita pela seguinte equação:

$$G'(f_k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(f_k - f_m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.10)$$

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;

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

$N = 2.048.$

3.3.1.2 Ajuste da curva exponencial Gaussiana no espectro de pressão

As amplitudes da transformada de Fourier do sinal de pressão normalizado são os dados utilizados para o ajuste da curva exponencial Gaussiana.

Desta forma este ajuste será descrito a partir do trabalho de Parise (2007) da seguinte forma:

A partir da Equação 3.11 e será aplicado o logaritmo natural em ambos os lados:

$$\ln[G'(f_k)] = \ln \left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right] - \frac{(f_k - f_m)^2}{2\sigma^2} \quad (3.11)$$

Tendo que:

$$A' = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

e

$$B = -\frac{(f_k - f_m)^2}{2\sigma^2} = -\frac{f_k^2}{2\sigma^2} + \frac{2f_k f_m}{2\sigma^2} - \frac{f_m^2}{2\sigma^2}$$

e,

$$a = \frac{1}{2\sigma^2} \quad (3.12 a)$$

$$b = \frac{f_m}{\sigma^2} \quad (3.12 b)$$

$$c' = \ln[A'] - \frac{f_m^2}{2\sigma^2} \quad (3.12 c)$$

E substituindo as Equações 3.12 (a, b e c) na Equação (3.11), tem-se que:

$$\ln[G'(fk)] = \ln[A'] + B' \quad (3.13)$$

Ou seja,

$$\ln[G'(f_k)] = af_k^2 + bf_k + c' \quad (3.14)$$

Logo, é possível observar que na Equação (3.14) a função parabólica possui três parâmetros independentes (a , b e c), enquanto a curva Gaussiana (Equação 3.10), apenas dois parâmetros (f_m , σ).

Esta ressalta que a amplitude da curva de distribuição Gaussiana está incorporada ao desvio padrão da mesma, como se verifica na Equação (3.10).

Por isso, a utilização da expressão de curva Gaussiana com uma nova amplitude de modulação dada pelo valor de A , ou seja:

$$G(f_k) = A \cdot e^{-\frac{(f_k - f_m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.15)$$

Da Equação (3.15) e aplicando-se o mesmo processo para a obtenção das Equações [3.11 e 3.12(a , b e c)], encontram-se as seguintes equações:

$$a = \frac{1}{2 \cdot \sigma^2} \quad (3.16 a)$$

$$b = \frac{f_m}{\sigma^2} \quad (3.16 b)$$

$$c = \ln [A] - \frac{f_m^2}{2 \cdot \sigma^2}$$

(3.16 c)

Assim, através da Equação (3.16 c), será possível obter A, onde:

$$A = e^{c + \frac{f_m^2}{2\sigma^2}} \quad (3.17)$$

Assim, Parise (2007, p. 38) afirma que esse tipo de procedimento vincula melhor os parâmetros de frequência média e desvio padrão da curva exponencial com a distribuição das amplitudes na curva espectral, de forma independente da escala dos valores da amplitude. Lembrando que o parâmetro c da Equação (3.15), e conseqüentemente o valor de A , não são utilizados na determinação da frequência central (f_m) e do desvio padrão da distribuição espectral (σ).

Da mesma maneira às Equações (3.13) e (3.14), obtém-se as Equações (3.18) e (3.19):

$$\ln[G(f_k)] = \ln[A] + B \quad (3.18)$$

Ou seja,

$$\ln[G(f_k)] = af_k^2 + bf_k + c \quad (3.19)$$

Parise (2007, p. 39) afirma que o ajuste (Equação 3.20) é fundamentado através do 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), desse modo que a curva exponencial Gaussiana apresente o melhor ajuste dos pontos experimentais, isto é, do logaritmo das amplitudes da Transformada de Fourier do sinal de pressão normalizado. Assim, o resíduo é tratado por:

$$e_k = \sum_{k=0}^{N-1} [\ln[A_e(f_k)] - \ln[G(f_k)]]^2 \quad (3.20)$$

Amplitude Espectral (dados que devem ser ajustados)

Distribuição Exponencial Gaussiana – Função de Ajuste

Onde:

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

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

e_k : é o resíduo deixado pelo ajuste da curva.

Assim, substituindo a Equação (3.20) na Equação (3.19), temos que:

$$e_k = \sum_{k=0}^{N-1} [\ln[A_e(f_k)] - [af_k^2 + bf_k + c]]^2 \quad (3.21)$$

os coeficientes a , b e c da Equação (3.21) definem a localização da curva.

Os coeficientes são determinados a partir da equação abaixo:

$$x = [K^T K]^{-1} K^T y \quad (3.22)$$

onde,

$$x = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} f_0^2 & f_0 & 1 \\ f_1^2 & f_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n-1}^2 & f_{n-1} & 1 \end{bmatrix}$$

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

e K^T é a matriz transposta de K .

A Figura 23 mostra um exemplo do ajuste da curva no logaritmo natural da amplitude da transformada de Fourier, utilizando o *software* LabView 10.0™.

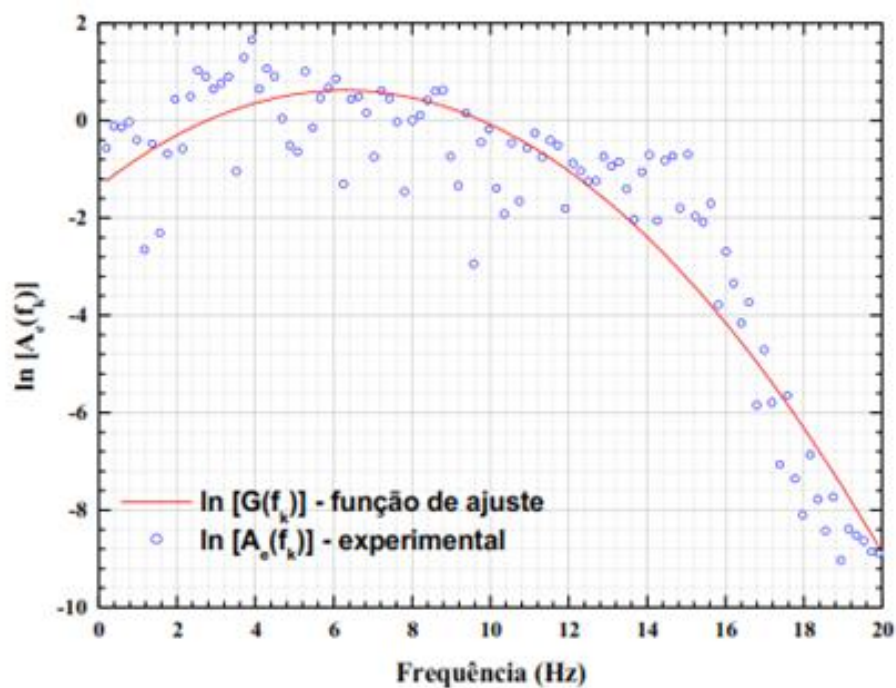


Figura 21 – Logaritmo natural da amplitude da transformada de Fourier com função de ajuste utilizando o *software* LabView 10.0™.

Para concluir através do ajuste da curva será possível conhecer os parâmetros a , b e c . Após isto, os coeficientes a e b são substituídos nas Equações 3.12 (a, b), determinando-se o valor de frequência central (f_m) e do desvio padrão da distribuição espectral (σ).

Como mencionado anteriormente, o coeficiente c da curva ajustada não é utilizado no cálculo da frequência central e do desvio padrão da distribuição espectral.

3.3.2 Especificação do filtro digital

O filtro digital utilizado no presente trabalho foi tipo passa-baixa, com topologia *Butterworth* e de resposta infinita ao impulso (IIR), conforme mostrado na Figura 24.

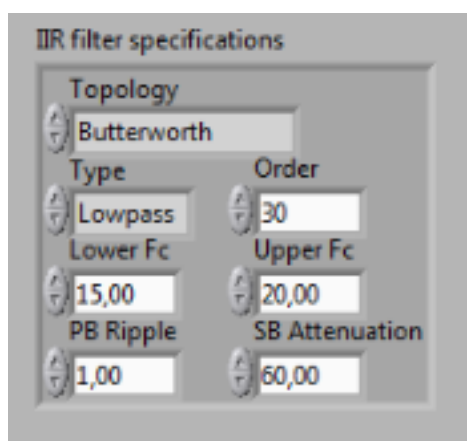


Figura 22 – Especificações do filtro digital de resposta infinita ao impulso (IIR).

3.4 PLANEJAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção são descritos o planejamento e o procedimento experimental seguido para realização de cada ensaio.

3.4.1 Planejamento Experimental

O planejamento experimental para os testes com celulose microcristalina, areia e esfera de vidro é apresentado no Quadros 6.

Ensaio Experimental	Diâmetro de Partículas (mm)	Massa de Sólido (kg)	Altura de Leito Fixo (m)	Diâmetro de Orifício x Espaçamento da Placa Distribuidora de Ar (mm)	Placa de Orifício (mm)	Relação aproximada da altura de leito fixo - diâmetro interno da coluna
CELULOSE MICROCRISTALINA (CMC)						
1	0,165	559,08	0,1	1,2 x 4,25	6	1,0
2	0,165	1116,16	0,2	1,2 x 4,25	6	2,0
3	0,165	559,08	0,1	1,5 x 5,30	6	1,0
4	0,165	1116,16	0,2	1,5 x 5,30	6	2,0
5	0,275	588,14	0,1	1,2 x 4,25	10	1,0
6	0,275	1176,28	0,2	1,2 x 4,25	10	2,0
7	0,275	588,14	0,1	1,5 x 5,30	10	1,0
8	0,275	1176,28	0,2	1,5 x 5,30	10	2,0
AREIA						
9	0,18	1560,68	0,1	1,2 x 4,25	10	1,0
10	0,18	3121,36	0,2	1,2 x 4,25	10	2,0
11	0,18	1560,68	0,1	1,5 x 5,30	10	1,0
12	0,18	3121,36	0,2	1,5 x 5,30	10	2,0
13	0,256	1640,91	0,1	1,2 x 4,25	10	1,0
14	0,256	3281,82	0,2	1,2 x 4,25	10	2,0
15	0,256	1640,91	0,1	1,5 x 5,30	10	1,0
16	0,256	3281,82	0,2	1,5 x 5,30	10	2,0
ESFERA DE VIDRO						
17	1,55	1621,45	0,1	1,2 x 4,25	28	1,0
18	1,55	3242,47	0,2	1,2 x 4,25	28	2,0
19	2,18	1595,11	0,1	1,2 x 4,25	28	1,0
20	2,18	3190,22	0,2	1,2 x 4,25	28	2,0

Quadro 6 – Planejamento experimental.

Os ensaios experimentais com as partículas de esfera de vidro e com a placa distribuidora de ar de 1,5 x 5,30 mm não foram realizados, pois a partir de ensaios preliminares verificou-se que não era possível obter um número de pontos de frequência central suficientes na região de leito fluidizado como nos demais ensaios apresentados no Quadro 5.

