

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS

**APLICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL NORMAL
EM LEITO FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO**

Autora: Maria Regina Parise

Orientador: Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Campinas
Setembro/2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

P218a Parise, Maria Regina
 Aplicação da distribuição espectral normal em leito
 fluidizado gás-sólido / Maria Regina Parise.--Campinas,
 SP: [s.n.], 2007.

 Orientador: Osvaldir Pereira Taranto.
 Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

 1. Leito fluidizado. 2. Processamento de sinais. 3.
 Pressão - Flutuação (Física). I. Taranto, Osvaldir
 Pereira. II. Universidade Estadual de Campinas.
 Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Application of the normal spectral distribution in a gas –
solid fluidized bed.

Palavras-chave em Inglês: Gas-solid fluidized bed, Defluidization, Pressure
fluctuations, Fourier transform, Exponential
Gaussian distribution.

Área de concentração: Engenharia de Processos.

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Wanderley Pereira de Oliveira, Paulo Roberto Gardel
Kurka, Flávio Vasconcelos da Silva e Sandra Cristina
dos Santos Rocha.

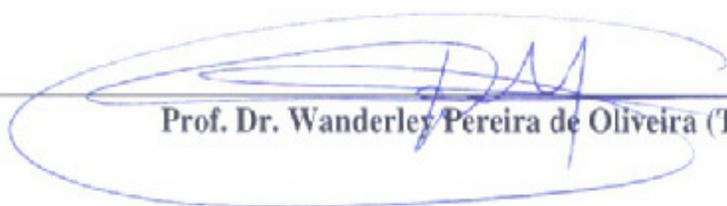
Data da defesa: 14/09/2007.

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Tese de Doutorado defendida por MARIA REGINA PARISE e aprovada em 14 de
Setembro de 2007 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto (Orientador)



Prof. Dr. Wanderley Pereira de Oliveira (Titular)



Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka (Titular)



Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva (Titular)



Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha (Titular)

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia Química.



Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a dois anjos: minha filha Maria Luísa e
meu marido Jhon.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter oferecido esta oportunidade e também por ter propiciado condições para que eu pudesse chegar até o fim dessa missão.

Ao meu orientador Osvaldir, pela amizade, pelo lado humano de ser, pelo apoio e dedicação durante o desenvolvimento do trabalho.

A você Kurka, uma pessoa com coração enorme que tive o prazer de conhecer em 2004 e que durante estes últimos anos tem estado sempre disposto a me ajudar. Muitíssimo obrigada pela amizade, pelos valiosos conselhos e por tudo que você tem feito por mim e pelo Jhon!

Ao meu querido esposo Jhon, pelo amor, paciência, tolerância nos momentos mais difíceis, e pela ajuda na correção do texto.

Ao Carlos Alberto Ramírez Behaine, pela grandiosa colaboração para eliminar o problema de ruído do sinal.

À Paula Pavanelli, uma grande amiga! Obrigada por tudo.

À profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha, pelo empréstimo de alguns sólidos.

Ao Carlos Alberto S. Felipe pela colaboração no início desse trabalho.

Aos técnicos Seu Levi e Alexandre, pelo empenho e ajuda.

Ao Departamento de Projeto Mecânico/ FEM/ UNICAMP e à técnica Rosângela A.C.F. da Silva, pelo empréstimo do transdutor de pressão de resposta rápida.

Aos amigos e companheiros do laboratório: Mirla, Alice, Nádia, Ambrósio, Mônica, Paulo Henrique, Eurismar, Sebastião, Fernando, Jaiana, Lene, Sérgio, German.

Ao aluno de iniciação científica Leonardo B. Benetti, pela colaboração durante a coleta dos dados experimentais.

Ao CNPq e à FAEPEX/UNICAMP, pelo auxílio financeiro.

RESUMO

A defluidização parcial ou total de partículas sólidas é um fenômeno indesejável em aplicações industriais envolvendo operações com leito fluidizado. Se as mudanças na fluidodinâmica do leito forem detectadas a tempo, pode-se evitar-la com o aumento da velocidade do gás de fluidização e/ou, em alguns casos, mediante a alteração da vazão de sólidos alimentados no sistema. A utilização de uma técnica que permita rapidamente identificar a região onde o leito está tendendo à defluidização é de suma importância, pois dessa maneira pode-se atuar no processo impedindo que haja perda de eficiência ou até mesmo a necessidade de parar a produção. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia capaz de identificar essa região em leito fluidizado gás-sólido, através de medidas de flutuação de pressão analisadas utilizando a transformada de Fourier juntamente com a Distribuição Exponencial Gaussiana. Para a verificação da metodologia proposta foram realizados ensaios experimentais utilizando areia e celulose microcristalina, alterando-se a altura do leito e o diâmetro médio das partículas. Os resultados mostraram que o método identifica claramente a região onde o leito está tendendo à defluidização, e tem grande potencial em aplicações industriais para o controle *on line* de processos em leito fluidizado gás-sólido. Além disso, a metodologia pode ser importante para detectar mudança de regime para a relação altura do leito e diâmetro da coluna de fluidização (H/D) superiores à unidade. Adicionalmente, foram realizados ensaios de secagem utilizando celulose microcristalina visando à possibilidade da identificação do ponto crítico (teor de umidade existente no final do período de taxa constante) utilizando as seguintes técnicas: metodologia proposta neste trabalho, frequência dominante e desvio padrão da flutuação de pressão. Observou-se que para o sólido utilizado não foi possível detectar o ponto crítico através desses três tipos de análise. No entanto, a metodologia proposta pode ser utilizada na identificação do momento que a secagem não se encontra na fluidização requerida e está tendendo à defluidização.

Palavras-chave: leito fluidizado gás-sólido, defluidização, flutuação de pressão, transformada de Fourier, Distribuição Exponencial Gaussiana.

ABSTRACT

The partial or complete bed defluidization is an undesired phenomenon in industrial application involving fluidized bed operations. If the changes in the hydrodynamic of the fluidized bed are detected early enough, it may be prevented by increasing the gas velocity and/or, in some cases, changing the solid feed in the system. The use of a technique that can quickly identify the region where the bed is tending to the defluidization is very important, because one can act in the process avoiding loss of efficiency or even the necessity of shutting down the process. This work was as objective the development a methodology capable of identifying this region in gas-solid fluidized bed, by pressure fluctuation measurements analyzed using Fourier Transform and exponential Gaussian distribution. In order to verify the methodology proposed, experimental tests were carried out using microcrystalline cellulose and sand, where the fixed bed height and particle mean diameter were varied. Results showed that the method clearly identifies the region where the bed is tending to the defluidization, and it has great potential on industrial applications to on line process control in gas-solid fluidized bed. Also, the methodology can be important to detect regime changes at bed aspect ratios (H/D) higher than unit. Additionally, experimental drying test were carried out using microcrystalline cellulose particles to verify the possibility of identification of the critical drying point (the moisture content related to the end of the constant rate period) by the following techniques: the methodology proposed in the present work, the dominant frequency and standard deviation of pressure fluctuations. It was observed that for the solid material used it was not possible to detect the critical drying point. However, the methodology proposed can be used on identification the moment that the drying is not in the desired fluidization regime and it is tending to defluidization.

Keywords: Gas-solid fluidized bed, defluidization, pressure fluctuations, Fourier Transform, exponential Gaussian distribution.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvi
NOMENCLATURA	xviii
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	5
REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 Fundamentos de Fluidização	5
2.1.1 Regimes de Fluidização.....	5
2.1.2 Determinação da Velocidade de Mínima Fluidização a Partir da Curva Fluidodinâmica	7
2.1.3 Classificação das Partículas Sólidas	9
2.2 Medida de Flutuação de Pressão em Leito Fluidizado	10
2.3 Fundamentos de Secagem	19
2.3.1 Tipos de Umidades nos Sólidos	20
2.3.2 Determinação do Conteúdo de Umidade em Sólidos	20
2.3.3 Curvas de Secagem.....	21
2.4 Medidas de Flutuação de Pressão em Secagem.....	25
CAPÍTULO 3	26
MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 Materiais Utilizados e suas Características Físicas	26
3.2 Descrição do Sistema Experimental	27
3.3 Análise Espectral	30
3.4 Transformada de Fourier	31
3.5 Transformada Discreta de Fourier	31
3.6 Distribuição Espectral Normal em Leito Fluidizado	33
3.7 Instrumentação.....	42
3.8 Sistema de Aquisição de Sinais	47
3.9 Instrumentos Virtuais	50
3.10 Frequência de Amostragem e Número de Pontos de Pressão	50
3.11 Especificação do Filtro Digital	51
3.12 Localização e Dimensões da Tomada de Pressão	55

3.13 Procedimento Experimental	56
3.14 Organização Experimental e Ensaio Realizados.....	57
3.15 Ensaio Experimental Envolvendo Processo de Secagem.....	58
3.15.1 Materiais e Métodos - Secagem.....	59
3.15.1.1 Umidificação do material sólido.....	59
3.15.1.2 Procedimento Experimental – Secagem	60
CAPÍTULO 4	62
RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1 Influência da Utilização de Transdutores de Pressão com Tempo de Resposta Distinto sobre a Metodologia Proposta.	62
4.2 Comportamento da Pressão no Tempo e a Respectiva Transformada de Fourier.....	64
4.3 Aplicação da Metodologia Proposta – Resultados obtidos	66
4.4 Ensaio de Secagem de Sólidos.....	81
CAPÍTULO 5	95
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE A – Ensaio experimental referentes ao incremento da velocidade do ar	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Regimes de Fluidização (GRACE et al., 1997).....	7
Figura 2.2 - Curva típica de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás (KUNII e LEVENSPIEL,1991).	8
Figura 2.3 - Classificação de Geldart (1973) de partículas fluidizadas com ar em condições ambiente (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).....	10
Figura 2.4 - Espectros de potência da celulose microcristalina em ordem crescente de u_o com $d_p = 329 \mu\text{m}$ (FELIPE, 2004).	15
Figura 2.5 - Espectros de potência do comportamento do leito durante o processo de recobrimento de partículas (FELIPE, 2004).....	16
Figura 2.6 - Determinação de u_{mf} através do método de Puncochar et al. (1985) [adaptado de FELIPE, 2004].....	19
Figura 2.7 - Curva de secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986).	22
Figura 2.8- Curva da taxa de secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986).....	22
Figura 2.9 - Aplicação das técnicas de frequência dominante e desvio padrão de pressão em secagem (CHAPLIN, 2005)	25
Figura 3. 1 - Esquema Experimental	28
Figura 3.2 - Esquema da coluna de fluidização.....	29
Figura 3.3 -Vista da coluna de fluidização, transdutor de pressão, ciclone e do inversor de frequência.	30
Figura 3.4 - Sinal de pressão manométrica no plenum	34
Figura 3. 5 - Pressão normalizada no domínio do tempo.	35
Figura 3.6 - Transformada de Fourier do sinal de pressão normalizado (espectro de pressão).....	35
Figura 3.7- Logaritmo natural da amplitude da transformada de Fourier com a curva de ajuste, utilizando o método dos mínimos quadrados. CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$, $u_o = 0,16 \text{ m/s}$	41
Figura 3.8 - Fotos dos transdutores de pressão conectados ao plenum: (a) da marca Cole Parmer modelo 68014-18, (b) da marca Endevco.	43

Figura 3.9 - Queda de pressão no leito <i>versus</i> pressão manométrica no plenum utilizando o transdutor de pressão diferencial – areia, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 0,15 \text{ m}$	44
Figura 3.10 - Sinal de pressão do leito sem utilização de baterias.	48
Figura 3.11 - Sinal de pressão do leito com uso de baterias.....	48
Figura 3.12 - Comparação da Transformada de Fourier: leito com partículas de CMC (leito fixo) e leito sem partículas.....	49
Figura 3.13 - Variação da curva de filtragem em função da ordem do filtro digital de resposta infinita ao impulso (<i>IIR</i>), LabView (2007).....	52
Figura 3.14 - Transformada de Fourier do sinal de pressão normalizado: com e sem filtro digital (<i>IIR</i> , <i>Butterworth</i> , passa baixa, ordem: 30).	52
Figura 3.15 - Perfil do logaritmo natural da amplitude da transformada de Fourier obtido com filtro de ordem alta e baixa.	53
Figura 3.16 - Comportamento da frequência central em função da ordem do filtro. Areia – $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$, volta.	54
Figura 3.17 - Especificações do filtro digital de resposta infinita ao impulso (<i>IIR</i>).....	55
Figura 3.18 - Foto do transdutor e da tomada de pressão.....	56
Figura 3.19 - Foto do amostrador utilizado na coleta das partículas no leito.....	61
Figura 4. 1- Sinais de pressão manométrica medidas a partir de transdutores da marca Cole Parmer e Endevco.	63
Figura 4. 2- Influência dos transdutores de pressão das marcas Endevco e Cole Parmer na metodologia apresentada no presente trabalho.	64
Figura 4.3-Comportamento da pressão no tempo: a) regime de leito fixo, $u_o = 0,056 \text{ m/s}$; c) leito fluidizado, $u_o = 0,168 \text{ m/s}$. Transformada de Fourier do sinal (composto de 8192 pontos de pressão): b) leito fixo; d) leito fluidizado --- CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 20 \text{ cm}$	65
Figura 4. 4- Comportamento da pressão no tempo: a) regime de leito fixo, $u_o = 0,105 \text{ m/s}$; c) leito fluidizado, $u_o = 0,308 \text{ m/s}$. Transformada de Fourier do sinal (composto de 8192 pontos de pressão): b) leito fixo; d) leito fluidizado--- Areia, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 20 \text{ cm}$	66
Figura 4. 5-Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana – CMC, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar – u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,022 \text{ m/s}$	67

Figura 4. 6- Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - CMC,
 $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar- u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,026 \text{ m/s}$.
..... 68

Figura 4. 7- Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - CMC,
 $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar- u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,058 \text{ m/s}$.
..... 70

Figura 4.8 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - CMC,
 $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 20 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar- u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,060 \text{ m/s}$.
..... 70

Figura 4.9 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - CMC,
 $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar - u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,065 \text{ m/s}$.
..... 71

Figura 4.10 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - CMC,
 $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar - u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,063 \text{ m/s}$.
..... 72

Figura 4.11 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - CMC,
 $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$. - Reduzindo a velocidade do ar - u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,066 \text{ m/s}$.
..... 73

Figura 4.12 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana Areia,
 $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar - u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,030 \text{ m/s}$.
..... 74

Figura 4.13 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana Areia,
 $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar - u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,032 \text{ m/s}$.
..... 75

Figura 4.14 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana Areia,
 $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar- u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,115 \text{ m/s}$.
..... 76

Figura 4.15- Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - Areia,
 $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 20 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar-
 u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,120 \text{ m/s}$ 76

Figura 4.16 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana Areia, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar – u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,123 \text{ m/s}$	77
Figura 4.17 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana Areia, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar – u_{mf} (curva fluidodinâmica) $\cong 0,178 \text{ m/s}$	78
Figura 4.18 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - Areia, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar –.....	78
Figura 4.19 (a) - Perfil da frequência média Gaussiana e curva de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$	82
Figura 4.19 (b) - Perfil da frequência média Gaussiana e curva da taxa de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$	82
Figura 4.20 (a) - Perfil do desvio padrão da distribuição e curva de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$	84
Figura 4.20 (b) – Perfil do desvio padrão da distribuição e curva da taxa de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$	84
Figura 4.21 - Espectro de potência. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$, tempo de secagem: 30 minutos.	85
Figura 4. 22 (a) - Frequência dominante e curva de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$	86
Figura 4. 22 (b) - Frequência dominante e curva da taxa de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$	87
Figura 4.23 (a) - Desvio Padrão da flutuação de pressão e curva de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$	88
Figura 4.23 (b) - Desvio Padrão da flutuação de pressão e curva da taxa de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$	88
Figura 4.24 (a) - Perfil da frequência média Gaussiana e curva de secagem. CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$	89
Figura 4.24 (b) -Perfil da frequência média Gaussiana e curva da taxa de secagem. CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$,	

$m_{s,u}=0,655\text{kg}$	90
Figura 4.25 (a) - Perfil do desvio padrão da distribuição e curva de secagem. CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$	91
Figura 4.25 (b) - Perfil do desvio padrão da distribuição e curva da taxa de secagem. CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$	91
Figura 4.26 (a) - Freqüência dominante e curva de secagem.CMC – $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16\text{m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$	92
Figura 4.26 (b)- Freqüência dominante e curva da taxa de secagem.CMC – $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16\text{m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$	93
Figura 4.27 (a) - Desvio Padrão da flutuação de pressão e curva de secagem. CMC – $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16\text{m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$	94
Figura 4.27 (b) - Desvio Padrão da flutuação de pressão e curva da taxa de secagem. CMC – $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16\text{m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$	94
Figura A. 1 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- CMC, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$	103
Figura A.2 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- CMC, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$	103
Figura A.3 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana -CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$	104
Figura A.4 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana -CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 20 \text{ cm}$	104
Figura A.5 -Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$	105
Figura A.6 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$	105
Figura A.7 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$	106
Figura A.8 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- Areia, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$	106
Figura A.9 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - Areia, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$	107

Figura A.10 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- Areia, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$	107
Figura A.11 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- Areia, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 20 \text{ cm}$	108
Figura A.12 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- Areia, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$	108
Figura A.13 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- Areia, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$	109
Figura A.14 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- Areia, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1- Resumo da análise de séries de tempo em relação a sua aplicação no estudo da dinâmica do leito fluidizado (JOHNSON et al., 2000).	11
Tabela 3. 1 - Características físicas dos materiais.	26
Tabela 3. 2 - Diâmetros dos orifícios utilizados.	45
Tabela 3. 3 - Organização experimental – CMC	57
Tabela 3. 4 - Organização experimental – Areia	58

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A_{or}	área do orifício da placa	[cm ²]
A_t	área da tubulação	[cm ²]
$A(f)$	amplitude espectral medida	[Pa]
D	diâmetro do leito	[m]
d_{or}	diâmetro do orifício da placa	[cm]
d_p	diâmetro médio das partículas	[μm]
d_t	diâmetro do orifício da tubulação	[cm]
D_{ML}	dimensão de correlação	
FFT	transformada rápida de Fourier	
f	frequência	[Hz]
f_m	frequência média	[Hz]
g	aceleração da gravidade	[m/s ²]
$G(f)$	curva de distribuição normal	
L	altura de leito fixo	[m]
K_{ML}	entropia de Kolmogorov	
$m_{s,u}$	massa de sólido na base úmida	[kg]
m	relação entre a área do orifício da placa e a área da tubulação	
P	pressão manométrica do leito	[Pa]
P_{atm}	pressão atmosférica local	[mmHg]
P_{est}	pressão estática a montante da placa de orifício	[cmH ₂ O]
$P_{N,i}$	pressão do leito normalizada	[Pa]
Q	vazão mássica do ar	[kg/min]

T	intervalo de observação	[s]
T_{ar}	temperatura do ar na entrada do orifício	[°C]
T_g	temperatura do ar	[°C]
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_o	velocidade superficial do gás	[m/s]
u_{mf}	velocidade de mínima fluidização	[m/s]
u_{mb}	velocidade de mínimo borbulhamento	[m/s]
$X(f)$	transformada de Fourier direta	
$x(t)$	sinal no domínio do tempo	

Letras Gregas

ΔP	queda de pressão	[Pa]
ΔP_{po}	queda de pressão na placa de orifício	[cmH ₂ O]
ρ	densidade aparente	[kg/m ³]
ε_m	porosidade do leito	[-]
ε_f	fator de compressibilidade	[-]
μ	viscosidade dinâmica	[kg/m.s]
μ_x	média dos 8192 pontos de pressão	[Pa]
σ_p	desvio padrão da flutuação de pressão	[Pa]
α	coeficiente de descarga	[-]
σ	desvio padrão da distribuição espectral	[Hz]

Subscritos

m	relativo à máxima
mf	relativo à condição de mínima fluidização
g	relativo ao gás
l	relativo ao leito
p	relativo à partícula
s	relativo ao sólido

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A fluidização é uma operação que envolve o contato entre um leito formado por partículas sólidas e o fluxo ascendente de fluido (líquido ou gasoso), proporcionando uma boa mistura entre as fases, e com isso, altas taxas de transferência de calor e de massa (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Esta operação é empregada em uma variedade de processos industriais como combustão e gaseificação de carvão e biomassa, secagem de sólidos, recobrimento de partículas, recuperação de energia de gases e de sólidos quentes, processamento de materiais, biotecnologia e *Fluid Catalytic Cracking* (FCC) em refinarias de petróleo (LI et al., 2002).

Geralmente, os processos que envolvem leito fluidizado requerem uma mistura gás-sólido adequada, que nem sempre é possível. É o caso do processo de recobrimento de partículas, onde a adição da suspensão de recobrimento no sólido pode favorecer a sua aglomeração e, conseqüentemente, levar à defluidização parcial ou total do leito.

O fenômeno indesejável de defluidização parcial ou total ocorre quando a velocidade superficial do gás está próxima da velocidade do gás na mínima fluidização. Se as alterações na fluidodinâmica do leito fluidizado forem detectadas a tempo, tal fenômeno pode ser evitado pelo aumento da velocidade do gás e/ou, em alguns casos, mediante a alteração da vazão de sólidos alimentados no sistema (SCHOUTEN e Van den BLEEK, 1998). Identificando-se a região onde o leito está tendendo à defluidização é possível atuar no processo no momento apropriado, e fazer com que a fluidização volte à condição requerida.