Isso ocorreu devido o transdutor de pressão no *plenum* possuir uma faixa de pressão de 0 a 6.227 Pa. Com as partículas de esferas de vidro o transdutor não suportava a faixa utilizada para obter este número mínimo de pontos de frequência central suficientes na região de leito fluidizado, impossibilitando a obtenção dos resultados com a placa distribuidora de ar com 1,5 mm de diâmetro e 5,30 mm de espaçamento.

3.4.2 Procedimento Experimental.

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

1. Instalação da placa distribuidora e da placa de orifício conforme especificados no planejamento experimental;
2. Acionamento do inversor de frequência com intuito de verificar se havia vazamento na tubulação;
3. Alimentação do leito com as partículas sólidas pré-definidas que seriam utilizadas durante a realização do ensaio experimental;
4. Funcionamento do equipamento experimental, incluindo o computador;
5. Com o auxílio de um multímetro, verificação das duas baterias carregadas, isto é, cada uma delas deveria estar acusando tensão ao redor de 12 V;
6. Acionamento do *software* LabView™ versão 10.0 a ser utilizado e, através de uma corrida apenas com as baterias ligadas, confirmava-se se o mesmo encontrava-se em perfeito funcionamento, e com isso, a certeza que todos os fios que uniam os transdutores de pressão à placa de aquisição de dados estavam bem conectados;
7. Ativação do inversor de frequência, e aumentava-se gradativamente sua frequência a fim de verificar em que valor se atingia a vazão de ar

máxima, antes das partículas serem elutriadas do leito e em seguida reduzia-se a frequência do inversor até atingir a mínima fluidização, para conseguir no mínimo dez valores de pressão na região de leito fixo, o objetivo de acionar o inversor de frequência seria de verificar se os transdutores de pressão estavam indicando valores coerentes;

8. Acionamento do sistema de aquisição de dados e iniciava-se o ensaio experimental. Os dados coletados eram pressão no leito, velocidade superficial do ar, frequência do inversor, frequência central, pressão a montante, queda de pressão na placa de orifício e temperatura no leito, esses dados eram continuamente gravados em arquivos com extensão *.lvm*. Adicionalmente, eram realizadas anotações sobre as observações visuais do comportamento fluidodinâmico das partículas do leito para auxiliar nas análises dos resultados; Iniciação do experimento aumentando a frequência até atingir a vazão máxima pré-estabelecida no item 8.
9. Iniciação do experimento onde reduzia-se inversor de frequência em 0,33 Hz até atingir o regime de leito fixo;
10. Verificação dos dados, toda vez que o programa realizasse um loop, se estavam todos coerentes e analisava-se qual era o comportamento do leito em cada ponto adquirido.

Para cada ensaio experimental, foram coletados aproximadamente 50 pontos de tomadas de pressão no *plenum*, para que obtivesse um número suficiente tanto na região de fluidização, como também no regime de leito fixo.

Ao término de cada ensaio experimental, desligava-se todo equipamento experimental, inclusive o computador e retiravam-se todas as partículas do leito.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados os resultados referentes aos 20 ensaios experimentais realizados presentes no Quadro 6.

Os resultados obtidos no presente trabalho são apresentados em termos de perfis da frequência central sobre a curva fluidodinâmica para as partículas de areia, celulose microcristalina (CMC) e esfera de vidro, obtidos através da redução gradativa da velocidade superficial do ar de fluidização.

As Figuras 23 a 32 mostram os perfis da frequência central sobre a curva fluidodinâmica para as partículas de celulose microcristalina (CMC), areia e esfera de vidro, obtidos com a redução da velocidade superficial do ar. A região de defluidização é verificada mediante o registro em tempo real das flutuações de pressão estática no interior do leito e este fenômeno ocorre quando o valor da frequência central sofre um acréscimo quando o leito está tendendo à defluidização, isto é, quando a velocidade superficial do ar está próxima à velocidade do ar na mínima fluidização, o que pode ser verificado com o auxílio da curva fluidodinâmica.

Os resultados apresentados no presente trabalho seguiram a seguinte ordem:

1. Influência da Placa Distribuidora de Ar: comparando-se ambas as placas distribuidoras de ar com partículas de celulose microcristalina e areia de mesmo diâmetro e altura de leito fixo.
2. Comparação resumida de todos os resultados.
3. Influência na altura do leito fixo com partículas de esfera de vidro.
4. Comparação dos resultados da velocidade de mínima fluidização experimental com a velocidade de mínima fluidização da literatura, através da correlação de Ergun adaptada (1952).

Os resultados são descritos seguindo a ordem do Quadro 7 em relação a influência da placa distribuidora de ar na região de defluidização.

CELULOSE MICROCRISTALINA (CMC)	
Experimento 1	Tipo de partícula: CMC Diâmetro médio de partículas: 0,165 mm (grupo "A" de Geldart (1973)) Altura de leito fixo: 0,1 m Placas distribuidoras de ar: 1,2 x 4,25 mm e 1,5 x 5,30 mm
Experimento 2	Tipo de partícula: CMC Diâmetro médio de partículas: 0,165 mm (grupo "A" de Geldart (1973)) Altura de leito fixo: 0,2 m Placas distribuidoras de ar: 1,2 x 4,25 mm e 1,5 x 5,30 mm
Experimento 3	Tipo de partícula: CMC Diâmetro médio de partículas: 0,275 mm (grupo "B" de Geldart (1973)) Altura de leito fixo: 0,1 m Placas distribuidoras de ar: 1,2 x 4,25 mm e 1,5 x 5,30 mm
Experimento 4	Tipo de partícula: CMC Diâmetro médio de partículas: 0,275 mm (grupo "B" de Geldart (1973)) Altura de leito fixo: 0,2 m Placas distribuidoras de ar: 1,2 x 4,25 mm e 1,5 x 5,30 mm
AREIA	
Experimento 5	Tipo de partícula: Areia Diâmetro médio de partículas: 0,18 mm (grupo "B" de Geldart (1973)) Altura de leito fixo: 0,1 m Placas distribuidoras de ar: 1,2 x 4,25 mm e 1,5 x 5,30 mm
Experimento 6	Tipo de partícula: Areia Diâmetro médio de partículas: 0,18 mm (grupo "B" de Geldart (1973)) Altura de leito fixo: 0,2 m Placas distribuidoras de ar: 1,2 x 4,25 mm e 1,5 x 5,30 mm
Experimento 7	Tipo de partícula: Areia Diâmetro médio de partículas: 0,256 mm (grupo "B" de Geldart (1973)) Altura de leito fixo: 0,1 m Placas distribuidoras de ar: 1,2 x 4,25 mm e 1,5 x 5,30 mm
Experimento 8	Tipo de partícula: Areia Diâmetro médio de partículas: 0,256 mm (grupo "B" de Geldart (1973)) Altura de leito fixo: 0,2 m Placas distribuidoras de ar: 1,2 x 4,25 mm e 1,5 x 5,30 mm

ESFERA DE VIDRO	
Experimento 9	Tipo de partícula: Esfera de vidro Diâmetro médio de partículas: 1,55 mm (grupo "D" de Geldart (1973)) Placa distribuidora de ar: 1,2 x 4,25 mm Alturas de leito fixo: 0,1 e 0,2 m
Experimento 10	Tipo de partícula: Esfera de vidro Diâmetro médio de partículas: 2,18 mm (grupo "D" de Geldart (1973)) Placa distribuidora de ar: 1,2 x 4,25 mm Alturas de leito fixo: 0,1 e 0,2 m

Quadro 7 – Características dos experimentos.

4.1 INFLUÊNCIA DA PLACA DISTRIBUIDORA DE AR NA REGIÃO DE DEFLUIDIZAÇÃO

Neste tópico são comparados os resultados referentes a ambas as placas distribuidoras de ar, com partículas de mesmo diâmetro e altura do leito fixo, com intuito de analisar e discutir sobre a influência que a placa distribuidora de ar tem sobre a região de defluidização.

4.1.1 Experimento 1

A Figura 23 (a) e (b) refere-se às partículas de celulose microcristalina com diâmetro médio de 0,165 mm, altura de leito fixo de 0,1 m, equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h/d_i) de aproximadamente 1,0 e placas distribuidoras de ar com (a) diâmetro de orifício de 1,2 mm e espaçamento de 4,25 mm e (b) diâmetro de orifício de 1,5 mm e espaçamento de 5,30 mm.

Conforme os dados da Figura 23 (a) que encontram-se aproximadamente nos valores de velocidade de mínima fluidização 0,029 m/s, valores de frequência central de 6,4 Hz e pressão do leito de 432 Pa.

Já os dados da Figura 23 (b) com valores de velocidade de mínima fluidização 0,022 m/s, frequência central de 6,8 Hz e pressão do leito 380 Pa, aproximadamente.

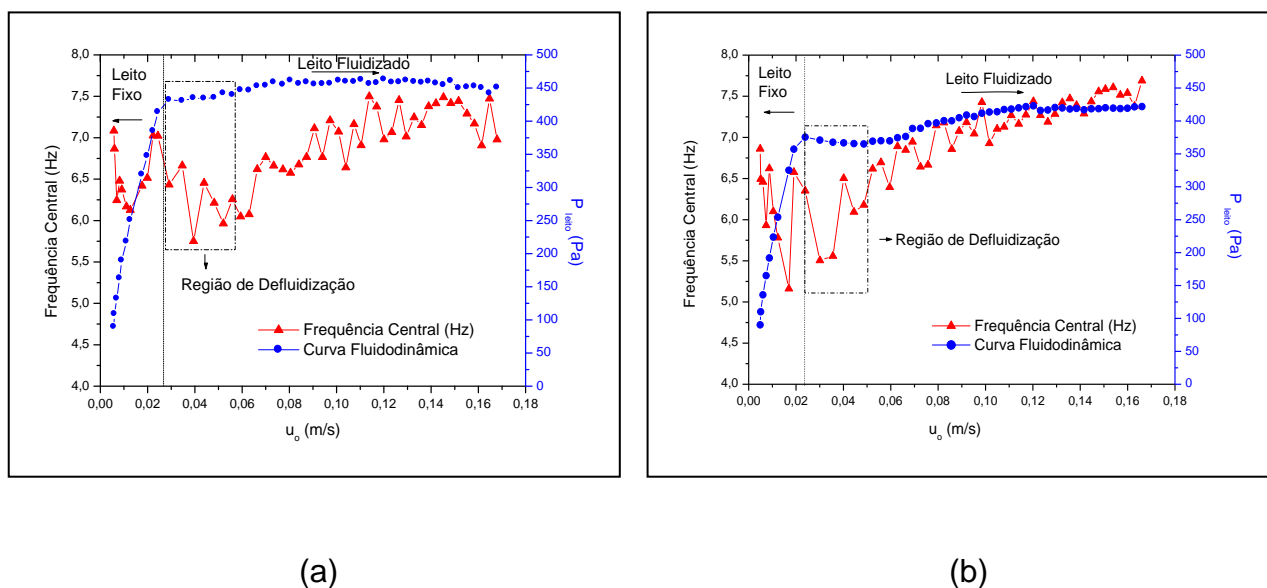


Figura 23 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de CMC com $d_p=0,165$ mm, $h_f=0,1$ m
(a) placa distribuidora de ar = 1,2 x 4,25 mm; (b) placa distribuidora de ar = 1,5 x 5,30 mm.

Na Figura 23 (a), em velocidade de aproximadamente 0,09 m/s até 0,17 m/s, verificou-se durante o experimento que o regime era do tipo borbulhante, com frequência central em torno de 7,2 Hz.

A frequência central decresce em torno de 6,5 Hz, com velocidade de 0,029 m/s até 0,09 m/s, observando ainda o regime borbulhante, com bolhas cada vez menores. Este regime foi verificado durante o ensaio, pois possuía características por obter frequência central em torno de 6 a 7 Hz, com bandas largas e frequências e amplitudes altas. Foi observado durante o experimento a presença de bolhas de diferentes tamanhos e velocidades de deslocamento.

No experimento foi encontrada a região de defluidização localizada entre 0,028 m/s até 0,058 m/s, com uma frequência central de 6,3 Hz, aproximadamente.

Esta região é definida por apresentar valores menores de frequência central em relação aos demais pontos da região de fluidização, atingindo o pico mínimo de frequência central de 5,7 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,04 m/s, e posteriormente, sofrer um acréscimo desta frequência até atingir o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 7,0 Hz.

O regime de leito fixo foi caracterizado durante o experimento por obter bandas largas e baixas amplitudes de flutuação de pressão com frequência central em torno de 6 a 8 Hz. Acredita-se que as pequenas flutuações de pressão

observadas em leito fixo são causadas pela vibração de algumas partículas durante a passagem do gás através do leito.

Assim, observou-se que a diferença entre o comportamento do regime de leito fixo e o regime de leito fluidizado está nas amplitudes dos componentes espectrais.

No regime de leito fixo, os componentes de frequência são mais altos, pois são responsáveis pelo deslocamento do valor médio da curva exponencial Gaussiana.

Já no regime de leito fluidizado, as amplitudes das linhas espectrais são responsáveis pela elevação do valor médio da curva Gaussiana, neste regime, possuem amplitudes que são de 10 a 18 vezes maiores do que as amplitudes dos componentes de mais alta frequência do leito fixo.

Na Figura 23 (b), em velocidade de aproximadamente 0,09 m/s até 0,17 m/s, verificou-se durante o experimento que o regime era do tipo borbulhante, com frequência central em torno de 7,3 Hz.

Quando a frequência central decresce em torno de 6,7 Hz, com velocidade de 0,022 m/s até 0,09 m/s, observou-se ainda o regime borbulhante, com bolhas cada vez menores, da mesma forma, este regime foi caracterizado pela obtenção de frequência em torno de 6 a 7 Hz, visualizado durante o ensaio por obter bandas largas e frequências e amplitudes altas.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,022 m/s até 0,05 m/s, com frequência central de 6,3 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 5,5 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,03 m/s. A partir deste instante, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,6 Hz. Novamente, observou-se durante o ensaio que o leito fixo obtinha bandas largas e baixas amplitudes de flutuação de pressão com frequência central em torno de 6 a 8 Hz.

Ainda na Figura 23 (b) observa-se que há um valor de frequência central menor já na região de leito fixo, com velocidade de aproximadamente 0,017 m/s, isso ocorre provavelmente pelo aparecimento de alguma bolha que influenciou no resultado.

De maneira geral, observa-se que é possível verificar a região de defluidização em ambas as placas distribuidoras de ar. No entanto, para a celulose microcristalina com diâmetro médio de 0,165 mm e altura de leito fixo de 0,1 m, verifica-se uma melhora na identificação da região de defluidização com a utilização da placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,5 mm e espaçamento de 5,30 mm.

4.1.2 Experimento 2

A Figura 24 (a) e (b) refere-se às partículas de CMC com diâmetro médio de partículas de 0,165 mm, altura de leito fixo de 0,2 m, equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h/d_t) de aproximadamente 2,0 e placas distribuidoras de ar com (a) diâmetro de orifício de 1,2 e espaçamento de 4,25 mm e (b) diâmetro de orifício de 1,5 e espaçamento de 5,30 mm.

De acordo com os dados da Figura 24 (a) encontram-se aproximadamente nos valores de velocidade de mínima fluidização 0,033 m/s, valores de frequência central de 6,5 Hz e pressão do leito de 851 Pa.

No entanto, os dados da Figura 24 (b) encontram-se nos valores de aproximadamente de velocidade de mínima fluidização 0,031 m/s, frequência central de 6,7 Hz e pressão do leito 824 Pa.

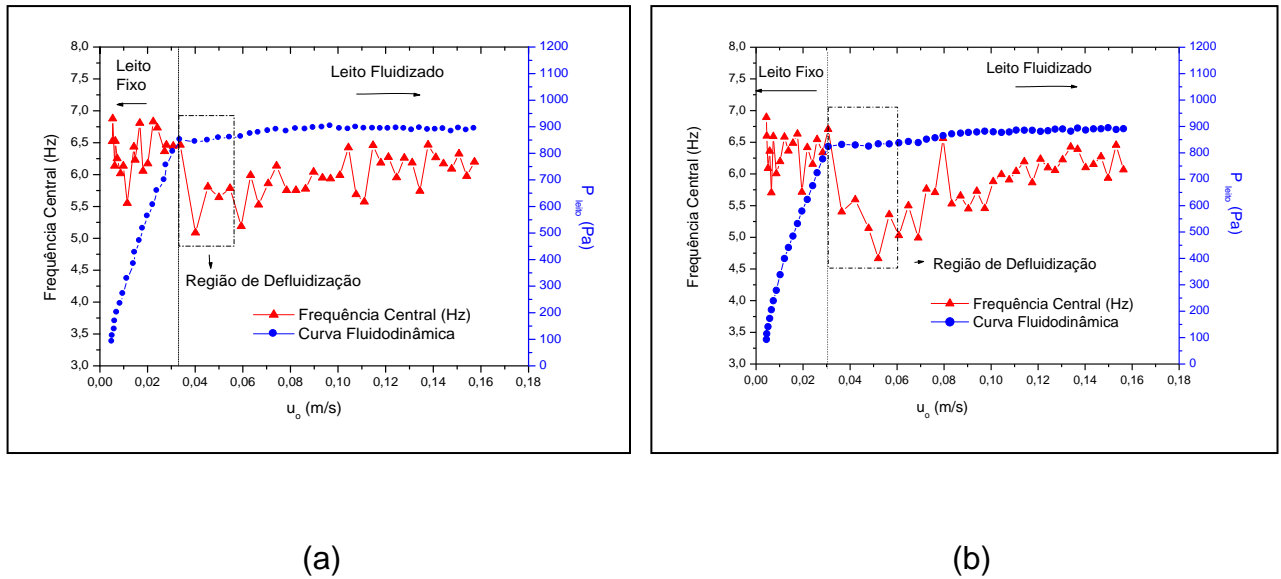


Figura 24 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de CMC com $d_p=0,165$ mm, $h_l=0,2$ m
(a) placa distribuidora de ar = 1,2 x 4,25 mm; (b) placa distribuidora de ar = 1,5 x 5,30 mm.

Na Figura 24 (a), em velocidade de aproximadamente 0,033 m/s até 0,16 m/s, verificou-se durante o experimento que o regime era do tipo borbulhante, com frequência central em torno de 6,0 Hz. Este regime foi caracterizado por obter bandas largas e amplitudes e frequência altas, e também pela formação de grandes bolhas que, a partir de uma determinada altura do leito, subiam individualmente, e as bolhas que se formavam não chagavam a ocupar toda a seção transversal do leito, por este motivo, não são consideradas *slugs*. Felipe (2004), afirma que a frequência central para este regime, se encontra em torno de 6 a 7 Hz.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,033 m/s até 0,055 m/s, com frequência central de 5,7 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 5,1 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,04 m/s. A partir deste instante, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,5 Hz. Este regime é verificado por obter frequência central em torno de 6 a 8 Hz, bandas largas e baixas amplitudes de flutuação de pressão, as quais são consequências da ausência de bolhas de ar.

Na Figura 24 (b), em velocidade de aproximadamente 0,03 m/s até 0,16 m/s, verificou-se durante o experimento que o regime era do tipo borbulhante, com frequência central em torno de 5,8 Hz. Novamente, este regime foi caracterizado por obter formação de grandes bolhas, que a partir de determinada altura do leito, subiam individualmente, e as bolhas que se formavam não chegavam a ocupar todo o diâmetro da coluna acrílica. Assim, por este motivo não se caracterizou como regime *slugging*. O regime borbulhante é verificado por obter frequência central de aproximadamente 6 a 7 Hz, com amplitudes e frequências altas e bandas largas.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,03 m/s até 0,06 m/s, com frequência central de 5,2 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 4,7 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,05 m/s, aproximadamente. A partir deste instante, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,7 Hz. Neste regime, como já mencionado, caracterizou-se pela obtenção de bandas largas e amplitudes de flutuação de pressão bem baixas, consequência da ausência de bolhas de ar. A frequência central no regime de leito fixo reside em torno de 6 a 8 Hz.

De maneira geral, observa-se que é possível verificar a região de defluidização em ambas as placas distribuidoras de ar. No entanto, para a celulose microcristalina com diâmetro médio de 0,165 mm e altura de leito fixo de 0,2 m, verifica-se maior clareza na identificação da região de defluidização com a utilização da placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,5 mm e espaçamento de 5,30 mm.

4.1.3 Experimento 3

A Figura 25 (a) e (b) refere-se às partículas de CMC com diâmetro médio de partículas de 0,275 mm, altura de leito fixo de 0,1 m, equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h/d_i) de aproximadamente 1,0 e placas distribuidoras de ar com (a) diâmetro de orifício de 1,2 e espaçamento de 4,25 mm e (b) diâmetro de orifício de 1,5 e espaçamento de 5,30 mm.

A Figura 25 (a) encontra-se valores de velocidade de mínima fluidização, frequência central e pressão do leito, de aproximadamente nos valores de 0,045 m/s, 6,8 Hz e 361 Pa, respectivamente.

Os dados da Figura 25 (b) de velocidade de mínima fluidização, frequência central e pressão do leito, encontram-se aproximadamente nos valores de 0,045 m/s, 6,9 Hz e 447 Pa, respectivamente.