Uma maneira de detectar essa região é através da análise da flutuação de pressão no interior do leito. Esta técnica é comumente utilizada pelos pesquisadores por diferentes motivos, entre eles, a possibilidade de fornecer informações importantes da dinâmica do leito, não ser intrusiva, ser aplicável em uma ampla faixa de condições experimentais e ser economicamente viável (van der SCHAFF et al., 2002). Além disso, 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 pequeno tubo (BROWN e BRUE, 2001).

De acordo com Schouten e Van den Bleek (1998), os sinais podem ser avaliados por três vias: 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. A teoria das informações mútuas (KARAMAVRUÇ e CLARK, 1997), a entropia de Kolmogorov e a dimensão de correlação (JOHNSSON et al., 2000) são métodos baseados na análise de caos aplicados a leito fluidizado, que reconhecem a natureza complexa da fluidização. Isto pode ser uma alternativa para identificar transição de regimes que não são claramente detectados através das análises de frequência e de estatística (CHAPLIN, 2005).

A análise espectral via transformada de Fourier tem sido aplicada em séries temporais de pressão em leito fluidizado (DHODAPKAR e KLINZING, 1993; SAXENA et al., 1993; TRNKA et al., 2000; JOHNSSON et al., 2000, FELIPE, 2004, FELIPE e ROCHA, 2004).

Por outro lado, a análise estatística no domínio do tempo é a técnica mais comumente empregada, por ser muito rápida e simples de aplicar. O método mais usado é o estudo do desvio padrão e da variância da amplitude do sinal (JOHNSSON et al., 2000). A alteração na amplitude com as condições de operação tem sido de interesse para a caracterização de regimes de fluidização (BAI et al., 1996). Outros pesquisadores (PUNCOCHAR et al., 1985; HONG et al., 1990; WILKINSON, 1995; FELIPE e ROCHA, 2007) utilizaram esta análise para determinar a velocidade de mínima fluidização.

A metodologia proposta por Puncochar et al. (1985) é utilizada na determinação da velocidade de mínima fluidização e baseia-se na relação linear entre o desvio padrão da flutuação de pressão e a velocidade superficial do gás. Essa técnica apresenta como vantagens a não necessidade da defluidização do leito; precisar de apenas a interseção de uma linha de regressão para obter o valor da velocidade de mínima fluidização (através da curva fluidinâmica é necessária a interseção de duas linhas); além da possibilidade de ser utilizada em tempo real.

Embora a metodologia proposta por Puncochar et al. (1985) tenha grande utilidade na determinação do valor da velocidade de mínima fluidização em leito fluidizado gás-

sólido, ela não é prática para identificar a faixa da velocidade superficial do gás na qual uma defluidização está próxima de acontecer. Durante o processo, a detecção deste fenômeno somente através do ponto de mínima fluidização pode não ser suficiente para alertar sobre uma possível perda de eficiência ou rendimento do processo, pois, a defluidização parcial do leito é algumas vezes observada mesmo antes de ser atingido o ponto de mínima fluidização. Na literatura não foi encontrada uma técnica para detectar com precisão a região onde o leito está tendendo à defluidização.

A partir do exposto, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia alternativa capaz de identificar a região onde o leito está tendendo à defluidização em leito fluidizado gás-sólido, através de medidas de flutuação de pressão analisadas utilizando a transformada de Fourier juntamente com uma curva exponencial semelhante à distribuição Gaussiana. Somente para esclarecer, na literatura não foi encontrada nenhuma técnica que utilize a combinação desses dois tipos de análise em leito fluidizado.

Para verificar a metodologia proposta, 14 ensaios experimentais foram realizados variando-se a densidade dos sólidos, o diâmetro médio das partículas e a altura de leito fixo. Nos ensaios utilizaram-se partículas secas de areia e celulose microcristalina com diâmetro médio de 180, 325 e 460 μm e altura de leito fixo de 15, 20 e 25 cm, respectivamente. Os sólidos foram submetidos às condições de fluidização em uma coluna acrílica de 0,143 m de diâmetro interno e 0,71 m de altura. As etapas cumpridas desse trabalho foram as seguintes:

- Desenvolvimento da metodologia proposta;
- Montagem dos instrumentos virtuais para a aquisição dos sinais de pressão e para a metodologia proposta;
- Definição da frequência de amostragem, número pontos de pressão e localização da mangueira transmissora de pressão;
- Seleção e caracterização dos materiais sólidos;
- Ensaios preliminares para verificação da viabilidade da metodologia proposta. Com estes foi possível definir as melhores condições operacionais dos ensaios definitivos e averiguar se a técnica seria afetada significativamente com a

utilização de dois tipos transdutores de pressão com tempo de resposta apreciavelmente diferente;

- Realização dos experimentos;
- Seleção do filtro digital e suas especificações.

Adicionalmente, foram realizados alguns ensaios experimentais de secagem de sólidos visando à identificação do ponto crítico - que corresponde ao teor de umidade existente no final do período de taxa constante - utilizando as seguintes técnicas: metodologia proposta no presente trabalho; frequência dominante e desvio padrão da flutuação de pressão.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são abordados aspectos do leito fluidizado, da velocidade de mínima fluidização e da caracterização dos sólidos. Adicionalmente, são mostrados alguns trabalhos publicados na literatura que envolvem medidas de flutuação de pressão em leito fluidizado gás-sólido. Porém, em nenhuma dessas referências bibliográficas foi encontrado um estudo objetivando a identificação da região onde o leito está tendendo à defluidização. Além disso, são apresentados conceitos de secagem de sólidos e alguns trabalhos sobre o assunto.

2.1 Fundamentos de Fluidização

Sistemas fluidizados gás-sólido são tipicamente caracterizados pela uniformidade de temperatura e altas taxas de transferência de calor e de massa, devido à intensa mistura do material sólido provocada pela presença de bolhas de gás. O fenômeno de fluidização é observado quando um leito de partículas sólidas entra em contato com um gás, um líquido ou com ambos, adquirindo o comportamento de fluido.

2.1.1 Regimes de Fluidização

Considerando o contato gás-sólido, observa-se que para baixas velocidades superficiais de gás (u_o), o material sólido permanece estacionário no leito e o gás escoar através de interstícios entre as partículas. Neste regime, a concentração volumétrica de sólidos mantém-se constante e este comportamento caracteriza um tipo de contato gás-sólido denominado leito fixo (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

O aumento da velocidade do gás permite que se alcance um ponto onde as partículas ficam suspensas pelo fluxo gasoso ascendente. Neste ponto, a força de atrito entre as partículas e o fluido contrabalança o peso delas. A componente vertical da força compressiva entre partículas adjacentes desaparece e, a queda de pressão através de qualquer seção do leito, torna-se igual ao peso das partículas naquela seção. Neste regime

ocorre redução da concentração volumétrica de sólidos. A velocidade superficial do gás no qual esse fenômeno ocorre denomina-se velocidade de mínima fluidização (u_{mf}) e, nesse ponto, o leito encontra-se em condição de fluidização incipiente (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Com o aumento da velocidade do gás observa-se a expansão do leito e o surgimento de bolhas, com a conseqüente redução na concentração volumétrica dos sólidos, fato que caracteriza a fluidização agregativa ou heterogênea. Quando partículas finas são fluidizadas (grupo A de Geldart (1973)) observa-se a expansão homogênea do leito antes do surgimento das primeiras bolhas, caracterizando a fluidização particulada ou homogênea. As bolhas de gás que atravessam o leito podem, em casos de vazões de gás elevadas, arrastar as partículas mais finas do leito. Tratando-se de colunas com diâmetro reduzido, podem aparecer bolhas que ocupam todo o diâmetro do recipiente de fluidização, fazendo com que uma porção do leito seja arrastada para cima, estabelecendo-se o regime de escoamento pistonado ("*slugging*"). Para velocidades de gás maiores, a agitação do leito torna-se mais violenta e o movimento das partículas mais vigoroso, caracterizando o regime de fluidização turbulento (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Para uma vazão de gás suficientemente elevada, a velocidade terminal dos sólidos pode ser excedida, fazendo com que a região densa inferior desapareça e sólidos sejam transportados para fora do leito (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Este regime é denominado transporte pneumático. A Figura 2.1 mostra os tipos de regimes de fluidização.

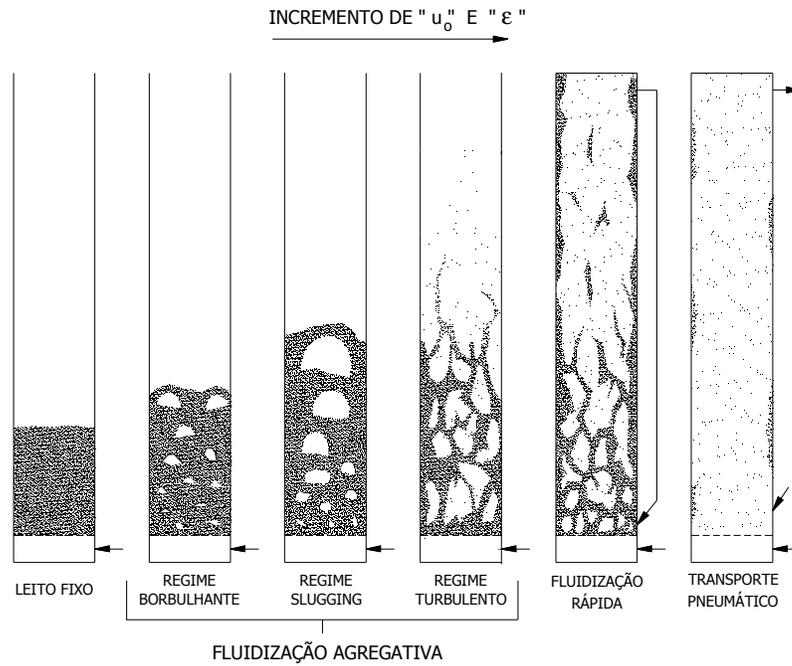


Figura 2. 1 - Regimes de Fluidização (GRACE et al., 1997)

2.1.2 Determinação da Velocidade de Mínima Fluidização a Partir da Curva Fluidodinâmica

A Figura 2.2 mostra um diagrama típico da queda de pressão (ΔP) obtida experimentalmente utilizando várias velocidades do gás (u_0) a partir de um leito de partículas.

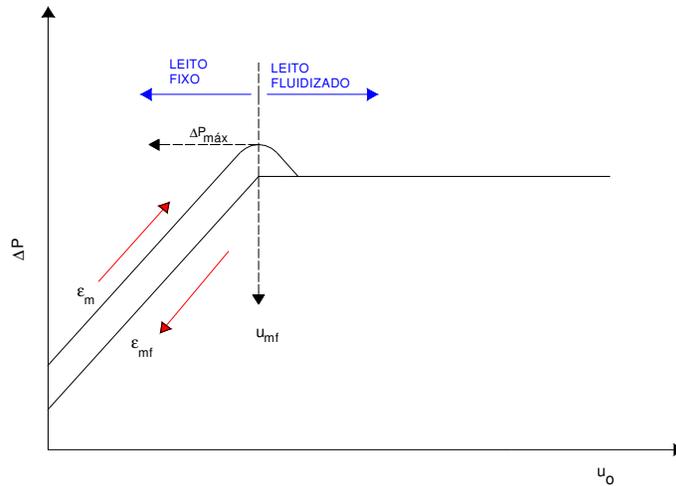


Figura 2.2 - Curva típica de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás (KUNII e LEVENSPIEL,1991).

Para uma velocidade superficial do gás relativamente baixa, o leito é considerado fixo, e a queda de pressão é aproximadamente proporcional à velocidade do gás. Aumentando-se a velocidade do gás, normalmente atinge-se uma queda de pressão máxima, $\Delta P_{máx}$, acima da pressão correspondente ao peso do leito. A partir desse ponto, o aumento da velocidade do gás faz com que o leito fixo se expanda, aumentando a porosidade do leito de ϵ_m para ϵ_{mf} ; essa expansão 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 a fluidização heterogênea. A partir deste ponto, a queda de pressão no leito mantém-se praticamente constante, independente do aumento da velocidade superficial do gás (KUNII e LEVENSPIEL,1991).

Com a vazão de gás cessada, uma suave acomodação ou vibração do leito reduzirá a sua porosidade para seu valor estável inicial de ϵ_m . Geralmente, u_{mf} é determinado com a intersecção da linha de ΔP versus u_0 do leito fixo de porosidade ϵ_{mf} com a linha horizontal correspondente ao leito fluidizado (KUNII e LEVENSPIEL,1991).

2.1.3 Classificação das Partículas Sólidas

Geldart (1973, citado por KUNII e LEVENSPIEL, 1991) classificou as partículas em quatro grupos de acordo com seu comportamento de fluidização. Das menores às maiores, elas foram classificadas da seguinte maneira:

- Grupo C - partículas coesivas ou muito finas. A fluidização dessas partículas é extremamente difícil, devido ao fato das forças interpartículas serem maiores que as forças resultantes da ação do gás. No entanto, 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. Como exemplo de materiais sólidos pertencentes a esse grupo citam-se a farinha de trigo, amido e pó facial.

- Grupo A - partículas com diâmetro médio pequeno e/ou densidade baixa (menor que 1400 kg/m^3). Quando esses sólidos são fluidizados, 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. Esse grupo é representado pelo FCC catalítico (*Fluid Catalytic Cracking*).

- Grupo B – 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 fluidização dessas partículas é denominada fluidização borbulhante. O sólido típico desse grupo é a areia.

- Grupo D – partículas jorráveis, ou grandes (geralmente maiores que 1 mm) e/ou densas. A fluidização é difícil se o leito dessas partículas for profundo. Apresenta pequena expansão do leito, baixa mistura das partículas. As forças coesivas interpartículas são menores comparadas com a força de arraste. Neste grupo encontram-se a ervilha e os grãos de café.

A Figura 2.3 mostra a classificação de Geldart (1973, citado por KUNII e LEVENSPIEL, 1991) para fluidização com ar em condições ambiente. Para qualquer material sólido com densidade (ρ_s) e diâmetro médio de partícula (d_p) conhecidos, o gráfico ilustra o grupo esperado (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

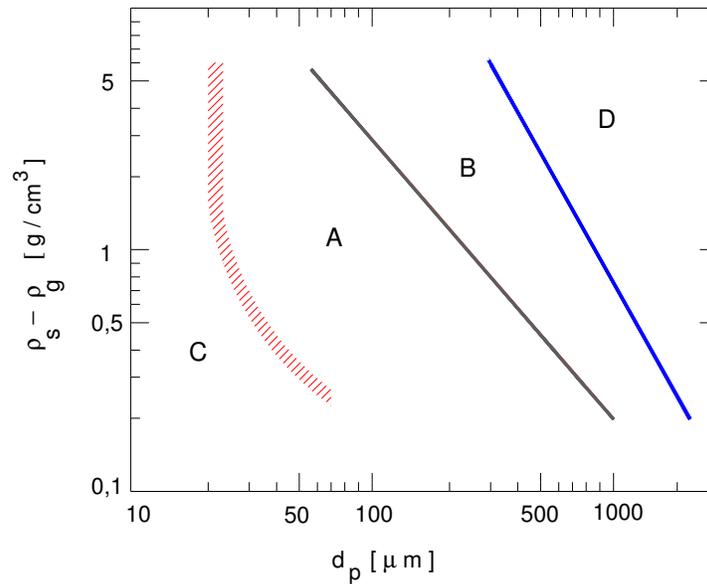


Figura 2.3 - Classificação de Geldart (1973) de partículas fluidizadas com ar em condições ambiente (KUNII e LEVENSPIEL, 1991)

2.2 Medida de Flutuação de Pressão em Leito Fluidizado

A técnica envolvendo medidas da flutuação de pressão no interior de leitos fluidizados tem sido frequentemente aplicada para estudar o comportamento de sistemas gás-sólido, e a grande vantagem da utilização desses sinais de pressão é que eles incluem os efeitos de diferentes fenômenos (dinâmicos) que ocorrem no leito fluidizado, como a turbulência do escoamento, a formação de bolhas de gás, e a passagem e erupção dessas bolhas (SCHOUTEN e van den BLEEK, 1998). A natureza da flutuação de pressão em leitos fluidizados é afetada pelo diâmetro do leito, tamanho das partículas, tipo de placa distribuidora, localização das tomadas de pressão no leito, altura do leito fixo, velocidade superficial do gás (DHODAPKAR e KLINZING, 1993).

Uma descrição quantitativa de regimes fluidodinâmicos pode ser obtida a partir da análise de séries temporais da flutuação de sinais a partir da pressão (manométrica ou queda de pressão) no leito fluidizado ou por outros tipos, como concentração local de sólidos. A análise de séries temporais opera no domínio do tempo (estudando geralmente desvio padrão e variância da amplitude do sinal), frequência dominante (utilizando transformada rápida de Fourier, *FFT*) ou em espaço-estado (caos), este último sendo usado em análise de séries temporais não lineares (JOHNSSON et al., 2000).

A Tabela 2.1 mostra um resumo da análise de séries temporais em relação a sua aplicação no estudo da dinâmica do leito fluidizado.

Tabela 2. 1- Resumo da análise de séries de tempo em relação a sua aplicação no estudo da dinâmica do leito fluidizado (JOHNSSON et al., 2000).

Método	Critério para identificação de regimes	Informações que devem ser fornecidas com os resultados	Desvantagens
Domínio do tempo	Identificação de velocidade de transição (u_c^* e u_k^*) baseado na variação de amplitude	Perfil da queda de pressão vertical	Medida indireta da dinâmica
Frequência dominante	Variação na distribuição da frequência	Número médio de espectro, perfil da queda de pressão vertical	A interpretação dos espectros de potência é um pouco subjetiva
Espaço de fases (Caos)	Variação de K_{ML}^* e/ ou D_{ML}^*	Perfil da queda de pressão vertical	Ainda em desenvolvimento, não há software para análise dos dados

Na tabela anterior, u_c^* , u_k^* , K_{ML}^* e D_{ML}^* correspondem à velocidade do início da transição de fluidização borbulhante para a turbulenta, velocidade do início da fluidização turbulenta, entropia de Kolmogorov, dimensão de correlação, respectivamente. Na literatura, existem vários trabalhos envolvendo medidas de flutuação de pressão em leito fluidizado, alguns deles são apresentados a seguir.

Em 1981, Fan et al. realizaram um estudo estatístico da flutuação da pressão *on-line* em leito fluidizado utilizando transdutores de pressão, análise de probabilidade e análise da transformada de Fourier. O objetivo do trabalho foi verificar a influência de parâmetros como velocidade do gás, altura do leito, diâmetro das partículas e placa distribuidora sobre a frequência e a amplitude das flutuações. Os autores observaram que a amplitude da flutuação da pressão está relacionada com a densidade do leito e o tamanho das bolhas, e estas são as fontes das flutuações de pressão. Além disso, eles verificaram que o perfil da densidade de probabilidade do sinal da flutuação de pressão possui diversos formatos para diferentes pontos no leito. Adicionalmente, estabeleceu-se que as análises de flutuação de pressão determinadas pela suas funções densidade, frequência e função densidade espectral de potência representam uma maneira útil para monitorar mudanças nas condições do leito e para diagnosticar anormalidades durante a operação.

Dhodapkar e Klinzing (1993) estudaram a qualidade do regime de fluidização através da flutuação de pressão, utilizando partículas dos grupos A e B 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 é um método simples de controle e monitoramento da qualidade da fluidização.

Em 1993, Kage et al. fizeram um estudo das condições de fluidização a partir de medidas de flutuação de pressão. Os autores verificaram que a variação do estado de fluidização está relacionada com a geometria da placa distribuidora, devido ao fato de causar diferenças significativas na flutuação de pressão.

Bai et al. (1996) utilizaram análise estatística para investigar a velocidade de transição da fluidização borbulhante para a turbulenta, através de medidas flutuação de pressão em leito fluidizado. Os autores obtiveram a variação do desvio padrão da flutuação de pressão (σ_p) em função da velocidade superficial do gás (u_o). Para cada fração de partículas grossas, a transição da fluidização borbulhante para a turbulenta foi caracterizada pela variação de (σ_p) e u_o . Eles observaram que σ aumenta com o incremento da

velocidade do gás quando $u_o < u_c$ (velocidade de transição de fluidização borbulhante para turbulenta); e reduz quando $u_o > u_c$. Além disso, verificaram que a adição de partículas grossas resulta no incremento de u_c .

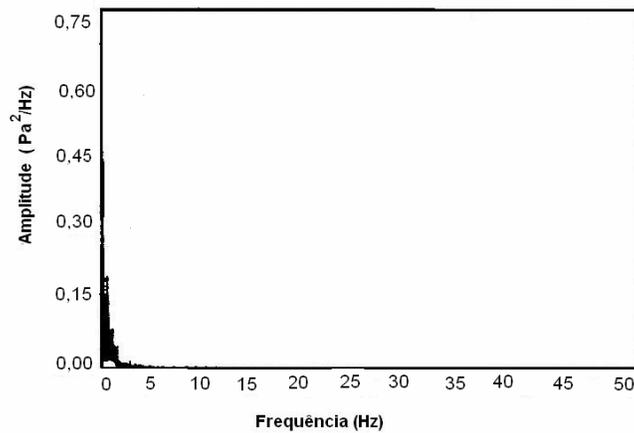
Em 1999, Bai et al. utilizaram análise de flutuação de pressão para caracterizar o comportamento do escoamento gás-sólido em leito fluidizado. A partir deste estudo, os autores observaram que sinais de flutuação de pressão podem ser usados para caracterizar e distinguir o comportamento do escoamento de diferentes classes de partículas da classificação de Geldart (1973). Além disso, leitos com partículas dos grupos A e B mostraram flutuações de pressão de escalas e picos de frequência dominante relativamente altos por causa da movimentação das bolhas, entretanto, as flutuações de pressão foram significativamente menores para partículas do grupo C devido à não formação de bolhas nítidas.