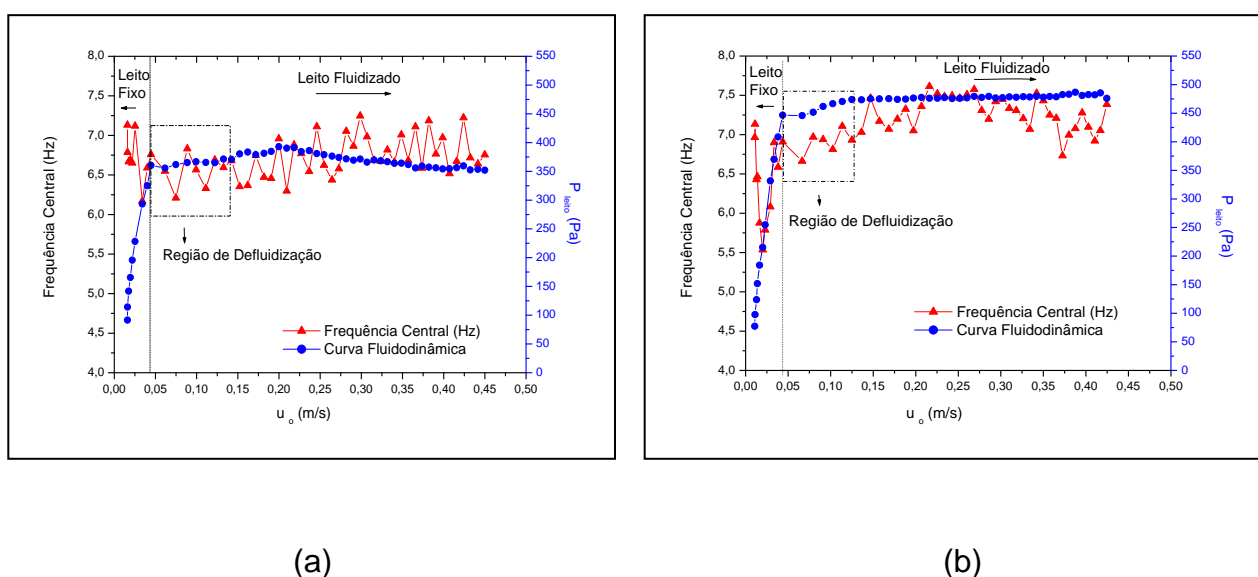


Figura 25 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de CMC com $d_p=0,275$ mm, $h_f=0,1$ m

(a) placa distribuidora de ar = 1,2 x 4,25 mm; (b) placa distribuidora de ar = 1,5 x 5,30 mm.

Observa-se que a Figura 25 possui dificuldades na detecção da região de defluidização, pois não há uma queda acentuada da frequência central.

Na Figura 25 (a), em velocidade de aproximadamente 0,04 m/s até 0,45 m/s, verificou-se durante o experimento que o regime era do tipo borbulhante, com frequência central em torno de 6,8 Hz. Este regime possui características de bandas largas e amplitudes e frequências altas em torno de 6 a 7 Hz. Observou-se durante o ensaio que possuía bolhas irregulares na forma e tamanho, outro motivo que caracterizou-se ser regime do tipo borbulhante.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,04 m/s até 0,15 m/s, com frequência central de 6,5 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 6,2 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,07 m/s. A partir deste instante, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,8 Hz. Já o regime de leito fixo foi caracterizado por apresentar frequência central em torno de 6 a 8 Hz, e o espectro da Transformada de Fourier apresentava bandas largas com baixas amplitudes de flutuação de pressão.

Já na Figura 25 (b), em velocidade de aproximadamente 0,04 m/s até 0,43 m/s, verificou-se durante o experimento que o regime era do tipo borbulhante, com frequência central em torno de 7,3 Hz. Este regime apresenta um espectro da Transformada de Fourier de banda larga e amplitudes e frequências altas. Estas frequências podem variar em torno de 6 a 7 Hz. O regime borbulhante foi observado também por apresentar tanto na forma quanto no seu tamanho bolhas irregulares durante o experimento.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,04 m/s até 0,13 m/s, com frequência central de 7,0 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 6,7 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,07 m/s. Posteriormente, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,8 Hz. Este regime é verificado por apresentar um espectro da Transformada de Fourier de bandas largas e amplitudes de flutuação de pressão bem baixas, isso ocorre devido à ausência de bolhas de ar durante o experimento.

Ainda na Figura 25 (b) observa-se que há um valor de frequência central menor já na região de leito fixo, com velocidade superficial do ar de 0,02 m/s, isso ocorre provavelmente pelo aparecimento de alguma bolha que influenciou no resultado.

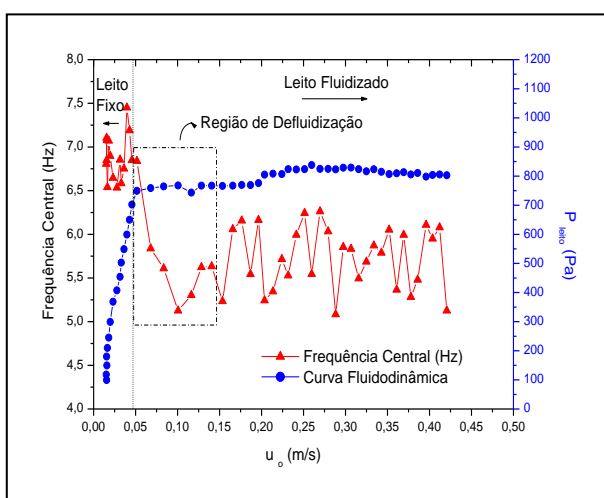
Neste caso, observou-se que é possível verificar a região de defluidização em ambas as placas distribuidoras de ar. No entanto, houve certa dificuldade em visualizar graficamente, assim analisa-se que para a celulose microcristalina com diâmetro médio de 0,275 mm e altura de leito fixo de 0,1 m verificou-se maior clareza na identificação da região de defluidização com a utilização da placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,2 mm e espaçamento de 4,25 mm.

4.1.4 Experimento 4

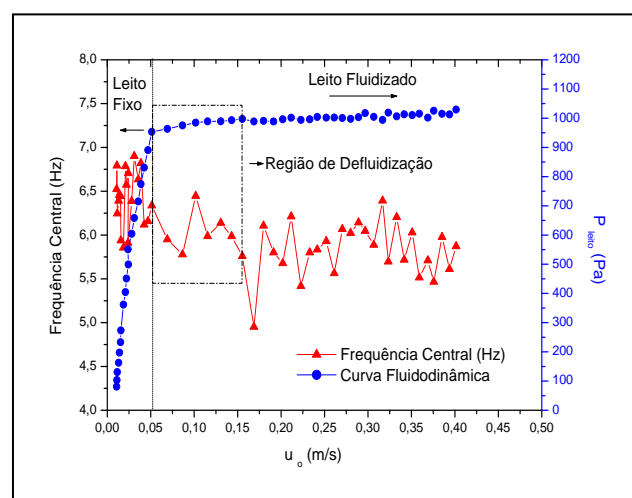
A Figura 26 (a) e (b) refere-se às partículas de CMC com diâmetro médio de partículas de 0,275 mm, altura de leito fixo de 0,2 m, equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h_i/d_i) de aproximadamente 2,0 e placas distribuidoras de ar com (a) diâmetro de orifício de 1,2 e espaçamento de 4,25 mm e (b) diâmetro de orifício de 1,5 e espaçamento de 5,30 mm.

Conforme os dados da Figura 26 (a) encontram-se aproximadamente nos valores de velocidade de mínima fluidização 0,051 m/s, valores de frequência central de 6,8 Hz e pressão do leito de 749 Pa.

Já os dados da Figura 26 (b) encontram-se nos valores de aproximadamente de velocidade de mínima fluidização 0,051 m/s, frequência central de 6,3 Hz e pressão do leito 953 Pa.



(a)



(b)

Figura 26 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de CMC com $d_p=0,275$ mm, $h_i=0,2$ m
(a) placa distribuidora de ar = 1,2 x 4,25 mm; (b) placa distribuidora de ar = 1,5 x 5,30 mm.

Por se tratar de leito mais pesado, ou seja, com altura de leito fixo de 0,2 m, é possível verificar em ambas as placas a presença de bolhas maiores, verificando o regime *slugging* em transição ao regime de leito fixo.

No entanto, durante o ensaio experimental referente à Figura 26 (a) verificou-se que o regime encontrado era do tipo *slugging* com frequência central em torno de 5,7 Hz, com velocidade de aproximadamente de 0,05 m/s até 0,43 m/s. O regime *slugging* foi observado, pois proporcionou frequências menores do que no regime borbulhante e também porque as bolhas caíam suavemente, deslizando pelas paredes em volta das elevações das grandes bolhas de gás.

O regime *slugging* foi caracterizado por apresentar banda pequena e estreita. Durante o experimento, observou-se que o espectro através da Transformada de Fourier apresentava apenas um pico, e isto deve-se ao fato que neste regime as bolhas apresentam tamanho mais uniforme, causando assim, a redução da banda do espectro.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,05 m/s até 0,15 m/s, com frequência central de 5,6 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 5,1 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,09 m/s. A partir disso, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 7,5 Hz. Este regime apresenta um espectro com bandas largas e com baixas amplitudes de flutuação de pressão, com frequência central em torno de 6 a 8 Hz.

Já na Figura 26 (b) observou-se durante o experimento que o regime encontrado era do tipo *slugging* com frequência central em torno de 5,8 Hz, com velocidade de aproximadamente de 0,05 m/s até 0,41 m/s. Novamente, o espectro da Transformada de Fourier apresentou apenas um único pico, ou seja, espectros com banda pequena e bem estreita, por isso caracterizou-se o regime do tipo *slugging*.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,05 m/s até 0,15 m/s, com frequência central de 6,0 Hz, aproximadamente.

Posteriormente, atinge-se o valor de frequência central de 5,7 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,08 m/s. A partir disso, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,8 Hz.

Foi observada a região de leito fixo, por apresentar frequência central em torno de 6,0 Hz e no espectro da Transformada de Fourier visualizava-se banda larga com baixas amplitudes de flutuações de pressão, características da ausência de bolhas de ar.

Ainda na Figura 26 (b) observa-se que há um valor de frequência central mínimo de 5,0 Hz, na região de leito fluidizado com velocidade superficial do ar de aproximadamente 0,17 m/s, isso ocorre provavelmente pelo aparecimento de alguma bolha que influenciou no resultado.

De maneira geral, observou-se que é possível verificar a região de defluidização em ambas as placas distribuidoras de ar. No entanto, para a celulose microcristalina com diâmetro médio de 0,275 mm e altura de leito fixo de 0,2 m, verifica-se maior clareza na identificação da região de defluidização com a utilização da placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,2 mm e espaçamento de 4,25 mm.

4.1.5 Experimento 5

A Figura 27 (a) e (b) refere-se às partículas de areia com diâmetro médio de partículas de 0,18 mm, altura de leito fixo de 0,1 m, equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h_i/d_i) de aproximadamente 1,0 e placas distribuidoras de ar com (a) diâmetro de orifício de 1,2 e espaçamento de 4,25 mm e (b) diâmetro de orifício de 1,5 e espaçamento de 5,30 mm.

De acordo com os dados da Figura 27 (a) que encontram-se aproximadamente nos valores de velocidade de mínima fluidização 0,032 m/s, valores de frequência central de 6,6 Hz e pressão do leito de 1111 Pa.

Já os dados da Figura 27 (b) encontram-se nos valores de aproximadamente de velocidade de mínima fluidização 0,024 m/s, frequência central de 6,8 Hz e pressão do leito 1053 Pa.