Johnsson et al. (2000) compararam as análises de tempo dominante, de frequência dominante e de caos utilizando medidas de queda de pressão em leito fluidizado. Segundo os autores, os resultados a partir da análise de frequência dominante (espectro de potência) e da análise de caos (dimensão de correlação, entropia de Kolmogorov) geralmente apresentam concordância entre si e podem ser utilizados para se complementar.

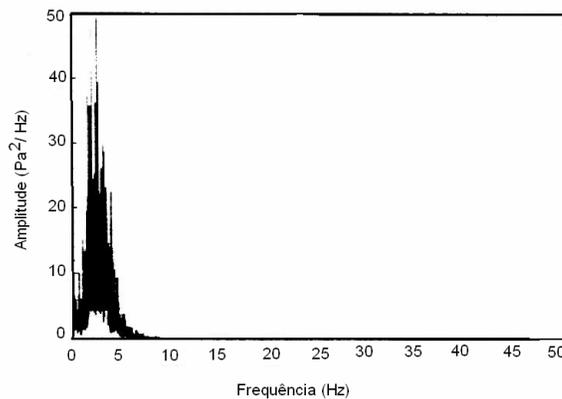
Felipe (2004) identificou e distinguiu diferentes regimes de fluidização a partir da avaliação das flutuações de pressão no domínio da frequência. Foram utilizadas duas colunas de fluidização, feitas em acrílico, com diâmetro interno e altura de 0,11 m e 1,5 m (coluna I), e 0,14 m e 0,80 m (coluna II), respectivamente. Os experimentos foram realizados com 12 tipos diferentes de material sólido, 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 8192 medidas de pressão.

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. Na Figura 2.4, observa-se que o aumento de u_o 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* (c), onde o espectro é caracterizado por apresentar um único pico, que, segundo o autor, 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. Isto parece indicar que, para um mesmo regime de fluidização, o formato do espectro independe do tipo de equipamento utilizado.



(a) Leito fixo - $u_o = 0,05$ m/s



(b) Fluidização borbulhante- $u_o = 0,12$ m/s

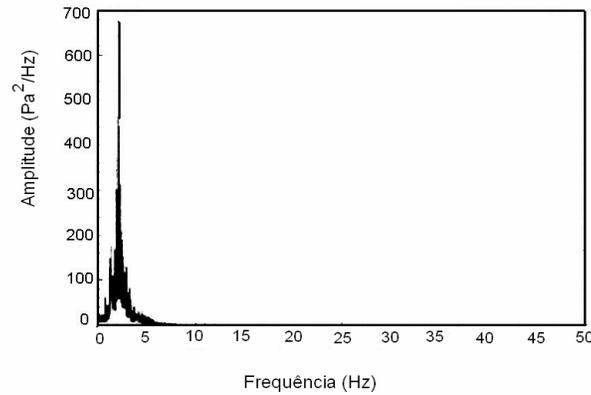
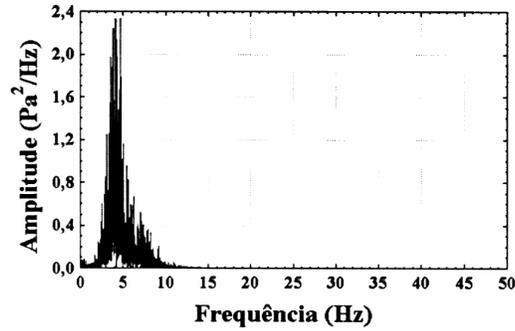
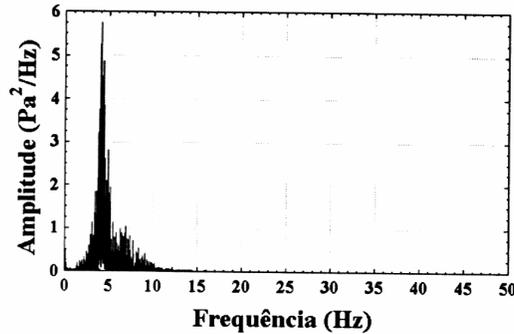
(c) Fluidização *slugging* - $u_o = 0,32$ m/s

Figura 2.4 - Espectros de potência da celulose microcristalina em ordem crescente de u_o com $d_p = 329$ μm (FELIPE, 2004).

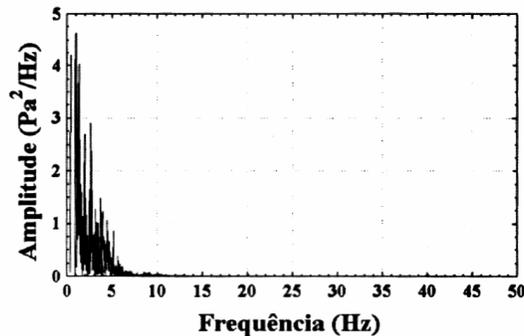
No mesmo trabalho, também foram realizados experimentos de recobrimento de partículas, com o objetivo de observar o fenômeno de aglomeração de partículas, através da metodologia de monitoramento de fluidização, utilizando a transformada de Fourier. Os experimentos foram realizados na mesma coluna que o autor utilizou para o monitoramento de regimes de fluidização (diâmetro interno de 0,14 m), sendo que a partícula sólida foi celulose microcristalina, com $d_p = 350$ μm , e altura do leito fixo de 0,11 m. As partículas foram revestidas com uma substância à base de Eudragit[®] L30-D55. As medidas de pressão foram tomadas no plenum, e a taxa de amostragem foi mantida em 100 Hz com 8192 pontos por espectro. A Figura 2.5 mostra o comportamento dos espectros desde antes do início do processo de recobrimento de partículas, até a defluidização do leito, causada pelo aumento da umidade do material. Através da figura, verifica-se que à medida que aumenta a aglomeração das partículas no leito, há uma redução da frequência dominante e o espectro se desloca para a extremidade esquerda, como ocorre no regime de leito fixo (Figura 2.5 c). De acordo com o autor, a metodologia resultou em uma resposta satisfatória, pois indicou uma mudança no formato do espectro com o aumento da aglomeração das partículas.



(a) Fluidização borbulhante múltipla, antes do recobrimento, $u_o = 0,148$ m/s



(b) Fluidização borbulhante múltipla, parte do leito estagnado, $u_o = 0,148$ m/s



(c) Fluidização borbulhante múltipla, colapso do leito, $u_o = 0,147$ m/s

Figura 2.5 - Espectros de potência do comportamento do leito durante o processo de recobrimento de partículas (FELIPE, 2004).

Li et al. (2005) estudaram as características fluidodinâmicas em leito fluidizado de misturas binárias utilizando análise de frequência, a partir de medidas de flutuação de pressão. De acordo com os autores, a localização da medida de pressão no leito tem pouca influência no valor da frequência dominante. Por outro lado, numa determinada posição de medida de pressão no leito, há uma amplitude média máxima que é dependente da

velocidade superficial do gás e do tamanho de partículas adicionadas no leito. Os pesquisadores também observaram que o valor da frequência dominante é inversamente proporcional à altura de leito fixo.

Em 2006, Moris et al. utilizaram a análise de frequência dominante no monitoramento do processo de recobrimento de partículas em leito fluidizado, a partir de medidas de flutuação de pressão. Os experimentos foram realizados com partículas de celulose microcristalina com diâmetro médio de 360 μm , recobertas por uma suspensão polimérica a base de Eudragit[®]. A frequência de amostragem foi de 400 Hz e com 8192 pontos em cada tomada de pressão. Em todos os experimentos, a velocidade superficial do gás foi mantida em 0,14 m/s. De acordo com os autores, as alterações na taxa de circulação das partículas, *slug* de parede, formação de canais preferenciais e pequenos aglomerados, zonas mortas e o colapso do leito resultaram em mudanças no espectro de potência; indicando, dessa forma, a aplicabilidade da metodologia utilizada no processo de recobrimento de partículas.

Medidas de Flutuação de Pressão Aplicadas à Determinação de u_{mf}

Em 1985, Puncochar et al. propuseram uma metodologia para determinar a velocidade de mínima fluidização (u_{mf}) através de medidas flutuação de pressão. Essa técnica é baseada na relação entre velocidade superficial do gás e desvio padrão da flutuação de pressão. Os autores verificaram que essa relação pode ser considerada linear para velocidade superficial do gás (u_o) < 2,5 u_{mf} e com número de Reynolds da partícula (Re_p) < 30, resultando em:

$$\sigma_p = a + b.u_o \quad (2.1)$$

onde:

σ_p : desvio padrão da flutuação de pressão;

u_o : velocidade superficial do gás.

a e b : parâmetros que podem ser determinados através de regressão linear.

A velocidade de mínima fluidização é então obtida quando $\sigma_p = 0$, com isso:

$$u_{mf} = -\frac{a}{b} \quad (2.2)$$

Em comparação com o método tradicional de determinação da velocidade de mínima fluidização (queda de pressão no leito *versus* velocidade superficial do gás), a metodologia apresentada por esses pesquisadores possui as seguintes vantagens:

- a não necessidade do processo de defluidização do leito para se obter a velocidade de mínima fluidização;
- maior exatidão para determinar u_{mf} , pois neste caso é necessária a interseção de uma reta, enquanto que no método tradicional; duas retas.

Hong et al. (1990) estudaram a influência da posição axial da tomada de pressão e da relação altura de leito fixo e diâmetro do leito (H/D) sobre o método apresentado por Puncochar et al. (1985). De acordo com os autores, a linearidade do desvio padrão da flutuação de pressão e a velocidade superficial do gás é fortemente dependente da posição axial dessa tomada de pressão e, portanto, esta não deve estar localizada nas proximidades da placa distribuidora, devido à jatos oriundos desta região. Por outro lado, esses pesquisadores obtiveram melhores resultados para relação altura e diâmetro de leito menor que dois.

A pesquisa de Wilkinson (1995) também envolveu a metodologia de Puncochar et al. (1985) e baseou-se na verificação da viabilidade de utilizar a tomada de pressão no plenum, em comparação com medidas realizadas acima da placa distribuidora. Adicionalmente, estudou o número mínimo de medidas de pressão para a estimativa do desvio padrão, que resultasse menores erros na estimativa de u_{mf} . Os experimentos foram realizados com placa distribuidora do tipo porosa. Segundo o autor, os valores de u_{mf} obtidos através de medidas de pressão no plenum resultaram em valores elevados do coeficiente de correlação, sendo um ótimo local para tais medidas a fim de evitar a obstrução da tomada de pressão pela presença de sólidos. Além disso, de acordo com o pesquisador o número mínimo de medidas de pressão deve ser 10.000 pontos.

Em 2007, Felipe e Rocha também aplicaram a metodologia de Puncochar et al. (1985) para uma variedade de partículas sólidas estudando a influência do modo de obtenção da pressão (absoluta e diferencial), e a localização da mangueira de transmissão de pressão na obtenção da u_{mf} . De acordo com os autores, as medidas de pressão absoluta e diferencial não resultaram em diferenças significativas na determinação de u_{mf} . Além disso, os pesquisadores verificaram que o plenum é apropriado para a localização da tomada de pressão.

A Figura 2.6 mostra a determinação de u_{mf} através da aplicação da metodologia desenvolvida por Puncochar et al. (1985).

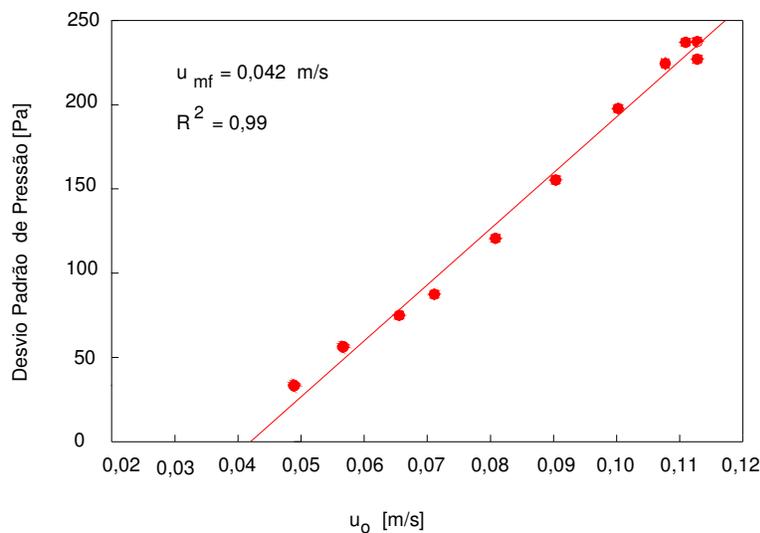


Figura 2.6 - Determinação de u_{mf} através do método de Puncochar et al. (1985)
[adaptado de FELIPE, 2004].

2.3 Fundamentos de Secagem

Secagem é um processo pelo qual a umidade é vaporizada e arrastada para o lado externo da superfície do sólido, às vezes sob vácuo, mas normalmente por meio de um gás que passa através ou sobre o material úmido (KEEY, 1992).

Quando um sólido úmido é exposto à secagem, dois fenômenos ocorrem simultaneamente (MENON e MUJUMDAR, 1995):

- Transferência de calor do ambiente para evaporar a umidade superficial. Essa

transferência é dependente das condições externas, como temperatura, umidade e velocidade do ar;

- Transferência de massa (umidade) do interior do sólido para sua superfície, e em seguida a evaporação devido ao primeiro processo. O movimento da umidade interna do material é função da natureza física do sólido, da temperatura e do conteúdo de umidade.

2.3.1 Tipos de Umidades nos Sólidos

As umidades nos sólidos são classificadas em:

Umidade superficial: é dada por um líquido que atua como um filme externo sobre o material devido aos efeitos de tensão superficial (STRUMILLO e KUDRA, 1986);

Umidade ligada: é aquele líquido que exerce uma pressão de vapor menor que a do líquido puro, numa dada temperatura. Isso pode ser devido ao fato da umidade estar retida em poros capilares finos, com superfícies fortemente curvas, ou pode conter uma grande proporção de sólidos dissolvidos, ou então pode estar em combinação física numa estrutura orgânica natural (FOUST,1982).

Umidade não-ligada: é aquela umidade que está em excesso em relação à umidade de equilíbrio correspondente ao ar saturado. Se o material for não-poroso, a umidade não-ligada encontra-se na superfície do sólido, já se o material for poroso, ela se encontra nos poros. Nos materiais não higroscópicos, todo líquido presente se encontra na forma de umidade não-ligada (OKADA et al., 1995).

2.3.2 Determinação do Conteúdo de Umidade em Sólidos

Um dos parâmetros mais importantes do material a ser seco é o conteúdo de umidade do produto, que é a proporção direta entre a massa de água presente no material e a massa de sólido. O conteúdo de umidade do material pode ser definido por duas maneiras (STRUMILLO e KUDRA, 1986):

a) Base seca:

$$X_{bs} = \frac{m_a}{m_s} \quad (2.3)$$

b) Base úmida:

$$X_{bu} = \frac{m_a}{m} = \frac{m_a}{m_a + m_s} \quad (2.4)$$

onde, m_a , m_s , m , X_{bs} , X_{bu} são massa de água no material, massa de material seco, massa de material úmido, conteúdo de umidade em base seca, conteúdo de umidade em base úmida, respectivamente.

2.3.3 Curvas de Secagem

Curva de secagem é a representação gráfica da variação da umidade do material em função do tempo, já a taxa de secagem é definida como a quantidade de umidade removida do material seco em unidade de tempo por unidade de superfície secando.

A taxa de secagem é dada por:

$$w_D = -\frac{m_s \cdot dX}{A \cdot dt} \quad (2.5)$$

ou

$$N = \frac{dX}{dt} \quad (2.6)$$

As Figuras 2.7 e 2.8 ilustram as curvas típicas de secagem e da taxa de secagem, respectivamente.

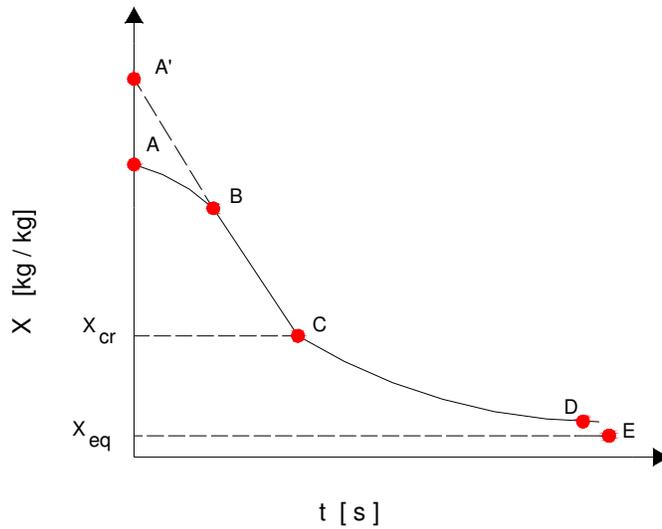


Figura 2.7 - Curva de secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

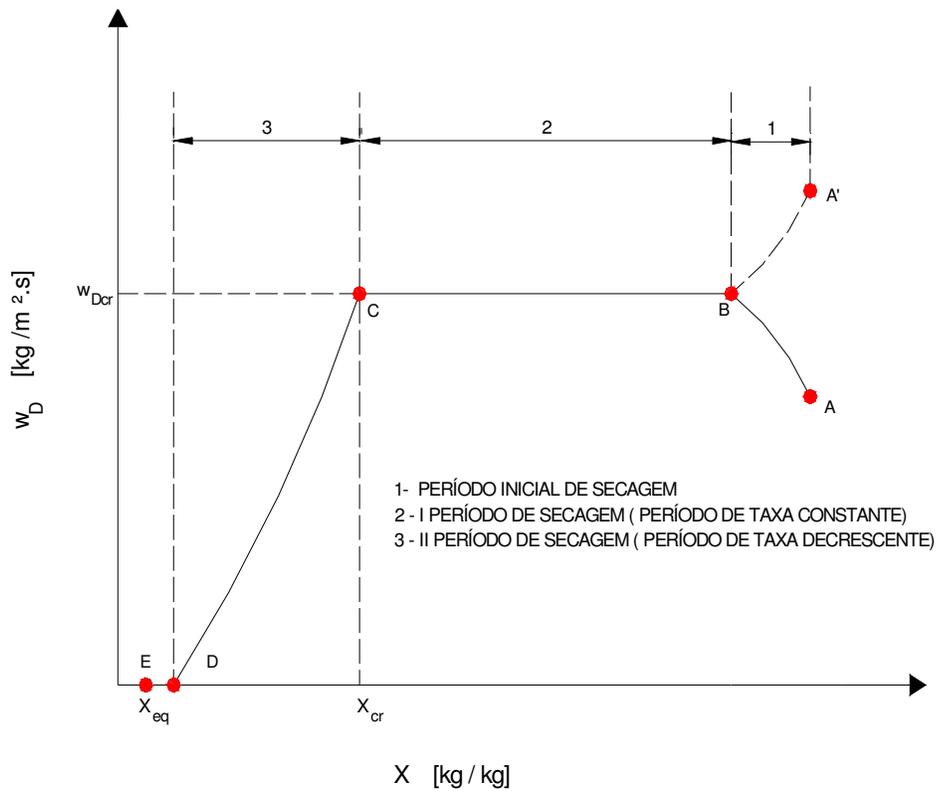


Figura 2.8- Curva da taxa de secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986)

Período inicial de secagem

No período inicial de secagem, o material a ser seco e sua superfície estão cobertos por uma camada líquida e têm a temperatura muito menor que a temperatura de equilíbrio

(T_s), e com isso, a taxa de secagem entre os pontos A e B (Figuras 2.7 e 2.8) aumentará até a temperatura da superfície do material atingir o valor correspondente à linha BC. Raramente o secador é alimentado com material úmido em uma temperatura $T > T_s$. Então, o período inicial de secagem é representado pela linha pontilhada A'B (Figuras 2.7 e 2.8). Geralmente, o período inicial de secagem é muito curto e na prática pode ser desprezado.

Período de Taxa Constante

O período de taxa constante (trecho BC das Figuras 2.7 e 2.8) é caracterizado pelo fato da taxa de secagem ser independente da umidade total do material em cada instante. Durante este período, a superfície exposta do material está saturada, existindo um filme contínuo de água sobre o sólido, que age como se o sólido não existisse. Nestas condições, a temperatura da superfície do material alcança a temperatura de bulbo úmido do gás.