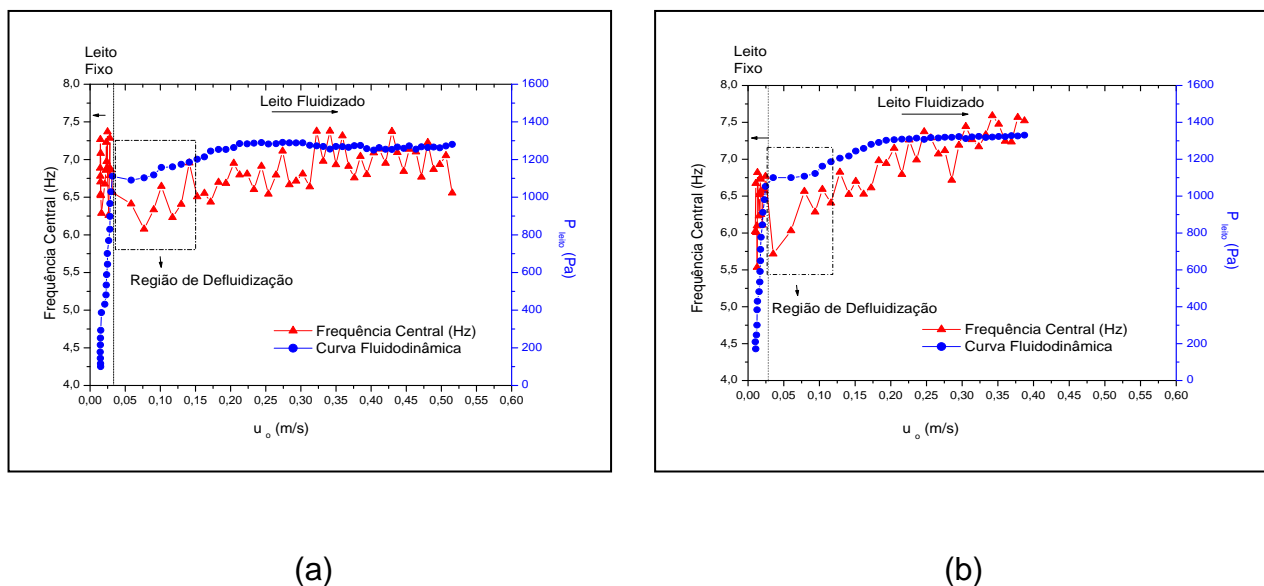


Figura 27 – Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Areia com $d_p=0,18$ mm, $h_i=0,1$ m
(a) placa distribuidora de ar = 1,2 x 4,25 mm; (b) placa distribuidora de ar = 1,5 x 5,30 mm.

Na Figura 27 (a), em velocidade de aproximadamente 0,30 m/s até 0,52 m/s, verificou-se durante o experimento que o regime era do tipo turbulento, com frequência central em torno de 7,0 Hz. Verificou-se que este regime de fluidização do tipo borbulhante.

Quando a frequência central decresce para 6,6 Hz, aproximadamente, com velocidade de 0,03 m/s até 0,30 m/s, observou-se que o regime ainda era borbulhante, com bolhas cada vez menores, até atingir a região de leito fixo. Caracterizou-se o regime do tipo borbulhante, pois durante o experimento apresentava bolhas de fluido de formas irregulares, as quais subiam quase continuamente através do leito, e explodiam na extremidade do mesmo. Este tipo de espectro apresenta frequência central em torno de 6 a 7 Hz, com amplitudes altas.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,03 m/s até 0,15 m/s, com frequência central de 6,5 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 6,1 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,075 m/s. A partir deste instante, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 7,4 Hz. Neste sentido, verificou-se o regime de leito fixo, pois apresentou frequência central em torno de 6 a 8 Hz, com espectros da

Transformada de Fourier com bandas largas e baixas amplitudes de flutuação de pressão, que são consequências da ausência de bolhas de ar.

Já na Figura 27 (b), em velocidade de aproximadamente 0,28 m/s até 0,38 m/s, através de observações visuais durante o experimento verificou-se que o regime de fluidização era do tipo borbulhante, com frequência central em torno de 7,3 Hz.

Quando a frequência central decresce para 6,8 Hz, aproximadamente, com velocidade de 0,28 m/s até 0,03 m/s, o regime ainda era borbulhante, porém, com bolhas cada vez menores, até atingir a região de leito fixo. Verificou-se o regime borbulhante, pois apresentou-se frequência central em torno de 6 a 7 Hz, com banda larga e amplitudes altas.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,03 m/s até 0,12 m/s, com frequência central de 6,5 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 5,7 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,035 m/s. A partir deste instante, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,8 Hz. Observou-se o regime de leito fixo por apresentar um espectro da Transformada de Fourier com bandas largas e baixas amplitudes de flutuação de pressão. A frequência central neste regime apresenta uma faixa de 6 a 8 Hz.

Ainda na Figura 27 (b) observa-se que há um valor de frequência central menor já na região de leito fixo, com velocidade superficial do gás de 0,01 m/s e frequência central de 5,5 Hz, isso ocorre provavelmente pelo aparecimento de alguma bolha que influenciou no resultado.

De maneira geral, observou-se que é possível verificar a região de defluidização em ambas as placas distribuidoras de ar. No entanto, para a areia com diâmetro médio de 0,18 mm e altura de leito fixo de 0,1 m, verifica-se maior clareza na identificação da região de defluidização com a utilização da placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,5 mm e espaçamento de 5,30 mm.

4.1.6 Experimento 6

A Figura 28 (a) e (b) refere-se às partículas de areia com diâmetro médio de partículas de 0,18 mm, altura de leito fixo de 0,2 m, equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h_i/d_i) de aproximadamente 2,0 e placas distribuidoras de ar com (a) diâmetro de orifício de 1,2 e espaçamento de 4,25 mm e (b) diâmetro de orifício de 1,5 e espaçamento de 5,30 mm.

Dados da Figura 28 (a) como velocidade de mínima fluidização, frequência central e pressão do leito, são respectivamente, 0,038 m/s, 6,3 Hz e 2251 Pa.

No entanto, os dados da Figura 28 (b) encontram-se com valores de velocidade de mínima fluidização de 0,038 m/s, frequência central de 6,6 Hz e pressão do leito 2389 Pa.

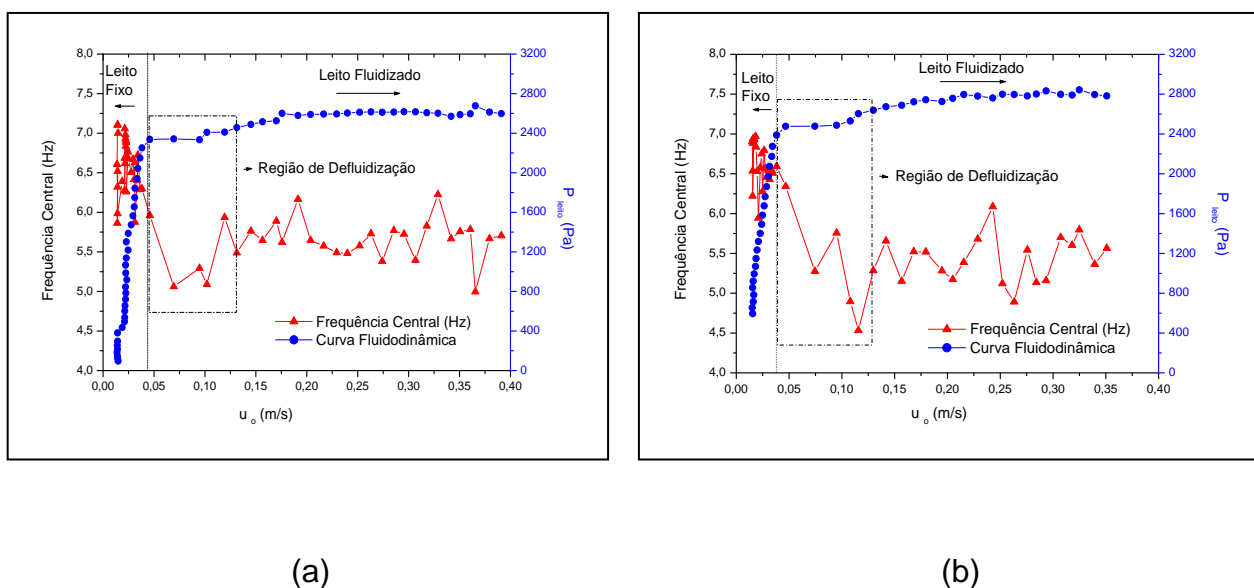


Figura 28 – Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Areia com $d_p=0,18$ mm, $h_i=0,2$ m
(a) placa distribuidora de ar = 1,2 x 4,25 mm; (b) placa distribuidora de ar = 1,5 x 5,30 mm.

Por se tratar de leito com mais partículas, ou seja, com altura de leito fixo de 0,2 m, é possível verificar através de observações visuais que em ambas as placas há presença de bolhas maiores, verificando o regime *slugging* em transição ao regime de leito fixo.

Portanto, durante o ensaio experimental referente à Figura 28 (a) verificou-se que o regime de fluidização visualizado era do tipo *slugging* com frequência central em torno de 5,7 Hz, com velocidade de aproximadamente de 0,04 m/s até 0,39 m/s. Neste sentido, observou-se este tipo de regime de fluidização, pois o espectro da Transformada de Fourier apresentava banda pequena e estreita, as bolhas tinham tamanho mais uniforme, causando a redução da banda do espectro.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,13 m/s até 0,05 m/s, com frequência central de 5,5 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 5,1 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,07 m/s. A partir disso, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,5 Hz.

Já na Figura 28 (b) observou-se durante o experimento que o regime encontrado era do tipo *slugging* com frequência central em torno de 5,5 Hz, com

velocidade de aproximadamente de 0,04 m/s até 0,36 m/s. O regime do tipo *slugging* apresentava banda pequena e estreita, o espectro foi caracterizado por um único pico, que ocorreu devido ao fato que neste regime as bolhas apresentavam tamanho mais uniforme, causando assim a redução da banda do espectro. As bolhas de gás aumentavam conforme subiam e para um leito consideravelmente profundo e de diâmetro pequeno, estas bolhas eventualmente tornavam-se grande o suficiente para se expandirem pela coluna.

Analizou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,04 m/s até 0,12 m/s, com frequência central de 5,2 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 4,5 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,11 m/s. A partir disso, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,6 Hz. Este regime foi observado durante o experimento por apresentar frequência central em torno de 6 a Hz e bandas largas e com baixas amplitudes de flutuação de pressão no espectro da Transformada de Fourier, verificando assim, a ausência de bolhas de ar neste regime.

De maneira geral, observou-se que é possível verificar a região de defluidização em ambas as placas distribuidoras de ar. No entanto, para a areia com diâmetro médio de 0,18 mm e altura de leito fixo de 0,2 m, verifica-se maior clareza na identificação da região de defluidização com a utilização da placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,2 mm e espaçamento de 4,25 mm.

4.1.7 Experimento 7

A Figura 29 (a) e (b) refere-se às partículas de areia com diâmetro médio de partículas de 0,256 mm, altura de leito fixo de 0,1 m, equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h_i/d_i) de aproximadamente 1,0 e placas distribuidoras de ar com (a) diâmetro de orifício de 1,2 e espaçamento de 4,25 mm e (b) diâmetro de orifício de 1,5 e espaçamento de 5,30 mm.

Dados da Figura 29 (a) encontram-se aproximadamente nos valores de velocidade de mínima fluidização 0,075 m/s, valores de frequência central de 5,4 Hz e pressão do leito de 793 Pa.