Se o sólido não for poroso, a água removida neste período é principalmente a água superficial. Se por outro lado o sólido é poroso, o período de taxa constante continua durante um tempo maior, com a água que é removida da superfície sendo substituída pela água do interior do sólido. O mecanismo através do qual o líquido é levado até a superfície e, conseqüentemente, a taxa deste mecanismo varia com a estrutura do sólido. Em sólidos que possuem espaços vazios relativamente grandes, o mecanismo provavelmente é controlado pela tensão superficial e por forças de gravidade no seu interior. Em sólidos fibrosos ou de estrutura amorfa, o movimento do líquido através do sólido é devido à difusão. Como a velocidade de difusão é muito menor que a velocidade decorrente do mecanismo de capilaridade ou de gravidade, os sólidos em que o movimento do líquido é controlado por difusão têm um período de taxa constante menor, ou mesmo podendo se secar sem passar por esse período.

O conteúdo de umidade existente no fim do período de taxa constante é denominado umidade crítica ou ponto crítico, que é o instante em que o movimento do líquido do interior do sólido para a superfície é insuficiente para manter um filme contínuo sobre a superfície do sólido. Neste ponto, o movimento do líquido do interior para a superfície do sólido é insuficiente para compensar o líquido que está sendo evaporado. Assim, verifica-se que a umidade crítica depende da facilidade que o líquido possui de

movimentar-se através do material e, conseqüentemente, da estrutura do sólido em relação à taxa de secagem. Desta forma, pode-se dizer que a umidade crítica de um material é função da sua estrutura, da espessura com que ele é secado e da taxa de secagem.

Primeiro Período de Taxa Decrescente

O primeiro período de taxa decrescente [segmento *CD* das Figuras 2.7 e 2.8] começa no instante em que o material atinge a umidade crítica. Desta forma, a superfície do material torna-se cada vez mais seca.

Durante este período, tem-se dois mecanismos: o mecanismo que existia no período de taxa constante continua existindo, enquanto houver líquido saturado na superfície. Ao mesmo tempo, o vapor proveniente dos níveis mais baixos se difunde através do sólido para as regiões da superfície que não estão saturadas, tendo, em seguida, que se difundir no seio da corrente gasosa. Este mecanismo de difusão é muito lento, com isso, a taxa de secagem diminui rapidamente à medida que a umidade diminui (as regiões saturadas vão se tornando menores).

Segundo Período de Taxa Decrescente

O segundo período de taxa decrescente inicia a partir do ponto *D*, onde toda a evaporação ocorre no interior do material. Nesse período, todo o vapor que é retirado do sólido deve difundir-se através do sólido até a superfície e, em seguida, através da corrente gasosa. Isto faz com que a taxa decresça ainda mais.

Quando se atinge a umidade de equilíbrio, não se tem mais secagem e a taxa de secagem é nula. Essa umidade é alcançada quando a pressão parcial do vapor na superfície do sólido for igual à pressão do vapor na fase gasosa.

2.4 Medidas de Flutuação de Pressão em Secagem

Embora muitos pesquisadores tenham estudado a secagem de partículas em leito fluidizado gás-sólido (CHANDRAN et al.,1990; DiMATTIA et al.,1996; TATEMOTO et al., 2001; VITOR e MASSARANI, 2002; OLIVEIRA e FREIRE, 2004; POSWIATA e SZWAST, 2007), somente o trabalho de Chaplin (2005) envolve secagem em leito fluidizado com medidas de flutuação de pressão. Este autor conseguiu monitorar o teor de umidade de um material granulado através de uma técnica denominada S-Estatística, que é baseada na análise de caos. Adicionalmente, o pesquisador verificou a possibilidade de monitorar o teor de umidade a partir da frequência dominante e desvio padrão da flutuação de pressão. Ele observou que as variações ocorridas na fluidodinâmica do leito durante a secagem que puderam ser captadas pela metodologia de S-Estatística, não foram detectadas através da frequência dominante e desvio padrão da flutuação de pressão. O resultado obtido com a aplicação destas técnicas é mostrado na Figura 2.9.

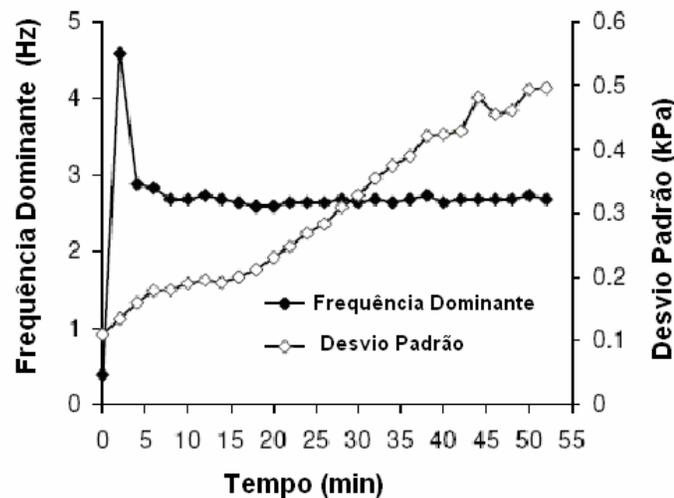


Figura 2.9 - Aplicação das técnicas de frequência dominante e desvio padrão de pressão em secagem (CHAPLIN, 2005)

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo aborda os materiais utilizados, suas características físicas e a descrição do sistema experimental. Será detalhada a metodologia utilizada para detectar a região onde o leito está tendendo à defluidização. Além de descrever toda parte que envolve a aquisição e processamento de sinais utilizados para a coleta de dados em cada teste.

3.1 Materiais Utilizados e suas Características Físicas

Neste trabalho, optou-se por utilizar dois tipos de sólidos particulados: areia e celulose microcristalina (CMC). Essa escolha se deu ao fato de serem partículas que apresentam densidades distintas, serem comumente encontradas em outros trabalhos da literatura, e também por estarem disponíveis no Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP.

As características físicas dos sólidos determinadas neste trabalho foram diâmetro médio e densidade aparente. A análise granulométrica das partículas foi realizada por peneiramento em peneiras padronizadas Tyler. Já a densidade aparente das partículas foi determinada através de picnometria, que é baseada no deslocamento do líquido pela adição das partículas sólidas. A Tabela 3.1 ilustra as características físicas dos sólidos utilizados neste trabalho.

Tabela 3. 1 - Características físicas dos materiais.

Características	Materiais	
	Areia	Celulose Microcristalina
Diâmetro médio de partículas (μm)	180, 325 e 460	180, 325 e 460
Densidade aparente (kg/m^3)	2500	980

3.2 Descrição do Sistema Experimental

O sistema experimental utilizado está montado nas dependências do Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos da Faculdade de Engenharia Química, da UNICAMP. Um esquema da montagem é apresentado na Figura 3.1.

O ar utilizado para a fluidização das partículas é fornecido por um soprador (1) da marca Ibram®, com pressão e vazão máximas de 2000 mmH₂O e 2 m³/min, respectivamente, acoplado a um motor de 4 cv. Esse soprador está conectado ao leito através de uma tubulação de aço galvanizado com 0,051 m de diâmetro interno. Tanto a válvula globo (2) quanto o resfriador (3) encontram-se na tubulação, mas não foram utilizados nos experimentos.

A vazão de ar foi medida através de uma placa de orifício (6), e para isso a pressão manométrica na linha (4) e a queda de pressão dessa placa (5) foram obtidas a partir de dois transdutores de pressão. Tais transdutores serão detalhados no item 3.7.

A rotação do motor do soprador foi regulada com auxílio de um inversor de frequência (7) da marca Danfoss VLT® e Série 2800.

A tubulação conta também com um recipiente para colocar sílica gel (8) e um aquecedor (9), mas estes somente foram utilizados nos ensaios de secagem de sólidos.

O esquema experimental contém ainda duas válvulas esferas (10 e 11), sendo que para todos os ensaios realizados a válvula (11) manteve-se totalmente aberta e a (10), fechada.

Os sinais de pressão provenientes do plenum foram obtidos através de um transdutor diferencial de pressão (12). A coluna de fluidização (13) foi construída em acrílico e possui diâmetro interno de 0,143 m e altura de 0,71 m.

Todos os transdutores de pressão utilizados (4, 5 e 12) foram acoplados a um sistema de aquisição de dados (14), e os sinais obtidos por esses instrumentos eram visualizados e processados a partir de um microcomputador (15).

Na parte superior da coluna de fluidização, há uma tubulação em PVC de 0,038 m de diâmetro interno que faz conexão a um ciclone tipo Lapple (16), construído de aço inox, com a finalidade de coletar as partículas elutriadas na saída do leito.

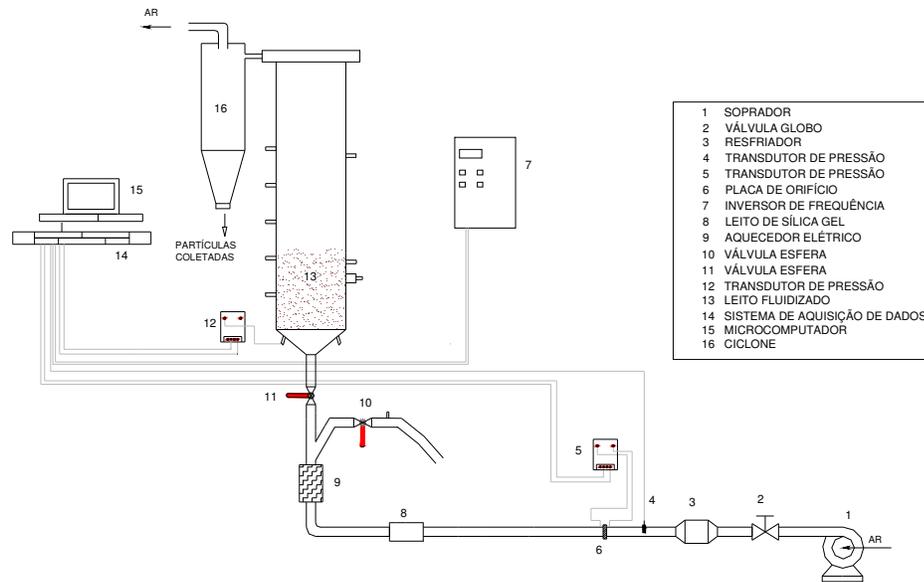
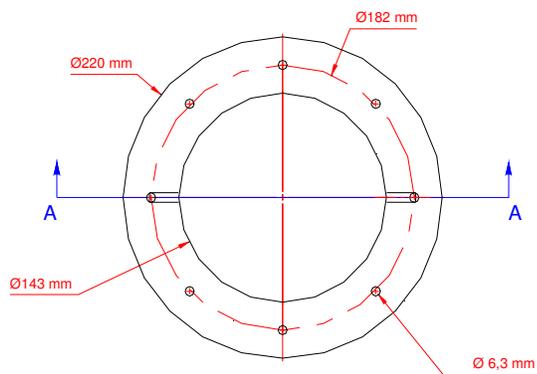


Figura 3. 1 - Esquema Experimental

A placa distribuidora do ar utilizada é de aço inox com 1,62 mm de espessura, do tipo perfurada, possuindo orifícios de 1 mm de diâmetro. Os orifícios da placa são distribuídos em arranjo triangular com espaçamento de 8,5 mm. Na parte superior dessa placa foi instalada uma tela de aço inoxidável com abertura de 75 μm , a fim de que as partículas sólidas que estavam sobre ela não passassem por seus orifícios e caíssem no plenum.

Detalhes dimensionais da coluna de fluidização são ilustrados na Figura 3.2.



Secção A-A

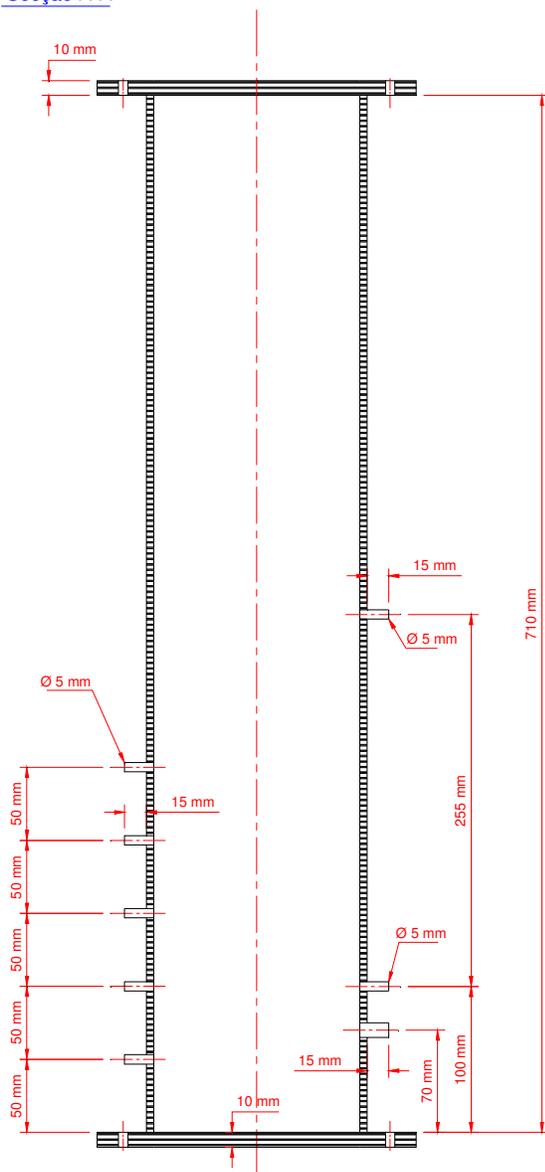


Figura 3.2 - Esquema da coluna de fluidização.

Na Figura 3.3 pode-se visualizar a coluna de fluidização, o transdutor de pressão utilizado para medidas no leito, o ciclone e o inversor de frequência.

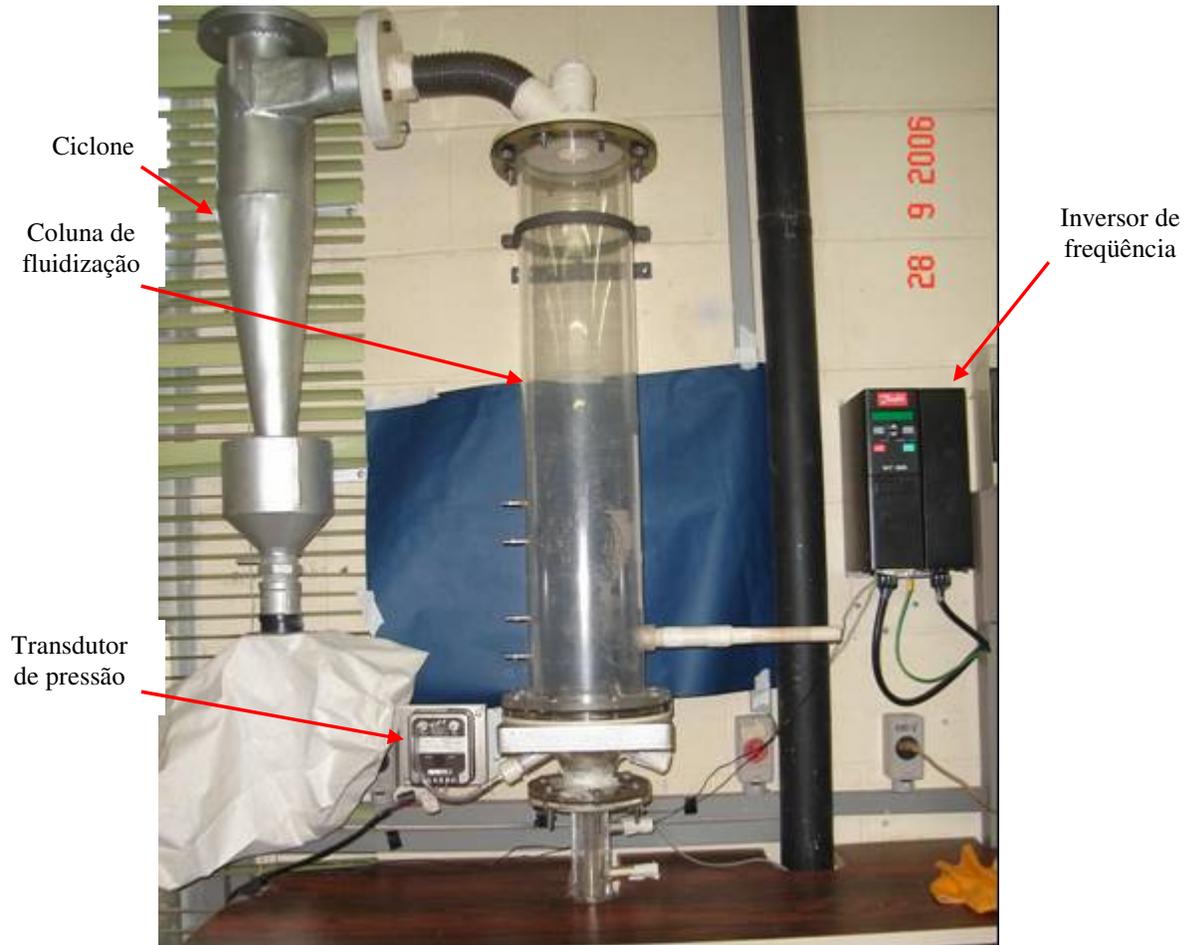


Figura 3.3 -Vista da coluna de fluidização, transdutor de pressão, ciclone e do inversor de frequência.

3.3 Análise Espectral

A análise espectral é uma ferramenta muito utilizada para caracterizar o conteúdo de frequência de um sinal. É, em geral, obtida através da aplicação da transformada de Fourier.

3.4 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier tem sido aplicada em diversas áreas, como Engenharia, Física, Oceanografia, Acústica. É uma importante ferramenta matemática que relaciona a variável tempo, espaço ou modelo de um sinal com a variável frequência associada ao mesmo.

Ela identifica ou distingue as diferentes frequências senoidais (e suas respectivas amplitudes), que combinam para desenvolver uma forma de onda arbitrária (BRIGHAM, 1988).

A qualidade da transformada de Fourier das amostras de um sinal dependerá de sua natureza (se permanente ou transiente durante a amostragem), bem como da qualidade da amostragem em si, ou seja, número de amostras tomadas e frequência de amostragem (KURKA, 2004). Matematicamente, ela é dada por:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad -\infty < f < \infty \quad (3.1)$$

onde,

$X(f)$ é denominada transformada de Fourier direta (ou espectro) de $x(t)$. E a condição para sua existência é que:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (3.2)$$

3.5 Transformada Discreta de Fourier

Não se pode medir $x(t)$ no intervalo de $-\infty$ a ∞ (Equação 3.1), pois os sinais tratados provêm da observação de fenômenos físicos e eles terão um início e um término

dentro dos limites finitos no tempo. Com isso, $x(t)$ apenas pode ser obtido em um intervalo de tempo finito T , logo $X(f)$ é estimado através da transformada de Fourier finita, dada por:

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j.2\pi.f.t} dt \quad (3.3)$$

Na prática, os sinais dinâmicos são apresentados sempre por suas versões amostradas e, portanto, limitadas a um intervalo de observação T e discretizadas nos valores igualmente espaçados de um tempo Δt . Com isso, as amostras de $x(t)$, igualmente espaçadas do intervalo de tempo Δt , podem ser utilizadas para se estimar o valor da integral de Fourier através de uma soma finita de termos (transformada de Fourier discreta), dada por (KURKA, 2004):

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{\frac{-j.2\pi.n.k}{N}} \quad (3.4)$$

onde,

x_n é a versão amostrada de $x(t)$ no instante $t = n \cdot \Delta t$;

N é o número total de amostras; e $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

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

3.6 Distribuição Espectral Normal em Leito Fluidizado

Os processos que utilizam leito fluidizado induzem a uma distribuição espectral de pressão de forma randômica, como consequência da presença de forças dinâmicas na interface partícula-fluxo de ar. Essa interação dinâmica ocorre em baixas frequências, proporcional à velocidade do fluido e às características físicas das partículas que estão sendo fluidizadas. Exceto em regime de fluidização do tipo *slugging*, em geral não se observa a presença de um único pico de frequência dominante em processos que envolvem leito fluidizado, e para um método de análise geral, a observação individual de frequências tem pouca utilidade.

A distribuição espectral de pressão, entretanto, carrega consigo informações interessantes sobre o estágio do processo de fluidização. Em regime de leito fixo, há uma distribuição de energia sem uma frequência dominante, indicando que as flutuações de pressão ocorreram aleatoriamente (BENDAT e PIERSOL, 1986). Já no caso de leito fluidizado há formação de bolhas de ar, e esta é a principal origem das flutuações de pressão (ROY et al., 1990). Neste caso, então, o espectro de pressão possui valores mais altos de amplitude e frequência.

Todos os comportamentos descritos acima podem ser medidos em termos de distribuição estatística das linhas espectrais. Uma curva exponencial semelhante à curva Gaussiana ou normal, se ajustada ao espectro de pressão, indica o estágio de um processo de fluidização. O valor médio da curva exponencial (frequência central) é uma medida total da dinâmica das partículas sólidas.

A partir do exposto, no presente trabalho é proposta uma metodologia utilizando a distribuição espectral normal para identificar a região onde o leito está tendendo à defluidização. Tal metodologia é descrita a seguir:

Inicialmente, coletam-se N pontos de pressão manométrica no plenum. Um exemplo desse sinal pode ser visualizado através da Figura 3.4.