Já os dados da Figura 29 (b) encontram-se nos valores de aproximadamente de velocidade de mínima fluidização 0,075 m/s, frequência central de 5,7 Hz e pressão do leito 1128 Pa.

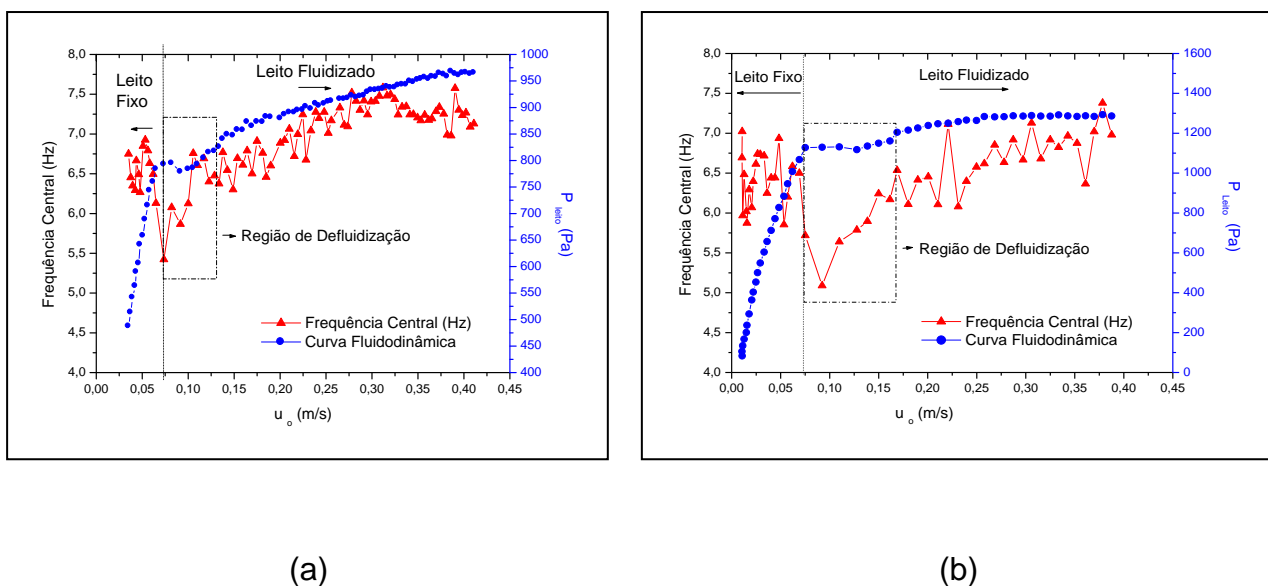


Figura 29 – Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Areia com $d_p=0,256$ mm, $h_l=0,1$ m
(a) placa distribuidora de ar = 1,2 x 4,25 mm; (b) placa distribuidora de ar = 1,5 x 5,30 mm.

Na Figura 29 (a), em velocidade de aproximadamente 0,075 m/s até 0,43 m/s, verificou-se durante o experimento que o regime era do tipo borbulhante, com frequência central em torno de 7,2 Hz. Observou-se este regime de fluidização durante o ensaio, pois a frequência central encontrava-se em torno de 6 a 7 Hz, com banda larga e amplitudes altas. O regime borbulhante é caracterizado pela formação de grandes bolhas que, a partir de uma determinada altura do leito, sobem individualmente, as bolhas que se formam não chegam a ocupar toda a seção transversal do leito, e por este motivo, não são consideradas slugs.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,075 m/s até 0,13 m/s, com frequência central de 6,7 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 5,4 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,075 m/s. A partir deste instante, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 7,0 Hz.

Na Figura 29 (b), em velocidade de aproximadamente 0,075 m/s até 0,41 m/s, verificou-se durante o experimento que o regime era do tipo borbulhante, com frequência central em torno de 6,8 Hz. Este regime apresenta espectro com bandas largas e amplitudes e frequências altas.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,075 m/s até 0,18 m/s, com frequência central de 5,7 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 5,1 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,085 m/s. A partir deste instante, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,5 Hz.

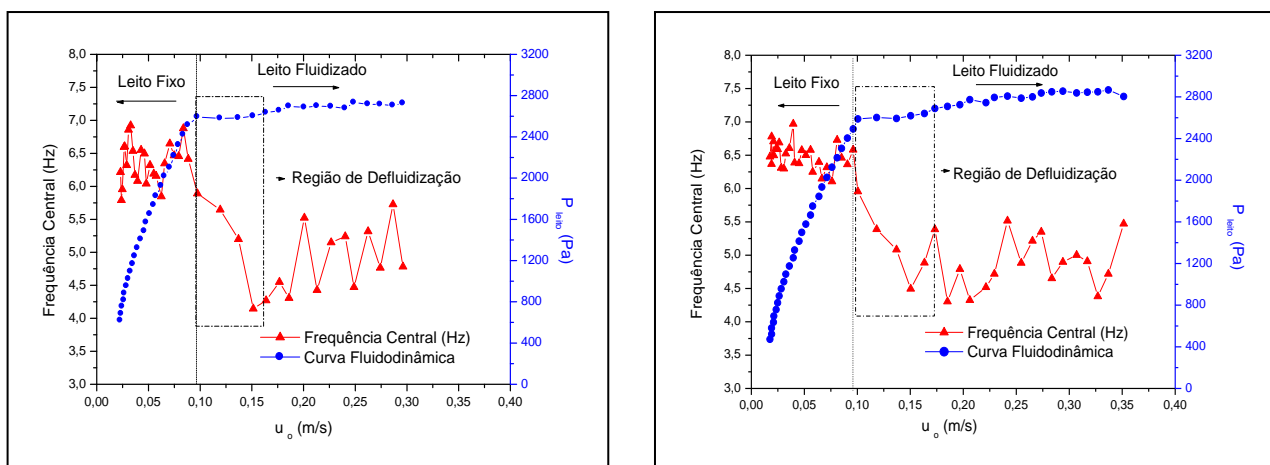
Neste caso, observou-se que é possível verificar a região de defluidização em ambas as placas distribuidoras de ar. No entanto, analisa-se que para a areia com diâmetro médio de 0,256 mm e altura de leito fixo de 0,1 m verificou-se maior clareza na identificação da região de defluidização com a utilização da placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,5 mm e espaçamento de 5,30 mm.

4.1.8 Experimento 8

A Figura 30 (a) e (b) refere-se às partículas de areia com diâmetro médio de partículas de 0,256 mm, altura de leito fixo de 0,2 m, equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h_i/d_i) de aproximadamente 2,0 e placas distribuidoras de ar com (a) diâmetro de orifício de 1,2 e espaçamento de 4,25 mm e (b) diâmetro de orifício de 1,5 e espaçamento de 5,30 mm.

De acordo com os dados da Figura 30 (a) como velocidade de mínima fluidização, frequência central e pressão do leito, são respectivamente, 0,088 m/s, 6,4 Hz e 2515 Pa.

Já os dados da Figura 30 (b) encontram-se nos valores de aproximadamente de velocidade de mínima fluidização 0,096 m/s, frequência central de 6,6 Hz e pressão do leito 2493 Pa.



(a)

(b)

Figura 30 – Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Areia com $d_p=0,256$ mm, $h_1=0,2$ m
(a) placa distribuidora de ar = 1,2 x 4,25 mm; (b) placa distribuidora de ar = 1,5 x 5,30 mm.

Por se tratar de leito com mais material sólido, ou seja, com altura de leito fixo de 0,2 m, é possível verificar em ambas as placas a presença de bolhas maiores, verificando o regime *slugging* em transição ao regime de leito fixo.

No entanto, na Figura 30 (a) visualiza-se no experimento que o regime de fluidização encontrado era do tipo *slugging* com frequência central em torno de 5,0 Hz, com velocidade de aproximadamente 0,09 m/s até 0,29 m/s. Verifica-se neste regime, que possui valores menores de frequência central comparado ao regime borbulhante. Com isso, o regime *slugging* é caracterizado por apresentar um espectro com banda pequena e estreita, com um único pico, isto deve-se ao fato das bolhas apresentarem tamanho mais uniforme, causando assim a redução da banda do espectro. As bolhas de gás coalescem e aumentam conforme sobem e em um leito consideravelmente profundo e de diâmetro pequeno, elas se tornam grandes o suficiente para se expandirem pela coluna.

Analisou-se durante a realização do ensaio que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,09 m/s até 0,17 m/s, com frequência central em torno de 4,5 Hz.

Posteriormente, atinge-se um valor mínimo de frequência central de 4,3 Hz, com velocidade superficial de ar de 0,14 m/s. A partir disso, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,9 Hz.

Já na Figura 30 (b) visualiza-se no experimento que o regime de fluidização encontrado era do tipo *slugging* com frequência central em torno de 4,8 Hz, com velocidade de aproximadamente 0,09 m/s até 0,35 m/s. Novamente, este regime é visualizado por apresentar banda pequena e estreita no espectro da Transformada de Fourier.

Analisou-se durante a realização do ensaio que a região de defluidização encontrava-se em torno de 0,09 m/s até 0,17 m/s, com frequência central em torno de 4,8 Hz.

Posteriormente, atinge-se um valor mínimo de frequência central de 4,5 Hz, com velocidade superficial de ar de 0,14 m/s. A partir disso, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,7 Hz.

De maneira geral, observou-se que é possível verificar a região de defluidização em ambas as placas distribuidoras de ar. No entanto, para a areia com diâmetro médio de 0,256 mm e altura de leito fixo de 0,2 m, verifica-se maior clareza na identificação da região de defluidização com a utilização da placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,2 mm e espaçamento de 4,25 mm.

4.2 COMPARAÇÃO RESUMIDA DOS RESULTADOS

No Quadro 8 é apresentado o resumo dos resultados obtidos nos testes, a fim de facilitar a compreensão entre estes em termos da influência do diâmetro de orifício da placa distribuidora de ar na região de defluidização.

CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO	DIÂMETRO DE ORIFÍCIO DA PLACA DISTRIBUIDORA DE AR QUE OBTVE MELHOR DESEMPENHO NA IDENTIFICAÇÃO DA REGIÃO DE DEFLUIDIZAÇÃO (mm)
CELULOSE MICROCRISTALINA (CMC)	
CMC: $d_p = 0,165$ mm; $h_l = 0,1$ m	1,5
CMC: $d_p = 0,165$ mm; $h_l = 0,2$ m	1,5
CMC: $d_p = 0,275$ mm; $h_l = 0,1$ m	1,2
CMC: $d_p = 0,275$ mm; $h_l = 0,2$ m	1,2
AREIA	
Areia: $d_p = 0,18$ mm; $h_l = 0,1$ m	1,5
Areia: $d_p = 0,18$ mm; $h_l = 0,2$ m	1,2
Areia: $d_p = 0,256$ mm; $h_l = 0,1$ m	1,5
Areia: $d_p = 0,256$ mm; $h_l = 0,2$ m	1,2

Quadro 8 – Comparação resumida da placa que obteve o melhor desempenho na identificação da região de defluidização.