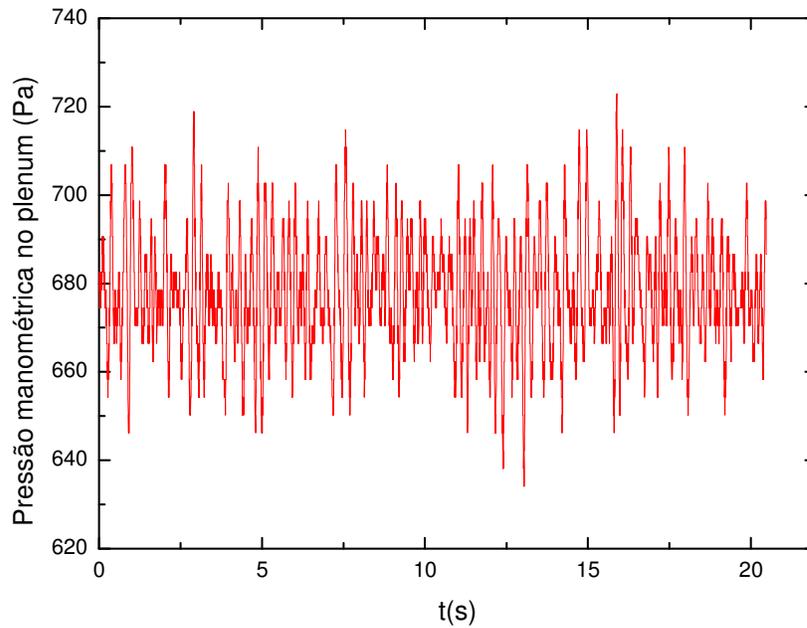


Figura 3.4 - Sinal de pressão manométrica no plenum

Após a realização da coleta do sinal de pressão no leito e da sua filtragem digital (item 3.11), extrai-se do mesmo o seu valor médio, com a finalidade de se eliminar o nível constante da pressão do leito. Tal procedimento corresponde a uma normalização do tipo “centralização na média” (*mean centring*), que consiste em subtrair a média de um vetor (μ_x) a cada elemento desse vetor, que é dada pela Equação 3.5 (LOPES, 2004).

$$P_{N,k} = P_k - \mu_x \quad (3.5)$$

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.

A Figura 3.5 mostra a pressão normalizada no domínio do tempo.

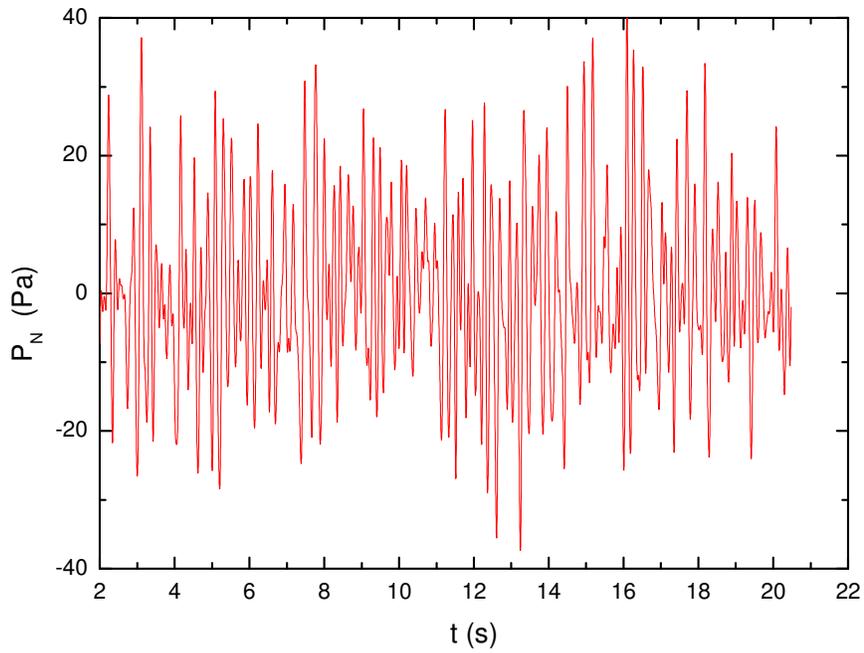


Figura 3.5 - Pressão normalizada no domínio do tempo.

O passo seguinte consiste na aplicação da Transformada Fourier no sinal de pressão normalizado, que é mostrada através da Figura 3.6.

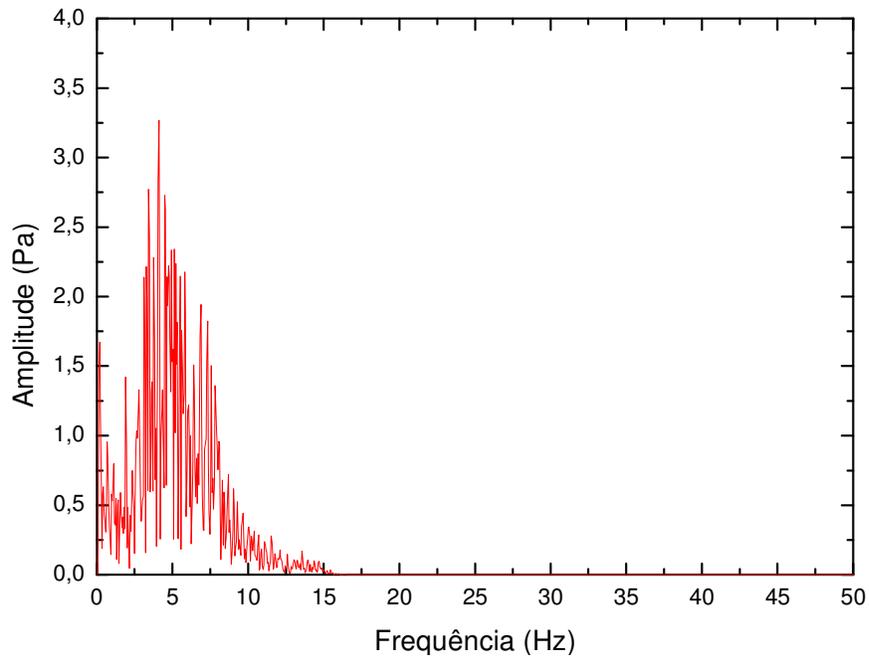


Figura 3.6 - Transformada de Fourier do sinal de pressão normalizado (espectro de pressão).

Após obter a Transformada de Fourier do sinal de pressão normalizado, é realizado um ajuste de uma curva exponencial semelhante à distribuição normal (curva Gaussiana) nesse sinal.

Distribuição normal (Gaussiana)

A distribuição normal é uma das mais importantes distribuições de probabilidades, sendo aplicada em inúmeros fenômenos em diversas áreas como Engenharia, Química, Matemática, Biologia, Medicina (FONSECA e MARTINS, 1982). Essa distribuição é dada pela seguinte expressão:

$$G'(f_k) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(f_k - f_m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.6)$$

sendo que,

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

σ é o desvio padrão dessa distribuição;

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

$N = 8192$.

Ajuste da curva 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 Gaussiana. Este ajuste é realizado da seguinte maneira:

Partindo-se da Equação 3.6 e aplicando-se o logaritmo natural dos dois lados, tem-se:

$$\ln[G'(f_k)] = \ln\left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right] - \frac{(f_k - f_m)^2}{2\sigma^2} \quad (3.7)$$

Fazendo-se:

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

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,

$$a = \frac{1}{2\sigma^2}, \quad (3.8a)$$

$$b = \frac{f_m}{\sigma^2}, \quad (3.8 b)$$

$$c' = \ln[A'] - \frac{f_m^2}{2\sigma^2}, \quad (3.8c)$$

e substituindo as Equações 3.8 (a, b e c) na Equação (3.7), tem-se:

$$\ln[G'(f_k)] = \ln[A'] + B', \quad (3.9)$$

ou seja,

$$\ln[G'(f_k)] = af_k^2 + bf_k + c' \quad (3.10)$$

Observa-se que na Equação (3.10) a função parabólica possui 3 parâmetros independentes (a , b e c), enquanto a curva Gaussiana (Equação 3.6), apenas 2 (f_m , σ). Isso porque a amplitude da curva de distribuição Gaussiana está acoplada ao desvio padrão da mesma, como se verifica na Equação (3.6). Assim, opta-se pelo uso da expressão de curva Gaussiana com uma nova amplitude de modulação dada pelo valor de A , ou seja:

$$G(f_k) = A \cdot e^{-\frac{(f_k - f_m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.11)$$

Partindo da Equação (3.11) e aplicando-se o mesmo procedimento para a obtenção das Equações (3.7 e 3.8 a, b e c), encontram-se as seguintes equações:

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

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

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

Logo, pela Equação (3.12c), pode-se obter A , que é dado por:

$$A = e^{c + \frac{f_m^2}{2\sigma^2}} \quad (3.13)$$

Tal 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. Salientando-se que o parâmetro c da Equação (3.13), e conseqüentemente o valor de A , não são utilizados na determinação da frequência central (f_m) e do desvio padrão da distribuição espectral (σ).

De maneira similar às Equações (3.9) e (3.10), obtém-se as Equações (3.14) e (3.15):

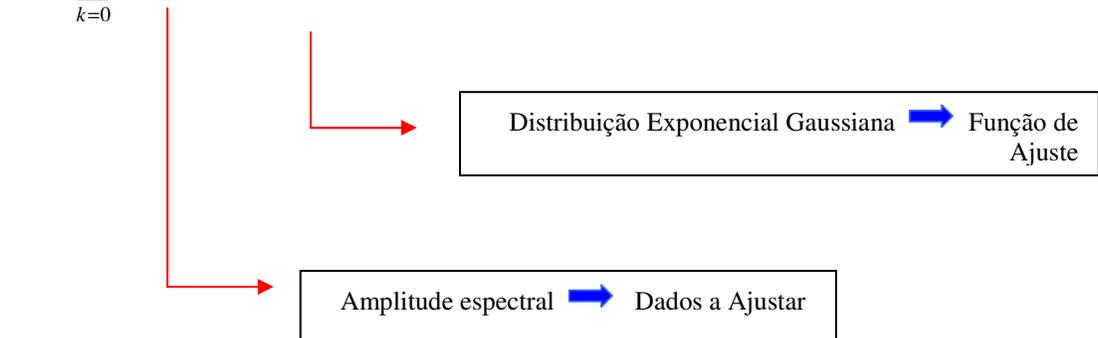
$$\ln[G(f_k)] = \ln[A] + B \tag{3.14}$$

ou seja,

$$\ln[G(f_k)] = af_k^2 + bf_k + c \tag{3.15}$$

O ajuste da Equação (3.16) é baseado no método dos mínimos quadrados. Este consiste da minimização do somatório dos quadrados dos resíduos entre o logaritmo da função de ajuste (distribuição exponencial Gaussiana) e o logaritmo dos dados a ajustar (amplitude do espectro de pressão), fazendo dessa maneira que a curva exponencial Gaussiana apresente o melhor ajuste dos pontos experimentais, isto é, do logaritmo das amplitudes da Transformada de Fourier do sinal de pressão normalizado (BARROS NETO, 2003). O resíduo é dado por:

$$e'_k = \sum_{k=0}^{N-1} [\ln[A_e(f_k)] - \ln[G(f_k)]]^2 \tag{3.16}$$



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.

Substituindo a Equação (3.16) na Equação (3.15), tem-se:

$$e'_k = \sum_{k=0}^{N-1} [\ln[A_e(f_k)] - [af_k^2 + bf_k + c]]^2 \quad (3.17)$$

os coeficientes a , b e c da Equação (3.17) definem a localização da curva. Estes são determinados através da seguinte equação (BARROS NETO, 2003):

$$x = [K^T K]^{-1} K^T y \quad (3.18)$$

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 3.7 mostra um exemplo do ajuste da curva no logaritmo natural da amplitude da transformada de Fourier, utilizando o *software* LabView.

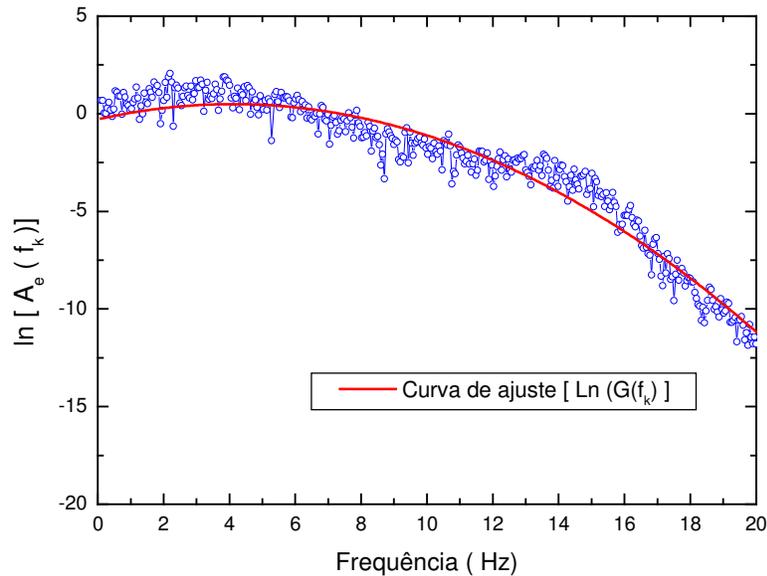


Figura 3.7- Logaritmo natural da amplitude da transformada de Fourier com a curva de ajuste, utilizando o método dos mínimos quadrados. CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$,

$$h_L = 25 \text{ cm}, u_o = 0,16 \text{ m/s}.$$

Com esse ajuste, obtêm-se os coeficientes a , b e c da curva. Em seguida, a e b são substituídos nas Equações 3.12 (a, b), e assim determina-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.

3.7 Instrumentação

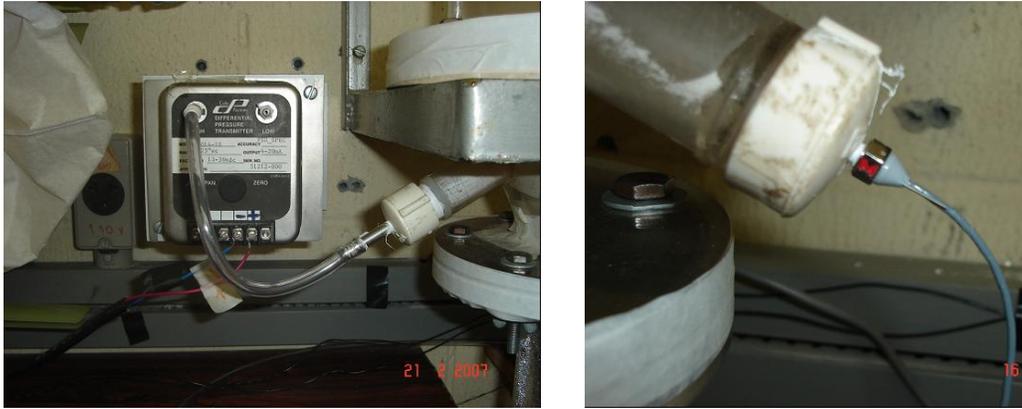
O sistema experimental foi instrumentado com medidores de pressão, como pode ser visualizado na Figura 3.1. Todas as medidas de pressão foram realizadas em tempo real utilizando-se transdutores de pressão, que são listadas a seguir:

a) Medidas de pressão manométrica e da queda de pressão no leito

a1) Transdutor de pressão

Trabalhos recentes encontrados na literatura que envolvem flutuação de pressão em leito fluidizado (Johnsson et al., 2000; Chen e Bi, 2003; Bai et al., 2005) utilizam transdutores de pressão com faixa operacional em frequências de até 1000 Hz, possuindo tempo de resposta mínimo de aproximadamente 1 ms. O Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos da Faculdade de Engenharia Química/ UNICAMP possui um transdutor de pressão diferencial (Cole Parmer 68014-18, com faixa de 0 a 6221 Pa, e sinal de saída de 4 a 20 mA) com tempo de resposta de 250 ms é muito maior aos transdutores de pressão utilizados pelos pesquisadores anteriormente mencionados. Com isso, surgiu a necessidade de verificar se a metodologia apresentada no presente trabalho seria afetada com a utilização de sinais de pressão provenientes de dois transdutores de pressão com tempo de resposta significativamente diferentes. Tal verificação foi possível com a utilização de um transdutor de pressão com tempo de resposta de 0,091 ms, da marca Endevco, modelo 8506-5, com faixa de 0 a 34,5 kPa. Este instrumento foi disponibilizado pelo Departamento de Projeto Mecânico da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

As Figuras 3.8 (a) e (b) ilustram os transdutores de pressão da marca Cole Parmer modelo 68014-18 e da marca Endevco, respectivamente.



(a)

(b)

Figura 3.8 - Fotos dos transdutores de pressão conectados ao plenum: (a) da marca Cole Parmer modelo 68014-18, (b) da marca Endevco.

Foram realizados vários ensaios experimentais tanto com o transdutor de pressão da marca Endevco, quanto com o da Cole Parmer, para assim definir o instrumento a ser utilizado em todas as corridas experimentais. Como não se observou uma variação significativa na metodologia com o emprego desses dois transdutores de pressão, optou-se pela utilização do transdutor da marca Cole Parmer. Os detalhes em relação aos critérios adotados para essa escolha são mostrados na seção 4.1.

a2) Localização do ponto de medida de pressão

Em todos os testes experimentais realizados, a pressão manométrica do leito foi monitorada a partir de um ponto de medida localizado no plenum. Para isso, foi utilizado um transdutor de pressão diferencial onde um de seus canais estava conectado à tomada de pressão no plenum e outro, exposto à atmosfera, como pode ser visto através da Figura 3.8 (a). Nos testes preliminares realizados com o transdutor de pressão de resposta rápida, este era inserido diretamente na tubulação do plenum, como se observa na Figura 3.8 (b).

Para cada corrida experimental, a região onde o leito está tendendo à defluidização, obtida a partir de medidas de pressão localizada no plenum, foi comparada

com o método tradicional de determinação da velocidade do gás na mínima fluidização, isto é, queda de pressão no leito *versus* velocidade superficial do gás.

Testes preliminares indicaram que, quando se descontava a queda de pressão provocada pela placa distribuidora, a medida da queda de pressão do leito resultava em valores muito similares à medida da pressão manométrica no plenum. Isto é mostrado na Figura 3.9.

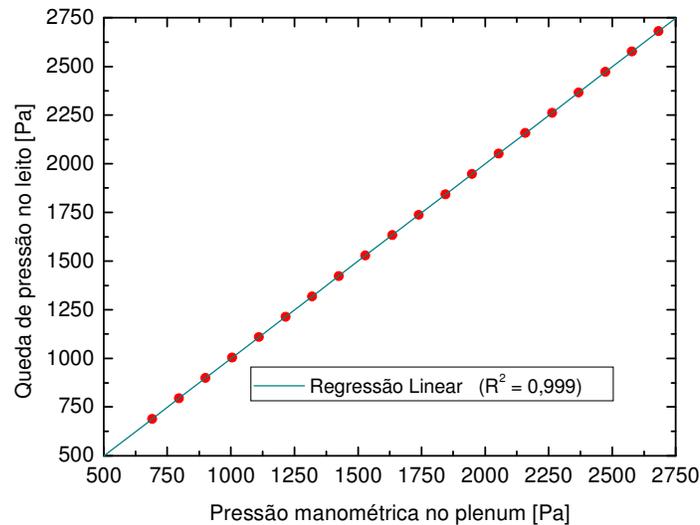


Figura 3.9 - Queda de pressão no leito *versus* pressão manométrica no plenum utilizando o transdutor de pressão diferencial – areia, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 0,15 \text{ m}$.

Devido ao resultado obtido não se realizaram mais tomadas de queda de pressão no leito, e sim, utilizaram-se os valores de pressão manométrica medidas no plenum para se obter a curva fluidodinâmica, sempre descontando a queda de pressão provocada pela placa distribuidora. Sendo que esta foi determinada a partir de uma corrida experimental com o leito sem partículas.

Durante a realização dos testes experimentais, teve-se o cuidado de verificar se essa similaridade se mantinha, o que ocorreu em todos eles.

b) Medida de pressão a montante e da queda de pressão através da placa de orifício

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.

Para tais medidas, foram utilizados um transdutor de pressão manométrica da marca Cole-Parmer 07356-01 (com faixa de 0 a 210.848 Pa, e sinal de saída de 1 a 5 V), e um transdutor de pressão diferencial da marca Smar LD301 (com faixa de 125 a 5.000 Pa, e sinal de saída de 4 a 20 mA), respectivamente.

Houve necessidade de utilizar placas de orifício com diferentes diâmetros de orifício, devido ao fato de se trabalhar com partículas de densidades distintas e com várias alturas de leito. Na Tabela 3.2 são apresentados os diâmetros dos orifícios utilizados.

Tabela 3. 2 - Diâmetros dos orifícios utilizados.