Nos experimentos 1 e 2, as partículas possuem classificação de Geldart (1973) do Tipo A, ou seja, são partículas finas e mais leves, e evidenciaram melhores resultados na região de defluidização, com a placa de 1,5 mm de diâmetro de orifício da placa distribuidora de ar.

Já nos experimentos 3 e 4, as partículas têm classificação de Geldart (1973) do Tipo B, são partículas pequenas, e mostraram ter melhores resultados na região de defluidização, com a placa de 1,2 mm de diâmetro de orifício.

Nos experimentos 5 e 7, partículas com classificação de Geldart (1973) do Tipo B, evidenciaram melhores resultados na região de defluidização, com a placa distribuidora de ar de 1,5 mm de diâmetro de orifício.

E nos experimentos 6 e 8, também com classificação de Geldart (1973) do Tipo B, foi evidenciado melhores resultados na identificação da região de defluidização com a placa distribuidora de ar de 1,2 mm de diâmetro de orifício.

4.3 INFLUÊNCIA NA ALTURA DO LEITO FIXO COM PARTÍCULAS DE ESFERA DE VIDRO

A seguir são apresentados os resultados experimentais obtidos com partículas de esfera de vidro.

4.3.1 Experimento 9

A Figura 31 (a) e (b) refere-se às partículas de esferas de vidro com diâmetro médio de 1,55 mm, placa distribuidora de ar de 1,2 mm de diâmetro de orifício e 4,25 mm de espaçamento, altura de leito fixo (a) 0,1 m – equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h_i/d_i) de aproximadamente 1,0 e (b) 0,2 m - equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h_i/d_i) de aproximadamente de 2,0 m.

Os valores da Figura 31 (a) encontram-se aproximadamente para a velocidade de mínima fluidização 0,84 m/s, frequência central de 6,3 Hz e pressão do leito 1693 Pa.

Já os dados da Figura 31 (b) encontram-se nos valores de aproximadamente de velocidade de mínima fluidização 0,83 m/s, frequência central de 6,2 Hz e pressão do leito 3467 Pa.

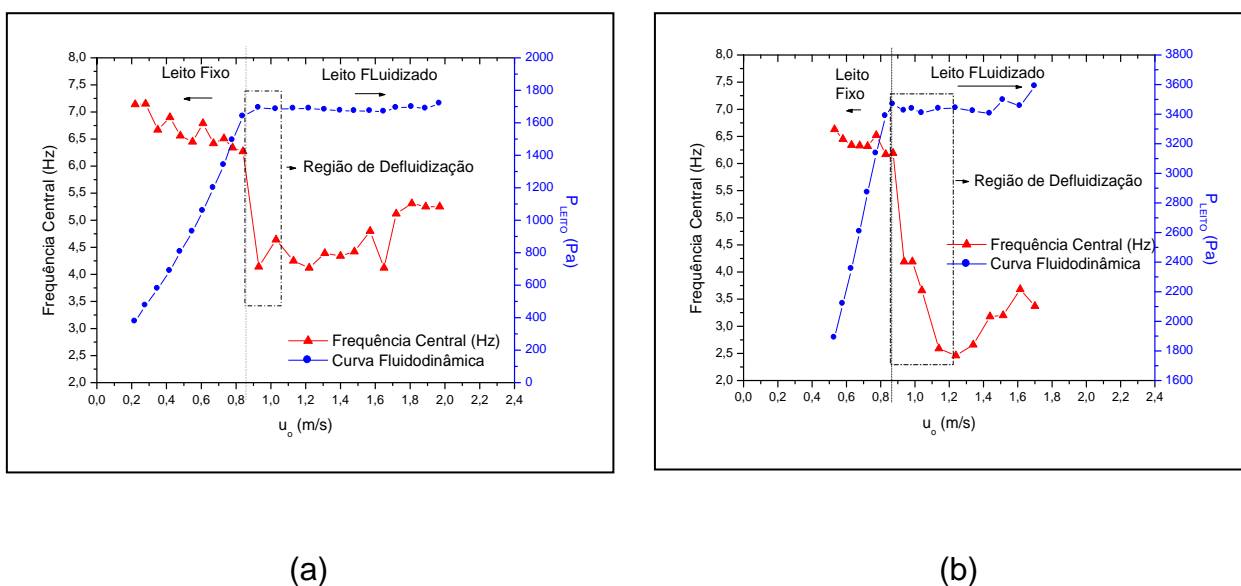


Figura 31 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Esferas de Vidro com $d_p=1,55$ mm, placa distribuidora de ar = $1,2 \times 4,25$ mm
(a) $h_1=0,1$; (b) $h_1=0,2$.

Na Figura 31 (a), para velocidades de aproximadamente 0,85 m/s até 2,0 m/s, verificou-se durante o experimento, que o regime era do tipo borbulhante, com frequência central em torno de 5,0 Hz. Neste regime, foram observadas bolhas irregulares tanto na forma como no tamanho delas. A frequência central foi próxima de 6 Hz, como normalmente encontrado com outras partículas. O espectro da Transformada de Fourier apresentou bandas largas e altas amplitudes.

Durante a realização do experimento foi encontrado que a região de defluidização apresentava-se na velocidade do gás entre 0,85 m/s até 1,1 m/s, com frequência central de 4,2 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 4,2 Hz, com velocidade superficial do gás de 0,09 m/s. A partir deste instante, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,4 Hz. A frequência central comparada ao regime borbulhante foi bem mais alta, em torno de 6 a 8 Hz, caracterizado pelo regime de leito fixo.

No entanto, durante o ensaio experimental referente à Figura 31 (b) verificou-se que o regime de fluidização visualizado era próximo ao tipo *slugging* com frequência central em torno de 3,5 Hz, tendo velocidade do gás de aproximadamente de 1,25 m/s até 1,7 m/s. O regime *slugging* é caracterizado por apresentar um espectro de banda pequena e estreita, com frequência em torno de 2

a 3 Hz. Este regime é visualizado por apresentar um único pico e isto deve-se ao fato das bolhas apresentarem tamanhos mais uniformes, causando assim a redução da banda do espectro.

Próximo da região de defluidização, o regime era do tipo borbulhante, com velocidade de 0,85 m/s até 1,25 m/s, aproximadamente.

N região de defluidização, atinge-se um valor mínimo de frequência central de 2,5 Hz, com velocidade superficial do gás de 1,15 m/s. A partir disso, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,5 Hz.

Verifica-se que o aumento da altura do leito resultou em valores menores da frequência central (Figura 31 (b)). Isto ocorreu porque em velocidades superficiais do ar superiores a 1,0 m/s, observou-se, durante a realização do experimento, a presença de bolhas de ar que atingiam praticamente todo o diâmetro da coluna de fluidização.

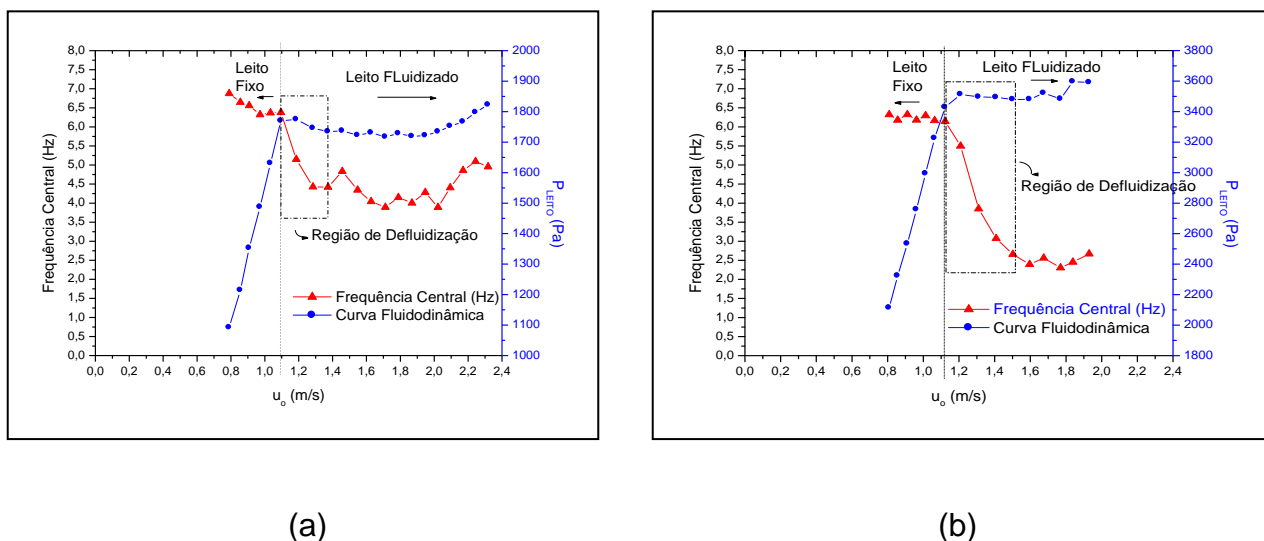
Percebe-se ainda que, conforme há um aumento na altura do leito fixo, há um acréscimo significativo nos valores de pressão. Isto é explicado pelo aumento da massa de sólidos no leito.

4.3.2 Experimento 10

A Figura 32 (a) e (b) refere-se à partículas de esferas de vidro com diâmetro de 2,18 mm, placa distribuidora de ar de 1,2 mm de diâmetro de orifício e 4,25 mm de espaçamento entre os orifícios, altura de leito fixo (a) 0,1 m – equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h/d_t) de aproximadamente 1,0 e (b) 0,2 m - equivalendo a uma relação altura de leito – diâmetro interno da coluna (h/d_t) de aproximadamente de 2,0 m.

Conforme os dados da Figura 32 (b) que se encontram nos valores de aproximadamente de velocidade de mínima fluidização 1,09 m/s, frequência central de 6,4 Hz e pressão do leito 1770 Pa.

No entanto, os dados da Figura 32 (b) encontram-se nos valores de aproximadamente de velocidade de mínima fluidização 1,12 m/s, frequência central de 6,1 Hz e pressão do leito 3420 Pa.



**Figura 32 - Evolução da frequência central e curva fluidodinâmica de partículas de Esferas de Vidro com $d_p=2,18$ mm, placa distribuidora de ar = $1,2 \times 4,25$ mm
(a) $h_1=0,1$; (b) $h_1=0,2$.**

Na Figura 32 (a), em velocidade de aproximadamente 1,1 m/s até 2,3 m/s, verificou-se durante o experimento que o regime era do tipo borbulhante, com frequência central em torno de 4,3 Hz. O espectro neste regime foi visualizado com banda larga e amplitude e frequência altas.

Analisou-se durante a realização do experimento que a região de defluidização encontrava-se em torno de 1,1 m/s até 1,4 m/s, com frequência central de 4,5 Hz, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 4,5 Hz, com velocidade superficial do gás de 1,2 m/s. A partir deste instante, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,5 Hz.

No entanto, durante o ensaio experimental referente à Figura 32 (b) verificou-se que o regime de fluidização visualizado era do tipo *slugging* com frequência central em torno de 2,3 Hz, com velocidade de aproximadamente de 1,6 m/s até 2,0 m/s. Este regime é caracterizado como já mencionado anteriormente por obter uma banda pequena e estreita, o espectro é caracterizado por um único pico, e isso ocorre devido ao fato que neste regime as bolhas apresentam tamanho mais uniforme, causando assim a redução da banda do espectro.