Material	d_p (μm)	Diâmetro do orifício da placa (m)
Areia	180	0,010
	325	0,012
	460	0,012
CMC	180	0,006
	325	0,010
	460	0,010

Para a determinação da vazão mássica do ar destinada ao leito de partículas, foram utilizadas as seguintes equações (OWER e PANKHURST, 1977):

$$Q = 0,0573 \cdot \varepsilon_f \cdot \alpha \cdot A_{or} \sqrt{\frac{\Delta P}{1 - m^2} \cdot \frac{P_{atm}}{273 + T_{ar}}} \quad (\text{kg/min}) \quad (3.19)$$

onde,

ε_f : fator de compressibilidade:

dado por:

$$\varepsilon_f = 1 - \frac{\beta \cdot \Delta P_{po}}{(P_{est} + P_{atm})} \quad (3.20)$$

$$\beta = 0,3041 + 0,0876 \cdot m - 0,1166 \cdot m^2 + 0,4089 \cdot m^3 \quad (3.21)$$

ΔP_{po} : queda de pressão na placa de orifício [cmH₂O];

P_{est} : pressão manométrica a montante da placa de orifício [cmH₂O];

P_{atm} : pressão atmosférica local [mmHg];

α : coeficiente de descarga:

onde:

$$\alpha = 0,5959 + 0,0312 \cdot m^{1,05} - 0,184 \cdot m^4 \quad (3.22)$$

A_{or} : área do orifício da placa [cm²];

$$A_{or} = \frac{\pi \cdot d_{or}^2}{4} \quad (3.21)$$

d_{or} : diâmetro do orifício da placa [cm]

m : relação entre a área do orifício da placa e a área da tubulação;

$$m = \frac{A_{or}}{A_t} \quad (3.23)$$

onde,

$$A_t = \frac{\pi \cdot d_t^2}{4} \quad (3.24)$$

d_t : diâmetro do orifício da tubulação (cm);

T_{ar} : temperatura do ar na entrada do orifício [°C];

3.8 Sistema de Aquisição de Sinais

O sistema de aquisição de sinais utilizado consistia dos seguintes componentes: transdutores de pressão, placa de aquisição de dados, bloco conector, computador e *software* Labview 7.1.

a) Transdutores de Pressão:

Como mencionado no item 3.7, foram utilizados três transdutores de pressão, e para captar sinais de pressão, eles necessitavam de uma fonte externa de alimentação. Com isso, esses instrumentos foram conectados à duas fontes estabilizadas da marca Lune com entrada de 110/220V- AC e saída de 20V e 1 A - DC. Após isso, vários testes foram realizados utilizando essas fontes, e todos resultaram em sinais de péssima qualidade, o que indicava a presença de ruído. Estes ruídos podem ser gerados pela rede de 60 Hz, ondas eletromagnéticas (rádio, TV, satélite, telefones celulares), comutação de motores, sistemas de ignição, fontes de alimentação comuns.

Após várias tentativas para a redução do ruído, conseguiu-se minimizá-lo a partir da substituição das fontes de alimentação por 2 baterias recarregáveis de 12V cada (marca Spak, de 7A), com isso, os picos de pressão indesejáveis desapareceram e a qualidade do sinal ficou nitidamente melhor. Exemplos desse fato podem ser vistos nas Figuras 3.10 e 3.11, que representam os sinais de pressão do leito sem e com a presença de baterias, respectivamente. Salientando-se que os dados apresentados em tais figuras não foram obtidos nas mesmas condições experimentais.

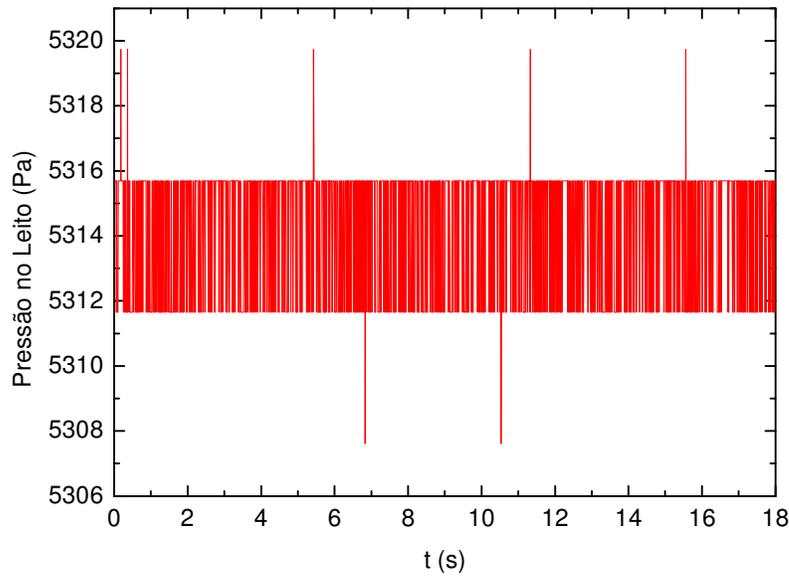


Figura 3.10 - Sinal de pressão do leito sem utilização de baterias.

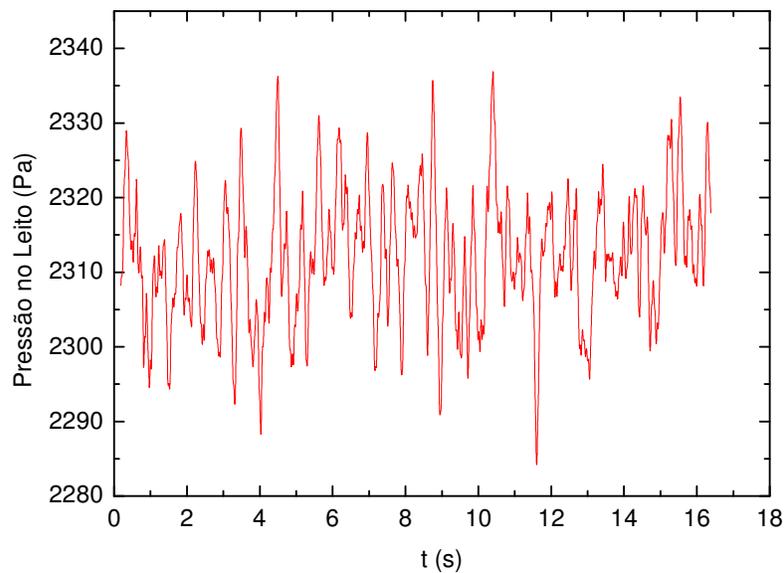


Figura 3.11 - Sinal de pressão do leito com uso de baterias.

Mesmo com a utilização das baterias, houve necessidade de verificar se o transdutor por si só geraria sinais indesejáveis que pudessem influenciar no resultado do espectro de pressão do leito com partículas. Para isso, foram coletados sinais de pressão no plenum, na ausência de partículas no leito, com o inversor de frequência mantido desligado e as duas baterias, ligadas. Nesses sinais aplicava-se a transformada de Fourier e obtinha-se assim o espectro de pressão para o leito sem partículas. O resultado pode ser visto na

Figura 3.12. Esta figura compara o espectro de pressão do leito sem partículas com aquele obtido por partículas de CMC, com diâmetro de 180 μm , altura leito fixo de 15 cm, $u_o = 0,017 \text{ m/s}$ (para esta velocidade, as partículas encontravam-se em regime de leito fixo).

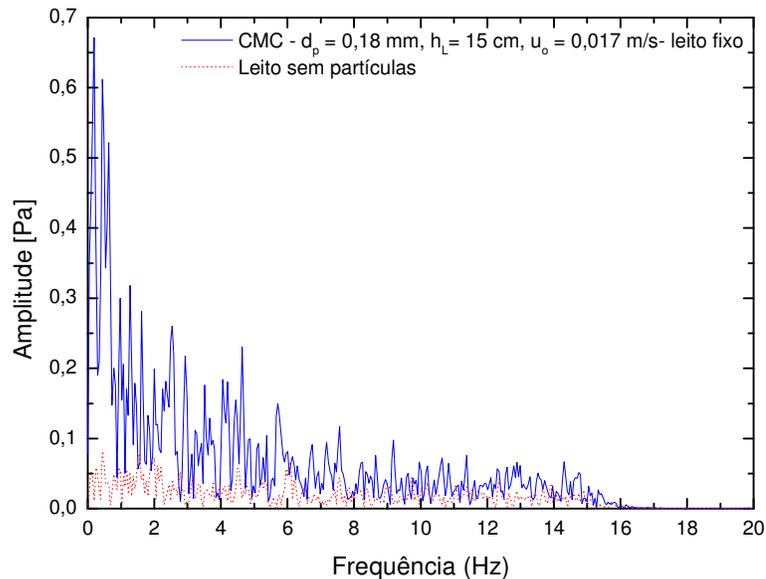


Figura 3.12 - Comparação da Transformada de Fourier: leito com partículas de CMC (leito fixo) e leito sem partículas.

Na Figura 3.12 pode-se observar que a amplitude do espectro do leito sem partículas é muito menor que o do leito com partículas, assegurando dessa forma que aquele não influenciará no resultado deste.

b) Placa de aquisição de dados, bloco conector, microcomputador e *software*:

Os sinais provenientes do transdutor de pressão foram adquiridos a partir de um sistema de aquisição de dados da marca National Instruments™, composto por uma placa de aquisição de dados PCI 6024 E, um bloco conector CB- 68LP, um microcomputador (Intel®, processador Pentium® 4, 2.0 GHz), e pelo *software* LabView 7.1™.

3.9 Instrumentos Virtuais

A partir do *software* LabView, pode-se criar programas denominados instrumentos virtuais. No presente trabalho foram construídos dois desses, sendo que o primeiro deles foi utilizado para:

a) A visualização gráfica dos sinais de pressão manométrica no plenum, e ao término de cada experimento, essas informações eram gravadas em arquivos com extensão *txt*;

b) Obter os valores médios da queda de pressão e da pressão manométrica à montante da placa de orifício, além de fornecer o valor médio da velocidade superficial do gás;

Já o segundo instrumento virtual foi criado com o intuito de realizar o processamento dos sinais de pressão manométrica no plenum. Estes sinais no domínio do tempo, que se encontravam gravados em arquivos com extensão *txt*, foram filtrados e normalizados através do segundo instrumento virtual e, posteriormente, aplicado o algoritmo da transformada rápida de Fourier (*FFT*). Com isso, tais sinais eram convertidos em domínio da frequência. Seguidamente, a estes dados era ajustada a curva exponencial Gaussiana, obtendo-se a frequência central e o desvio padrão da distribuição.

3.10 Frequência de Amostragem e Número de Pontos de Pressão

Para garantir uma adequada digitalização do sinal é necessário escolher uma frequência de amostragem que registre o sinal analógico corretamente. Se o valor dessa frequência não for superior a duas vezes o valor da frequência máxima do sinal que se pretende estudar, há uma sobreposição de forma de onda denominada *aliasing*. A presença deste fenômeno pode acarretar em uma análise equivocada dos resultados.

Em leito fluidizado, a frequência máxima do sinal geralmente é inferior a 10Hz. Embora uma taxa de amostragem de 20 Hz fosse suficiente (JOHNSSON et al, 2000), os trabalhos mais recentes encontrados na literatura utilizam uma frequência de amostragem de 400 Hz (BRIENS, et al., 2003; CHAPLIN, 2005, BAI et al., 2005). No presente trabalho

optou-se por utilizar o mesmo valor de amostragem que estes pesquisadores, permitindo realizar comparação de resultados. Pretende-se também, futuramente, a aplicação da metodologia proposta em recobrimento de partículas em leito fluidizado, a fim de se desenvolver um sistema de controle que seja utilizado em tempo real. Para isso, também é importante que o tempo de aquisição e de processamento do sinal de pressão seja bem curto, ocorrendo em aproximadamente 20 s com a utilização de frequência de amostragem de 400Hz e 8192 pontos de pressão.

Optou-se por utilizar 8192 pontos em cada tomada de pressão, pois, com uma taxa de amostragem de 400 Hz, resulta em frequência com resolução de 0,048 Hz, que é um valor conveniente para análise de espectro que possui sinais em baixas frequências. Na literatura foram encontrados vários trabalhos que também utilizam esse mesmo número de pontos, como por exemplo: JOHNSON et al, 2000, BRIENS, et al., 2003, FELIPE, 2004, CHAPLIN, 2005, BAI et al., 2005, FELIPE e ROCHA, 2007.

3.11 Especificação do Filtro Digital

Como mencionado anteriormente, para cada teste realizado, os sinais de pressão no plenum eram coletados e armazenados em arquivo com extensão *txt*. Optou-se pela não utilização de filtro nesta primeira parte, já que se tinha o intuito de encontrar o mais adequado somente quando esse sinal fosse processado.

Após a finalização de cada corrida experimental, iniciava-se o processamento dos sinais de pressão manométrica do leito. Nesta fase, foram testados todos os filtros digitais disponíveis no *software* Labview, e os melhores resultados foram obtidos quando utilizado o filtro digital de resposta infinita ao impulso (*IIR*), do tipo passa baixa, com topologia *Butterworth*. Além do tipo e topologia do filtro, era necessário especificar a sua ordem, e esta afetava significativamente o valor da frequência central, para o mesmo ensaio experimental. A Figura 3.13 mostra um exemplo do comportamento da ordem na filtragem de um sinal. Nesta figura, pode-se verificar que a inclinação da curva de filtragem varia significativamente com o valor da ordem do filtro. De acordo com o manual do Labview 7.1, quando se utiliza um filtro com topologia *Butterworth*, o aumento da ordem desse filtro faz com que este se aproxime de um filtro passa baixa ideal.

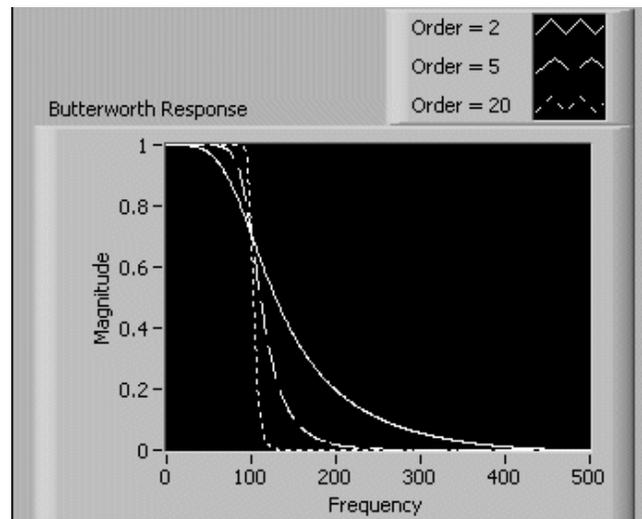


Figura 3.13 - Variação da curva de filtragem em função da ordem do filtro digital de resposta infinita ao impulso (*IIR*), LabView (2007)

A Figura 3.14 mostra a influência do filtro digital no resultado da transformada de Fourier do sinal de pressão normalizado. Através dessa figura pode-se verificar que o perfil dessa transformada praticamente não se altera com a presença do filtro.

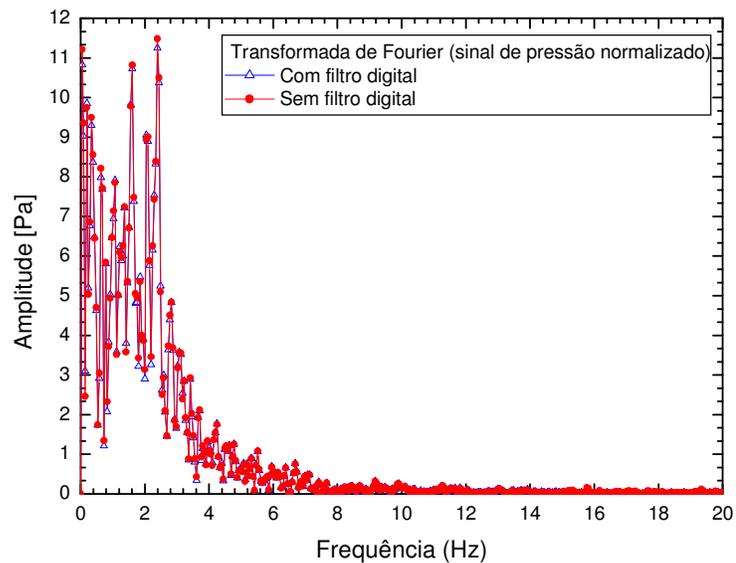


Figura 3.14 - Transformada de Fourier do sinal de pressão normalizado: com e sem filtro digital (*IIR*, *Butterworth*, passa baixa, ordem: 30).

Embora a transformada de Fourier não se altere com presença de filtro digital, e no Labview o valor padrão da ordem do filtro seja 3, no presente trabalho foi necessário que os sinais de pressão no domínio do tempo fossem filtrados com valores elevados de ordem antes da obtenção da transformada de Fourier. Em todos os ensaios experimentais, a utilização de valores baixos de ordem do filtro fez com que o perfil da frequência média Gaussiana apresentasse valores negativos. Isso porque, o cálculo da frequência central é feito sobre os logaritmos das amplitudes espectrais filtradas (Figura 3.15). No filtro de ordem baixa, a atenuação em torno da frequência de corte é pequena, fazendo com que a curva espectral resultante não apresente variações na região de corte, atribuindo conseqüentemente um valor médio negativo à curva de distribuição Gaussiana do sinal. Os filtros de mais alta ordem impõem uma variação mais acentuada na região de corte, de tal forma que o logaritmo do espectro apresenta uma queda acentuada naquela região. Tal comportamento reflete uma curva de distribuição Gaussiana com frequências centrais mais elevadas do que as do caso anterior.

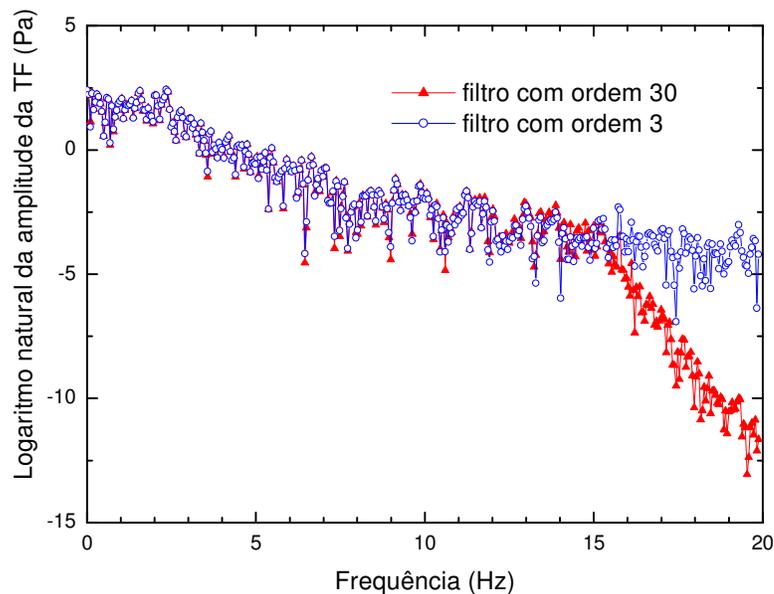


Figura 3.15 - Perfil do logaritmo natural da amplitude da transformada de Fourier obtido com filtro de ordem alta e baixa.

Em todos os ensaios experimentais do presente trabalho, variou-se a ordem do filtro desde valores baixos até altos. Isto teve como finalidade a identificação do valor mínimo da ordem para que o perfil da frequência média Gaussiana resultasse somente em

valores positivos, e assim fixar tal valor para ser utilizado em todos os experimentos. Verificou-se que em alguns ensaios, o perfil da frequência média Gaussiana apresentava somente valores positivos apenas quando se utilizavam valores de filtro compreendidos entre 20 e 30. No entanto, todos os ensaios realizados apresentaram o perfil da frequência média Gaussiana positivo com valores de ordem do filtro igual a 30. De maneira geral, esses perfis foram similares para valores de ordem até 35. Um exemplo do comportamento da frequência central com o aumento da ordem do filtro é ilustrado na Figura 3.16.

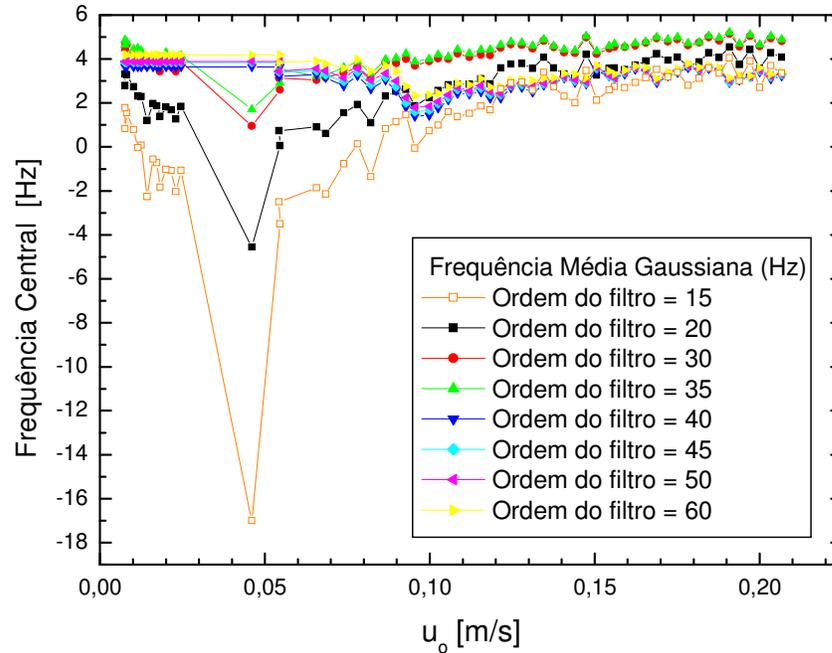


Figura 3.16 - Comportamento da frequência central em função da ordem do filtro.

Areia – $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$, volta.

De acordo com manual do LabView (2007), o incremento do valor da ordem do filtro resulta no aumento do número de pontos distorcidos, mas no presente trabalho este fenômeno ocorreu somente com a utilização de ordem de filtro com valores superiores a 35, como pode ser visualizado na Figura 3.16.

A partir do exposto, o valor da ordem do filtro foi mantido em 30 para todos os ensaios experimentais realizados.

A Figura 3.17 mostra as especificações do filtro digital de resposta infinita ao impulso (*IIR*) utilizadas em todas as corridas experimentais.

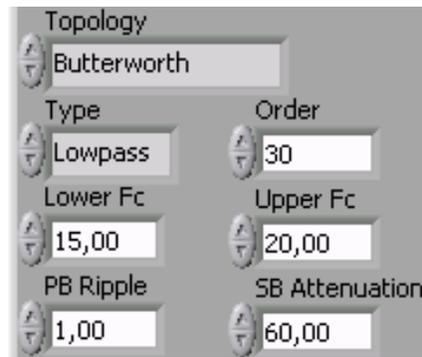


Figura 3.17 - Especificações do filtro digital de resposta infinita ao impulso (*IIR*)

3.12 Localização e Dimensões da Tomada de Pressão

Em 2004, Felipe fez um estudo sobre o local de instalação da tomada de pressão, utilizando medidas tanto acima da placa distribuidora quanto no plenum. Segundo o autor, o plenum também se mostrou apropriado para a coleta de sinais de pressão, e este local tem como vantagem a não obstrução dessa mangueira pela presença de sólidos. Com isso, no presente trabalho, a tomada de pressão foi mantida no plenum.

Os sistemas tomada - transdutor de pressão com grande volume de tubo que conecta o transdutor ao leito podem resultar em medidas de flutuação de pressão não somente com presença de ruídos, mas também defasadas no tempo. De acordo com van OMMEN (2001), a utilização de mangueiras com comprimento de tubos menores que 2,5 m e com diâmetros internos compreendidos entre 2 a 5 mm resultam em menores distorções do sinal de pressão. A partir do exposto, para medidas de pressão no plenum, utilizou-se uma tomada de pressão de 18 cm de comprimento e 4 mm de diâmetro interno. Já para medidas de pressão a montante e da queda de pressão na placa de orifício, as mangueiras transmissoras possuíam 10 e 84 cm de comprimento, respectivamente, e ambas tinham 5 mm de diâmetro interno. A tomada de pressão que estava conectada à placa de orifício tinha maior comprimento em relação aos outros dois sensores utilizados devido à falta de espaço físico nas proximidades da mesma para a inserção do transdutor de pressão.

A Figura 3.18 mostra uma foto do transdutor e da tomada de pressão conectada ao plenum.



Figura 3.18 - Foto do transdutor e da tomada de pressão.

3.13 Procedimento Experimental

Nesta seção é descrito o procedimento seguido para a realização de cada teste experimental.

Inicialmente, com auxílio de um multímetro, verificava-se se as duas baterias encontravam-se carregadas, isto é, cada uma delas deveria estar acusando tensão ao redor de 12V, caso contrário, antes de finalizar cada teste, ocorria erro de leitura, devido ao fato de elas estarem descarregadas. Logo após, abria-se o programa em Labview 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. A seguinte etapa consistia na observação de que a válvula esfera para o escoamento de ar no leito, situada abaixo da placa distribuidora, encontrava-se totalmente aberta; e aquela que era utilizada como *bypass*, fechada. A partir desse instante, o leito era alimentado com as partículas sólidas que seriam utilizadas durante a realização do ensaio experimental. Após este procedimento, compactava-se as partículas evitando, assim, que a corrida experimental

utilizando o incremento da velocidade de ar resultasse em valores de pressão similares à obtida com o decréscimo da velocidade de ar. Em seguida, acionava-se o inversor de frequência, e aumentava-se gradativamente sua frequência a fim de verificar em que valor se atingia a mínima fluidização; neste ponto, verificava-se se os transdutores de pressão estavam indicando valores coerentes, pela comparação dos valores acusados pelos transdutores com os indicados por manômetro do tipo U. Para todos os testes realizados, os valores mostraram ser muito próximos. Uma vez conhecida a frequência em que se alcançava a mínima fluidização das partículas, desligava-se o inversor de frequência e compactava-se o leito de partículas novamente. A partir disso, acionava-se definitivamente o inversor a uma frequência pré-estabelecida, para que esta estivesse situada em um valor suficientemente baixo para garantir que fossem coletadas aproximadamente 15 tomadas de pressão no regime de leito fixo, garantindo ao construir o gráfico, um valor razoável de pontos em tal regime. Após isso, iniciava-se o teste experimental, aumentando a vazão de ar até quando as partículas começavam a ser arrastadas para fora do leito; e, em seguida, reduzindo a vazão de ar até atingir novamente o regime de leito fixo.

3.14 Organização Experimental e Ensaios Realizados

A organização experimental para a CMC e para areia pode ser observada através das Tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente.

Tabela 3. 3 - Organização experimental – CMC

Celulose Microcristalina		
Ensaio Experimental	Fatores	
	Altura do leito (cm)	Diâmetro de partículas (μm)
1	15	180
2	25	180
3	15	325
4	20	325
5	25	325
6	15	460
7	25	460

Tabela 3. 4 - Organização experimental – Areia

Areia		
Ensaio Experimental	Fatores	
	Altura do leito (cm)	Diâmetro de partículas (μm)
1	15	180
2	25	180
3	15	325
4	20	325
5	25	325
6	15	460
7	25	460

Para cada ensaio experimental, foram coletadas aproximadamente 60 medidas de pressão manométrica no plenum, sendo que 15 delas eram obtidas enquanto as partículas se encontravam estagnadas, e as outras 45, quando estavam fluidizadas. Como mencionado anteriormente, cada medida de pressão era composta de 8192 pontos e estes eram gravados em arquivos de extensão *txt* para posterior análise. Durante a realização de cada ensaio, a frequência do inversor incrementava-se em torno de 0,2 Hz, o que resultava em um aumento na velocidade superficial do gás da ordem de 10^{-4} m/s, assegurando, assim, que uma vasta quantidade de valores de frequência central fosse obtida numa dada faixa de velocidade.

3.15 Ensaios Experimentais Envolvendo Processo de Secagem

No Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos também são realizadas pesquisas envolvendo secagem de partículas em leito fluidizado gás-sólido. Portanto, foi feito um estudo utilizando a metodologia proposta e as técnicas de frequência dominante (obtida através de espectro de potência) e de desvio padrão da flutuação de pressão para verificar a possibilidade da aplicação das três técnicas mencionadas na identificação do ponto crítico (que representa o teor de umidade no final do período de taxa constante,

descrito na Seção 2.3.3). Como no período de taxa constante há um filme contínuo de água sobre o sólido, as forças interpartículas existentes devido às pontes líquidas são muito mais fortes em relação ao período de taxa decrescente. Esse comportamento pode resultar numa pequena variação da fluidodinâmica das partículas na transição desses períodos, capaz de ser detectada pelas técnicas a serem analisadas.

3.15.1 Materiais e Métodos - Secagem

Foram realizados ensaios preliminares para selecionar um material que apresentasse tanto o período de taxa constante quanto o decrescente, para assim identificar o ponto crítico. A partir desses, verificou-se que a celulose microcristalina apresenta tais características e, com isso, para os ensaios de secagem, utilizou-se esse sólido com dois diâmetros médios de partículas: 275 e 460 μm .

O sistema experimental utilizado foi o mesmo descrito na Seção 3.2. Nos ensaios de secagem, o ar proveniente do soprador passava por um leito de sílica gel para retenção da umidade, e em seguida atingia a temperatura de trabalho com auxílio de um aquecedor elétrico instalado na tubulação.

Para as medidas de pressão no plenum, foram utilizados tanto o transdutor da marca Cole Parmer (modelo 68014-18, com faixa de 0 a 6221 Pa), quanto o da marca Endevco (modelo 8506-5, com faixa de 0 a 34,5 kPa). Embora mencionado no item 3.7 que a utilização desses transdutores resulta em perfis da frequência média Gaussiana similares, o intuito neste caso foi verificar se o mesmo comportamento era observado em partículas úmidas. Além disso, no caso da secagem, verificaram-se dois novos parâmetros para a identificação do ponto crítico: frequência dominante e desvio padrão da flutuação de pressão.

3.15.1.1 Umidificação do material sólido

Para a realização dos ensaios de secagem, foi necessário umidificar artificialmente a celulose microcristalina, pois o material disponível Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos possuía teor de umidade inicial inferior 10% de umidade. A

umidificação do sólido se deu da seguinte maneira: primeiramente, cerca de 500 g de amostra era colocada sob uma peneira, que continha uma tela de aço inoxidável com malha de 75 μm . Em seguida, o conjunto era inserido em um banho de água a uma temperatura em torno de 100 °C. No intervalo de tempo de 5 a 10 minutos, mexia-se o material com uma espátula. O teor umidade desse sólido era monitorado por uma termobalança da marca OHAUS, modelo MB200. Quando se atingia a umidade desejada, o material era armazenado em recipiente plástico e imediatamente fechado e vedado.

3.15.1.2 Procedimento Experimental – Secagem

Inicialmente, o leito de sílica gel era preenchido. Em seguida, abria-se a válvula esfera que era utilizada como *bypass* e fechava-se aquela que direcionava o ar no leito, situada abaixo da placa distribuidora. Após esse procedimento, o inversor de frequência era acionado a uma frequência pré-determinada. Neste instante, ligava-se o aquecedor elétrico e aguardava-se que o ar atingisse a temperatura de 70°C e mantivesse em regime permanente. Quando isso ocorria, alimentava-se o leito com cerca de 0,650 kg de partículas sólidas úmidas e abria-se o programa em LabView. Após, fechava-se a válvula esfera *bypass* e abria-se a outra para que o ar aquecido fluidizasse as partículas. Neste instante, iniciava-se o ensaio de secagem.

Em um intervalo de tempo pré-determinado, coletava-se cerca de 0,50g de amostra do interior leito, totalizando em torno de 23 amostras por ensaio. A coleta era feita com auxílio de um amostrador inserido na parte lateral do leito, como pode ser visualizado na Figura 3.19.

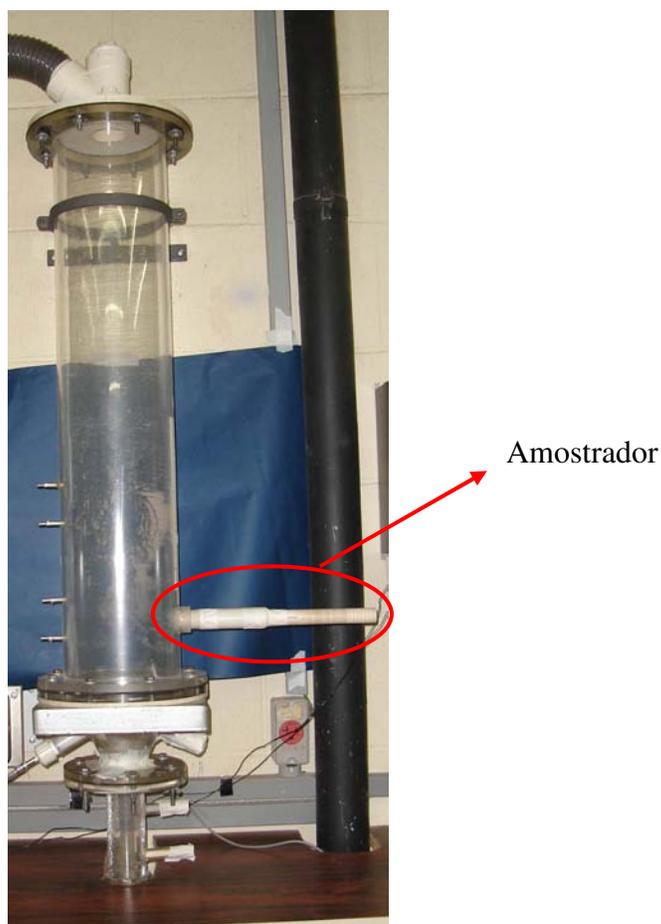


Figura 3.19 - Foto do amostrador utilizado na coleta das partículas no leito.

As amostras retiradas do leito eram armazenadas em potes de vidro previamente pesados e tampados imediatamente após a inserção da amostra. Em seguida, eram pesados e acondicionados em dessecador para posterior determinação do conteúdo de umidade. No instante em que cada amostra era coletada do leito, o sinal de pressão do plenum era gravado em arquivo do tipo *txt*. O tempo total de secagem era de aproximadamente 75 minutos, estimado através de ensaios preliminares. No final da secagem, todos os potes contendo amostras eram colocados na estufa a 105°C durante 24 horas para a determinação do conteúdo de umidade. Após este procedimento, plotou-se a curva de secagem com os valores de umidade em função do tempo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos 14 ensaios experimentais obtidos com a redução da velocidade de fluidização. Os resultados obtidos com o incremento da velocidade do gás estão listados no APÊNDICE A. Este capítulo conta também com os resultados referentes aos ensaios de secagem. Portanto, serão discutidos os seguintes aspectos:

- Influência da utilização de transdutores de pressão com tempo de resposta apreciavelmente diferente sobre a metodologia proposta;
- Alguns resultados do comportamento da pressão no tempo e a respectiva transformada de Fourier, para as partículas de CMC e areia;
- Resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta: perfis da frequência média Gaussiana e do desvio padrão da distribuição, além da curva fluidodinâmica para cada teste realizado;
- Resultados obtidos da secagem de sólidos visando verificar a possibilidade da identificação do ponto crítico (descrito na Seção 2.3.3), a partir das seguintes técnicas: metodologia proposta no presente trabalho; frequência dominante e desvio padrão da flutuação de pressão.

4.1 Influência da Utilização de Transdutores de Pressão com Tempo de Resposta Distinto sobre a Metodologia Proposta.

Como mencionado na seção 3.7, foram realizados alguns ensaios experimentais para verificar se a metodologia sofreria alteração significativa com a utilização de dois tipos de transdutores de pressão com tempo de resposta apreciavelmente diferente. Os instrumentos analisados foram:

- a) Transdutor de pressão da marca Endevco, modelo 8506-5, com faixa de 0 a 34,5 kPa e com tempo de resposta de 0,091 ms;
- b) Transdutor diferencial de pressão da marca Cole Parmer, modelo 68014-18, com faixa de 0 a 6,2 kPa e com tempo de resposta de 250 ms.

A Figura 4.1 mostra os sinais de pressão obtidos utilizando os dois transdutores em estudo. Esses instrumentos encontravam-se conectados ao plenum e os pontos de pressão foram coletados simultaneamente. Nesta figura, verifica-se que a flutuação de pressão captada pelo transdutor da marca Cole Parmer é significativamente diferente à obtida pelo da marca Endevco. Esse comportamento deve-se ao fato dos dois instrumentos utilizados apresentarem respostas dinâmicas diferentes.

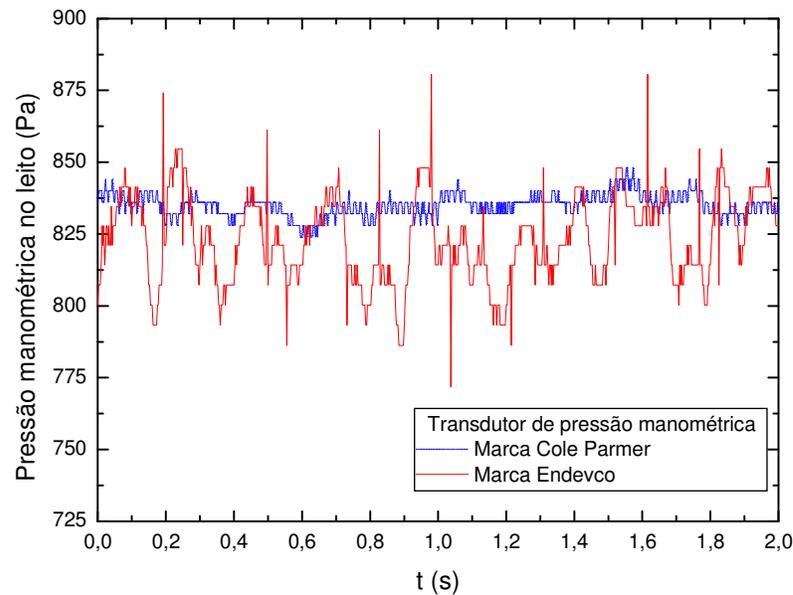


Figura 4. 1- Sinais de pressão manométrica medidas a partir de transdutores da marca Cole Parmer e Endevco.

Após isso, foram obtidos os perfis das frequências médias Gaussianas, a partir de sinais de pressão no plenum oriundos dos dois transdutores de pressão, que podem ser visualizados na Figura 4.2. Cada ponto da curva de frequência média Gaussiana dessa figura é referente a 8192 pontos de pressão manométrica coletada no plenum.

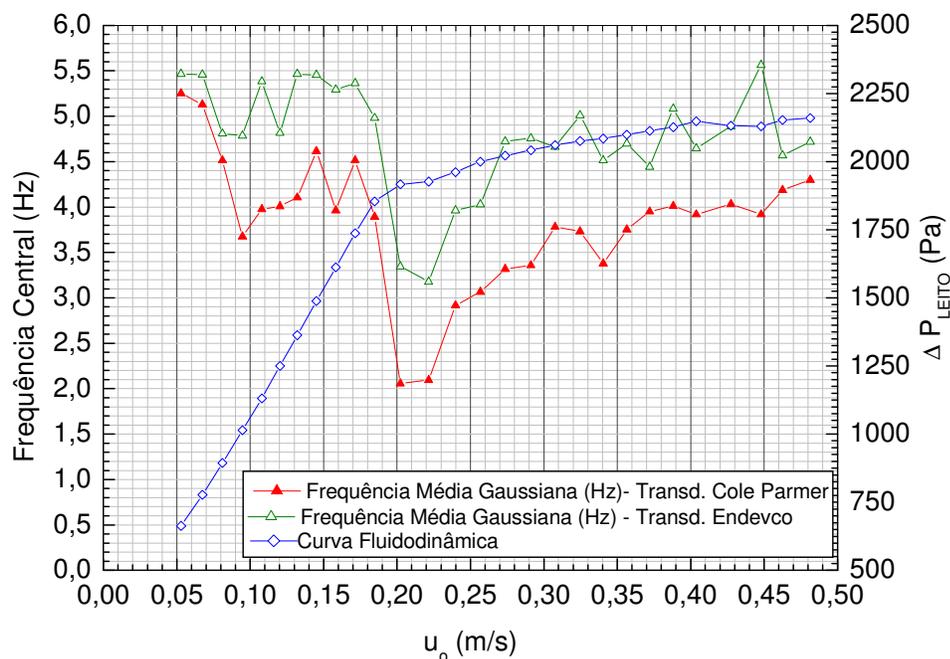


Figura 4. 2- Influência dos transdutores de pressão das marcas Endevco e Cole Parmer na metodologia apresentada no presente trabalho.

Apesar das diferenças observadas nos valores de pressão apresentados na Figura 4.1, os perfis de frequência média Gaussiana da Figura 4.2 resultaram similares em todos os testes preliminares realizados. Embora o valor da frequência central seja sempre maior quando utilizado o transdutor de pressão da marca Endevco, as duas curvas apresentam a região onde o leito está tendendo à defluidização nas mesmas velocidades superficiais do gás, fazendo com que, para essa finalidade, não haja uma diferença significativa na metodologia quando se opta por um desses instrumentos. Em vista disto, em todos os ensaios realizados utilizou-se o transdutor de pressão da marca Cole Parmer.

4.2 Comportamento da Pressão no Tempo e a Respectiva Transformada de Fourier

As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram um segmento de tempo do sinal de pressão no leito medido no plenum e a respectiva transformada de Fourier para as partículas de CMC e areia, respectivamente. O regime de leito fixo é mostrado nas Figuras 4.3 (a) e (b) para CMC, e 4.4 (a) e (b) para areia. A condição de leito fluidizado é ilustrada nas Figuras 4.3

(c) e (d) para CMC, e 4.4 (c) e (d) para areia. Em comparação com o leito fluidizado, verifica-se que o regime de leito fixo apresenta baixas amplitudes de flutuação de pressão, as quais são conseqüências da ausência de bolhas de ar. Acredita-se que as pequenas flutuações de pressão observadas em leito fixo (Figuras 4.3(a) e 4.4 (a)) são causadas pela vibração de algumas partículas durante a passagem do gás através do leito. Por outro lado, no regime de fluidização, a amplitude da flutuação de pressão aumenta com o diâmetro das partículas e com a velocidade do gás (BI, 2007; SVOBODA et al., 1984). Além disso, em leito fluidizado, o espectro de pressão possui valores mais altos de amplitude e conteúdo de freqüência que no caso do regime de leito fixo.