As bolhas de gás aumentavam conforme subiam e em um leito consideravelmente profundo e de diâmetro pequeno, elas podiam eventualmente se tornar grande o suficiente para se expandirem pela célula.

Neste regime, com partículas maiores, a porção do leito acima das bolhas era empurrada para cima, como um pistão; partículas caíam para o *slug* de baixo, e conforme iam subindo, as porções de sólidos desapareciam. Após esse tempo outros *slugs* formavam-se, e o movimento oscilatório repetia-se continuamente.

Quando se aproxima da região de defluidização, o regime era do tipo borbulhante, com velocidade de 1,1 m/s até 1,6 m/s, aproximadamente.

Atinge-se um valor mínimo de frequência central de 2,3 Hz, com velocidade superficial do gás de 1,4 m/s. A partir disso, a frequência central sofre um acréscimo e alcança o regime de leito fixo, com frequência central de aproximadamente 6,3 Hz.

As características do regime de leito fixo eram obtidas através de um espectro com bandas largas e baixas amplitudes de flutuação de pressão, e que eram consequências da ausência de bolhas de ar.

Verifica-se que mesmo com a utilização de partículas maiores e com leitos mais profundos, foi possível observar claramente a região de defluidização. Adicionalmente, assim como verificado na Figura 31 (b), a mudança de regime fluidodinâmico pode ser detectada na Figura 32 (b), indicando que a metodologia empregada pode ser utilizada também para a identificação de regimes fluidodinâmicos de partículas maiores, como as do grupo D de Geldart.

Percebe-se também que conforme há um aumento na altura do leito fixo, há um acréscimo significativo nos valores de pressão.

4.4 COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO EXPERIMENTAL COM A LITERATURA

Comparando-se a velocidade de mínima fluidização experimental com a velocidade de mínima fluidização através da correlação de Ergun (1952), obtêm-se resultados apresentado no Quadro 9.

Ensaio Experimental	Diâmetro de Partículas (mm)	Altura de Leito Fixo (m)	Diâmetro de Orifício x Espaçamento da Placa Distribuidora de Ar (mm)	Relação aproximada da altura de leito fixo - diâmetro interno da coluna	Velocidade de mínima fluidização experimental (m/s)	Velocidade de mínima fluidização da literatura* (m/s)
CELULOSE MICROCRISTALINA (CMC)						
1	0,165	0,1	1,2 x 4,25	1,0	0,029	0,023
2	0,165	0,2	1,2 x 4,25	2,0	0,033	
3	0,165	0,1	1,5 x 5,30	1,0	0,022	
4	0,165	0,2	1,5 x 5,30	2,0	0,031	
5	0,275	0,1	1,2 x 4,25	1,0	0,045	0,063
6	0,275	0,2	1,2 x 4,25	2,0	0,051	
7	0,275	0,1	1,5 x 5,30	1,0	0,044	
8	0,275	0,2	1,5 x 5,30	2,0	0,051	
AREIA						
9	0,18	0,1	1,2 x 4,25	1,0	0,032	0,037
10	0,18	0,2	1,2 x 4,25	2,0	0,038	
11	0,18	0,1	1,5 x 5,30	1,0	0,024	
12	0,18	0,2	1,5 x 5,30	2,0	0,038	
13	0,256	0,1	1,2 x 4,25	1,0	0,075	0,074
14	0,256	0,2	1,2 x 4,25	2,0	0,088	
15	0,256	0,1	1,5 x 5,30	1,0	0,075	
16	0,256	0,2	1,5 x 5,30	2,0	0,096	
ESFERA DE VIDRO						
17	1,55	0,1	1,2 x 4,25	1,0	0,840	1,32
18	1,55	0,2	1,2 x 4,25	2,0	0,830	
19	2,18	0,1	1,2 x 4,25	1,0	1,090	1,67
20	2,18	0,2	1,2 x 4,25	2,0	1,120	

*Correlação de Ergun (1952).

Quadro 9 – Comparação da velocidade de mínima fluidização experimental com a velocidade de mínima fluidização da literatura.

Como já mencionado no presente trabalho, a correlação de Ergun (1952) depende de fatores como:

- Porosidade na mínima fluidização;
- Viscosidade dinâmica do fluido;
- Esfericidade da partícula;
- Diâmetro médio da partícula;
- Densidade da partícula;
- Densidade do fluido e gravidade.

Portanto, a velocidade de mínima fluidização independe de fatores como altura do leito fixo e placa distribuidora de ar.

Observa-se que os valores de velocidade de mínima fluidização experimental obtiveram valores muito próximos aos da literatura, comprovando-se experimentalmente.

Os valores mais distantes em relação a correlação de Ergun (1952) podem ser devido aos valores diferentes de porosidade na mínima fluidização ($\epsilon_{mf} = 0,5$ utilizada em todos os ensaios).

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível verificar a importância da influência do diâmetro de orifício da placa distribuidora na região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido, baseada na Transformada de Fourier de sinais de pressão e na Distribuição Exponencial Gaussiana.

Em relação à metodologia empregada, pode-se identificar claramente a região onde o leito está defluidizando, mostrando ser eficaz para partículas do tipo A, B e D de Geldart (1973).

Portanto, ao analisar os dados experimentais, verifica-se que houve influência do diâmetro de orifício da placa distribuidora na região de defluidização em leito fluidizado gás-sólido utilizando Análise Espectral Gaussiana, comprovando a hipótese sugerida.

Assim, para a celulose microcristalina verificou-se que com diâmetro médio da partícula de 0,165 mm e altura de leito fixo 0,1 m e 0,2 m, obtiveram resultados com maior clareza na identificação da região de defluidização utilizando a placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,5 mm e espaçamento de 5,30 mm.

Para o diâmetro médio de partícula de 0,275 mm e altura de leito fixo de 0,1 m e 0,2 m, obtiveram resultados com maior clareza na identificação da região de defluidização utilizando a placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,2 mm e espaçamento de 4,25 mm.

Já para as partículas de areia com diâmetro médio de 0,18 e 0,256 mm e com altura de leito fixo de 0,1 para ambas, obtiveram-se resultados com maior clareza na identificação da região de defluidização utilizando a placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,5 mm e espaçamento de 5,30 mm.

E para o diâmetro médio de 0,18 mm e 0,256 mm com altura de leito fixo de 0,2 m para ambas, obtiveram resultados com maior clareza na identificação da região de defluidização utilizando a placa distribuidora de ar com diâmetro de orifício de 1,2 mm e espaçamento de 4,25 mm.

Adicionalmente, para os ensaios com esfera de vidro, com diâmetro de orifício de 1,55 mm e altura do leito fixo de 0,1 m, verificou-se que o regime

observado durante os experimentos era do tipo borbulhante em transição ao regime de leito fixo, para a altura de leito fixo de 0,2 m, verificou-se que o regime era do tipo *slugging* em transição ao regime do tipo borbulhante.

Verificou-se ainda que o aumento da altura do leito resultou em valores menores da frequência central, isto ocorreu porque em velocidades superficiais do ar superiores a 1,0 m/s, observou-se, durante a realização do experimento, a presença de bolhas de ar que atingiam praticamente todo o diâmetro da coluna de fluidização. Neste tipo de regime de fluidização, alguns estudos têm mostrado que o espectro apresenta uma banda de frequência estreita, com a presença de picos dominantes situados entre 2 Hz a 3 Hz, o que justifica valores tão baixos da frequência central.

Para os ensaios utilizando esfera de vidro com diâmetro médio de 2,18 mm e altura do leito fixo de 0,1 m observou-se que o regime era do tipo borbulhante, em transição ao regime de leito fixo, para altura de leito fixo de 0,2 m verificou-se que o regime era do tipo *slugging*, quando se aproximava da região de defluidização, o regime era do tipo borbulhante em transição ao regime de leito fixo.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados obtidos sugere-se:

- Aplicar a técnica apresentada utilizando a secagem para analisar se há influência do diâmetro de orifício da placa distribuidora de ar na região de defluidização no processo de secagem.
- Estudar a secagem de sólidos coesivos com os mesmos diâmetros de orifícios de placas distribuidoras de ar apresentada no presente trabalho para verificar se há influência na região de defluidização.
- Aplicar a técnica com partículas de esfera de vidro, utilizando outros diâmetros de orifício da placa distribuidora de ar, para verificar se há influência na região de defluidização.
- Analisar outros tipos de placas distribuidoras de ar com partículas de classificação A, B e D de Geldart (1973).
- Realizar repetições nos testes experimentais para determinar a significância estatística dos efeitos produzidos pelo distribuidor sobre a região de defluidização.

REFERÊNCIAS

BAI, D., MASUDA, Y., NAKAGAWA, N., KATO, K. **Hydrodynamic behavior of a binary solids fluidized bed.** Journal of Chemical Engineering of Japan, v.29, p. 211-216, 1996.

BASU, P. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. Edição: Taylor & Francis, p. 359, 2006.

CHYANG, CHIEN-SONG; LIEU, KELLY; HONG, SHUN-SHENG. **The effect of distributor design on gas dispersion in a bubbling fluidized bed.** Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers. Taiwan: Elsevier, 2008.

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, 169p. Tese (Doutorado);

FELIPE, C.A.S., ROCHA, S.C.S. **Time Series Analysis of Pressure Fluctuation in Gas- Solid Fluidized Beds.** Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 21, p. 497-507, 2004.

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.** 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

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

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

KAMINSKI, DIOGO ET AL. **Projeto do Distribuidor de Ar de um Gaseificador de Leito Fluidizado**. Gramado: III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, p. 6, 2011.

KAGE, H., IWASAKI, N., MATSUNO, Y. **Frequency analysis of pressure fluctuation in *plenum* as a diagnostic method for fluidized beds**. *AIChE Symposium Series*, v. 89, p. 184- 190, 1993.

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

LabView. Disponível em: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371299B-01/lvdsp/dsp_filter/>, Acesso em: 13 fev. 2014.

LI, Z., KOBAYASHI, N., HASATANI, M. **Characteristics of Pressure Fluctuations in a Fluidized Bed of Binary Mixtures**. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.38, p. 960- 968, 2005.

LOPES, J.,2004. Disponível em: <<http://bsel.ist.utl.pt/2007/PortalQuimiometria/Contents/procdados/node7.html>>. Acesso em: dez. 2013.

PARISE, MARIA REGINA. **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. ; SILVEIRA, F. T. ; Ramirez B., J. J. ; JANZEN, F. C. . **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, 2013. v. 01. p. 1534-1539

SANTOS, M. A. dos et al. **Efeito da Área Livre do Distribuidor de Ar na Expansão do Leito Fluidizado Borbulhante**. Uberlândia: VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2007.

SATHIYAMOORTHY, D.; HORIO, Masayuki. **On the influence of aspect ratio and distributor in gas fluidized beds.** Chemical Engineering Journal. Japão: Elsevier, 2003.

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, vol. 212, 2011.

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.