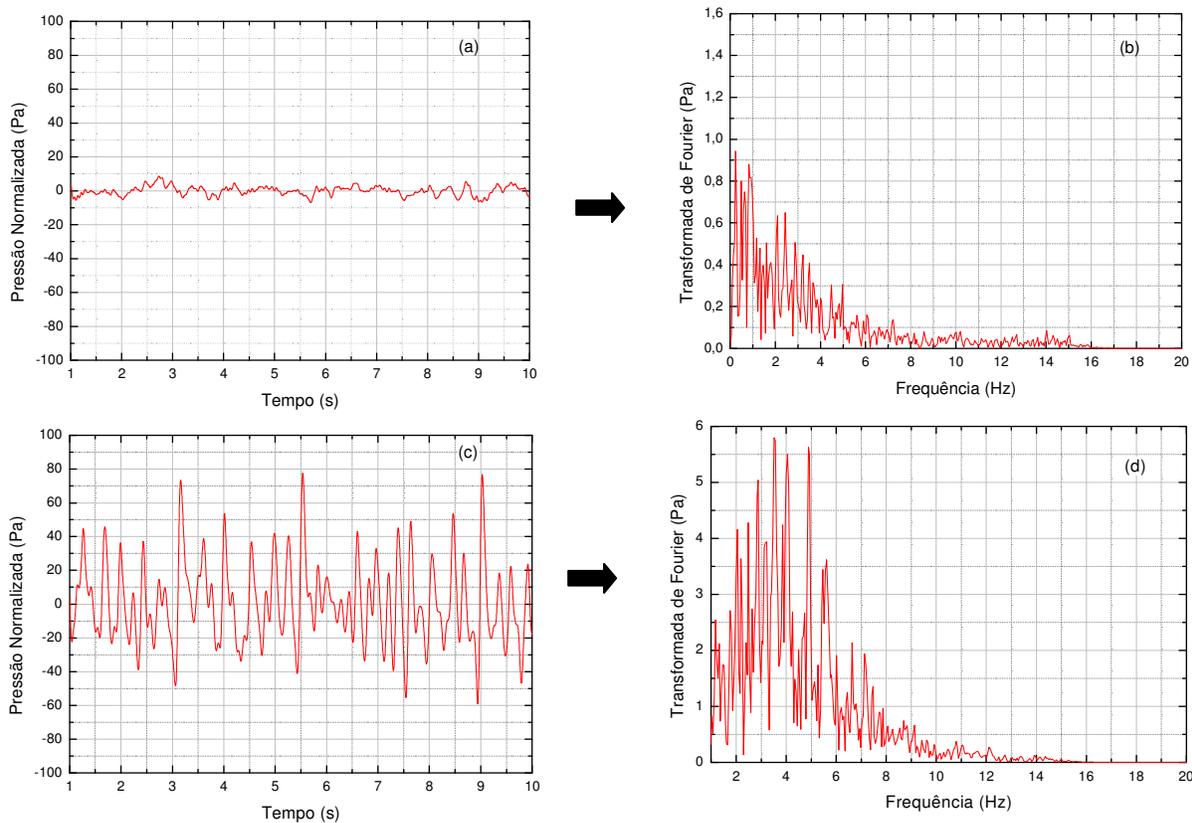


Figura 4. 3 -Comportamento da pressão no tempo: a) regime de leito fixo, $u_o = 0,056$ m/s; c) leito fluidizado, $u_o = 0,168$ m/s. Transformada de Fourier do sinal (composto de 8192 pontos de pressão): b) leito fixo; d) leito fluidizado --- CMC, $d_p = 325$ μm , $h_L = 20$ cm.

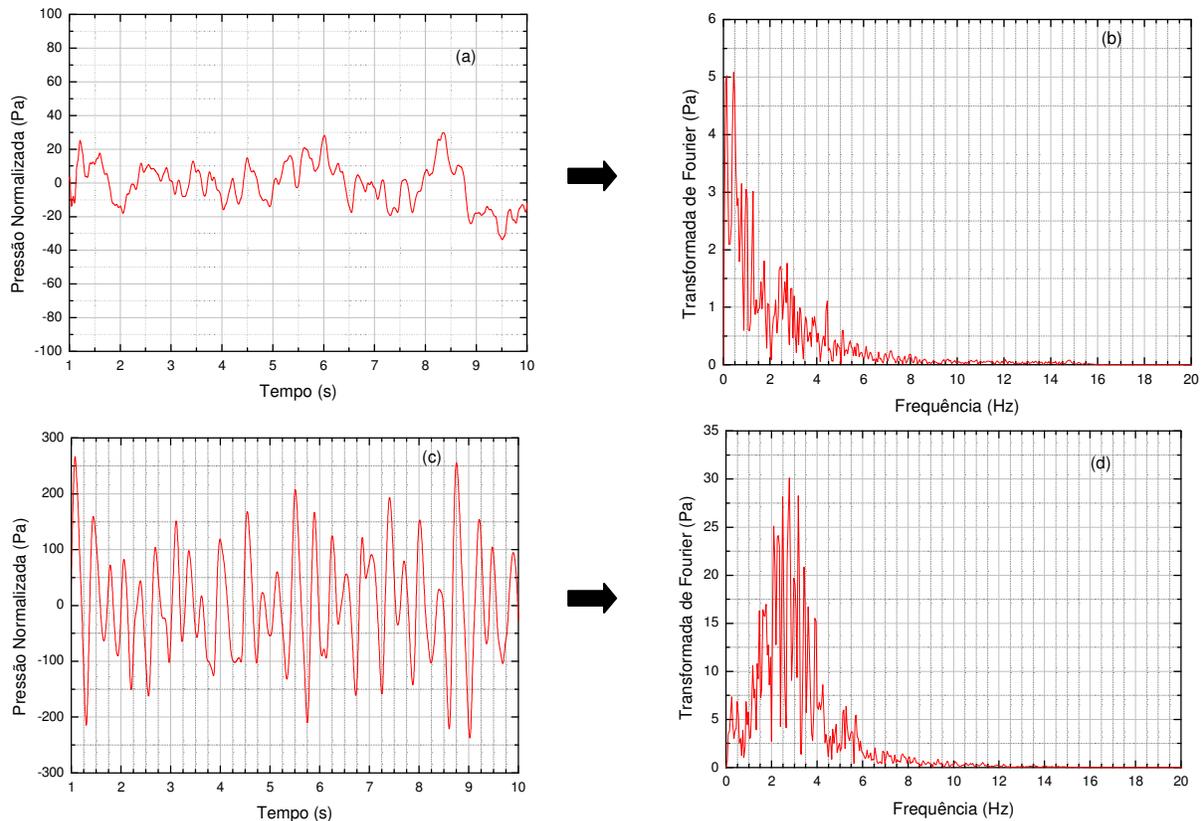


Figura 4. 4- Comportamento da pressão no tempo: a) regime de leito fixo, $u_o = 0,105$ m/s; c) leito fluidizado, $u_o = 0,308$ m/s. Transformada de Fourier do sinal (composto de 8192 pontos de pressão): b) leito fixo; d) leito fluidizado--- Areia, $d_p = 325$ μ m, $h_L = 20$ cm.

4.3 Aplicação da Metodologia Proposta – Resultados obtidos

As Figuras 4.5 a 4.18 mostram os perfis da frequência média Gaussiana e do desvio padrão da distribuição sobre a curva fluidodinâmica para as partículas de CMC e areia, obtidos através da redução da velocidade superficial do ar. De maneira geral, a frequência média Gaussiana atinge um valor mínimo quando o leito está tendendo à defluidização, ou seja, quando a velocidade superficial do gás está próxima à velocidade do gás na mínima fluidização (o que pode ser verificado com auxílio da curva fluidodinâmica).

Em relação ao desvio padrão da distribuição, este sofre uma pequena elevação na região onde o leito está tendendo à defluidização. Este comportamento foi observado em todos os ensaios realizados.

No presente capítulo, as figuras referentes aos ensaios experimentais serão apresentadas seguindo a ordem por tipo de material, diâmetro de partículas e altura de leito fixo. Primeiramente serão mostrados os resultados obtidos com CMC e, posteriormente, os com areia.

a) Tipo de partícula: CMC, diâmetro de partículas: 180 μm , alturas de leito fixo: 15 e 25 cm.

As Figuras 4.5 e 4.6 referem-se às alturas de leito fixo de 15 e 25 cm, equivalendo a uma relação altura de leito - diâmetro interno do leito de 1,05 e 1,75, respectivamente. Como mencionado anteriormente, para todos os ensaios experimentais realizados no presente trabalho, a região onde o leito está tendendo à defluidização é caracterizada pela queda acentuada no valor da frequência média Gaussiana, e é sempre comparada com a curva fluidodinâmica, a fim de verificar se realmente situa-se nas proximidades do início da movimentação das partículas no leito.

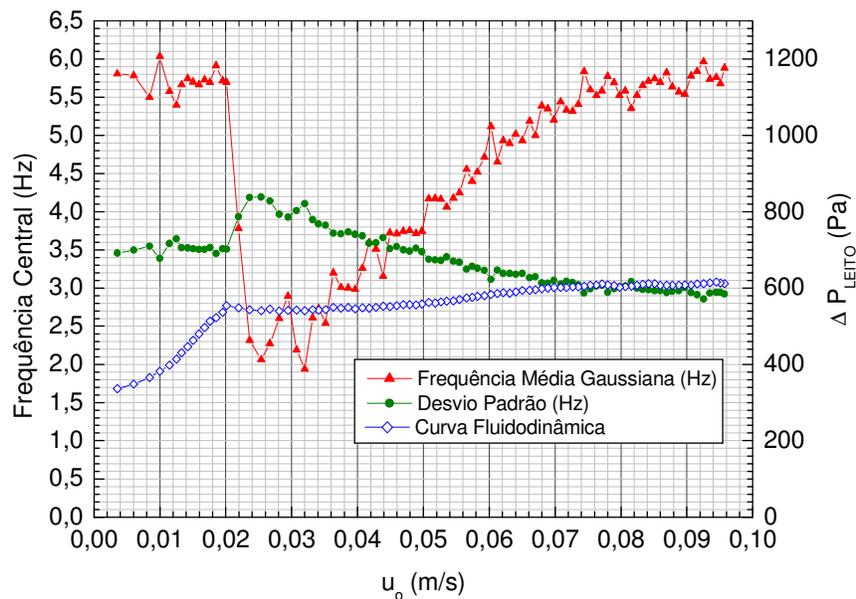


Figura 4. 5-Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana –

CMC, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar –

$$u_{mf} \text{ (curva fluidodinâmica)} \cong 0,022 \text{ m/s.}$$

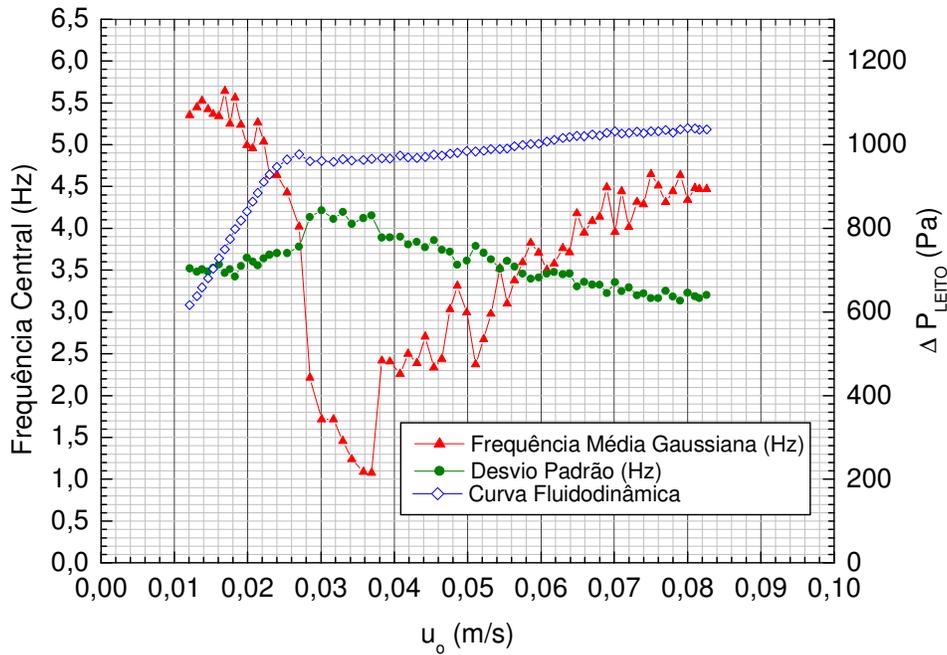


Figura 4. 6- Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana -
CMC, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$ – Reduzindo a velocidade do ar–

$$u_{mf} \text{ (curva fluidodinâmica)} \cong 0,026 \text{ m/s.}$$

Nas Figuras 4.5 e 4.6 observa-se que a região da defluidização foi claramente definida com a queda acentuada da frequência média Gaussiana. Verifica-se também que o aumento da altura de leito não afeta significativamente os perfis da frequência média Gaussiana e do desvio padrão da distribuição.

Nas Figuras referentes à CMC (4.5 a 4.11), durante o regime de leito fixo, o valor da frequência média Gaussiana é elevado, situando-se em torno de 5Hz. Nesse regime, como mostrado na Figura 4.3 (b), tem-se sinal em baixas frequências, e esperava-se que o ajuste da curva exponencial Gaussiana no espectro de pressão resultasse em valores com baixa frequência média Gaussiana. Porém, em todos os ensaios realizados com CMC, no regime de leito fixo os valores da frequência média Gaussiana não foram baixos. Isso deve-se ao fato da existência de alguns componentes de mais alta frequência, mesmo no regime de leito fixo. A diferença entre tal comportamento e aquele do leito fluidizado reside nas amplitudes dos componentes espectrais. No leito fixo, os componentes de frequência mais alta, responsáveis pelo deslocamento do valor médio da curva exponencial Gaussiana, possuem intensidade em torno de 0,3 Pa, conforme se observa na Figura 4.3(b).

Já no leito fluidizado (Figura 4.3 (d)), as amplitudes das linhas espectrais responsáveis pela elevação do valor médio da curva Gaussiana possuem amplitudes que são 10 ou 18 vezes maiores do que as amplitudes dos componentes de mais alta frequência do leito fixo. Esta informação é relevante para a interpretação dos gráficos de variação da frequência média da função de ajuste Gaussiana.

Utilizou-se a técnica de filmagem durante alguns ensaios experimentais [CMC (180 μ m e 15cm, 460 μ m e 25cm); areia (325 μ m e 15 e 25 cm, 460 μ m e 25cm)], a fim de poder contar com mais uma ferramenta para uma posterior análise dos resultados. Não foi possível fazer para todos os 14 experimentos, pois quando tais filmagens foram iniciadas, alguns ensaios já haviam sido realizados.

Uma dessas filmagens foi feita para o ensaio referente à Figura 4.5, sendo observada a presença de bolhas de ar de tamanho reduzido. Na maior velocidade utilizada, o regime fluidodinâmico ainda se enquadrava em borbulhante convencional.

O perfil da frequência média Gaussiana da Figura 4.6 semelhante ao da Figura 4.5, sugere que mesmo para a maior velocidade de gás utilizada ($\sim 0,083$ m/s), provavelmente o regime fluidodinâmico também era do tipo borbulhante convencional. Como mencionado anteriormente, a velocidade máxima alcançada em cada ensaio experimental refere-se àquela na qual se iniciava o arraste das partículas para fora da coluna de fluidização.

b)Tipo de partícula: CMC, diâmetro de partículas: 325 μ m, alturas de leito fixo: 15, 20 e 25 cm.

Nas Figuras 4.7 a 4.9 são apresentadas as curvas para partículas CMC com diâmetro de 325 μ m e alturas de leito de 15, 20 e 25 cm.

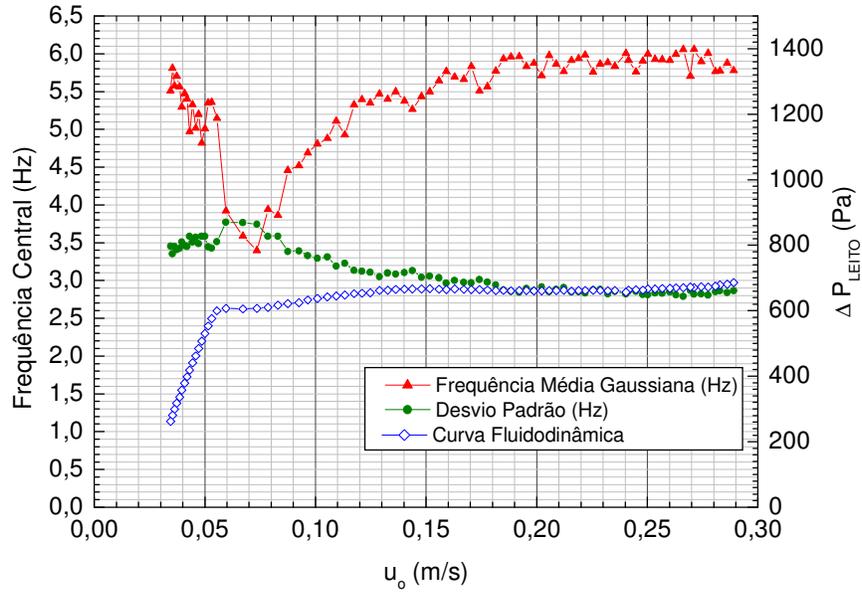


Figura 4. 7- Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana -
CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar-

$$u_{mf} \text{ (curva fluidodinâmica)} \cong 0,058 \text{ m/s.}$$

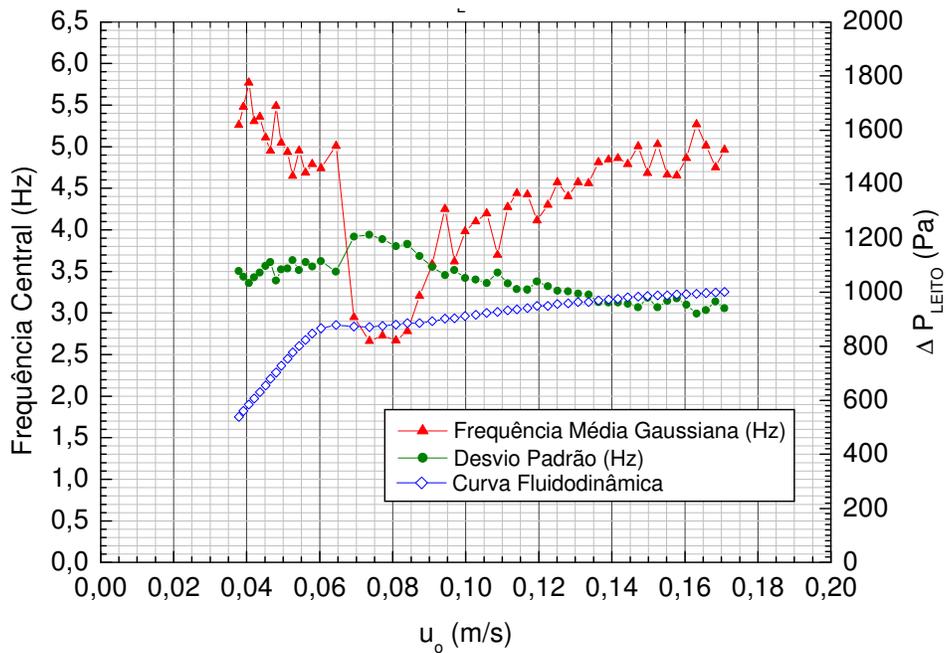


Figura 4.8 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana -
CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 20 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar-

$$u_{mf} \text{ (curva fluidodinâmica)} \cong 0,060 \text{ m/s.}$$

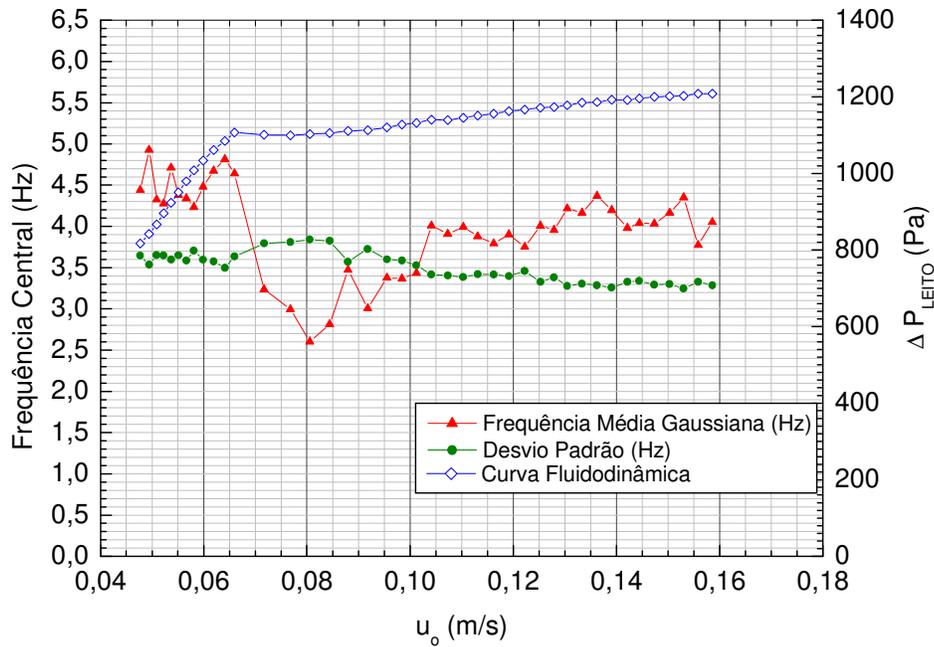


Figura 4.9 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar –

$$u_{mf} \text{ (curva fluidodinâmica)} \cong 0,065 \text{ m/s.}$$

Nas Figuras 4.7 a 4.9 também foi obtida uma boa concordância entre a queda no valor da frequência média Gaussiana e a região de defluidização. Observa-se que, após atingir a região onde o leito está tendendo à defluidização, o valor da frequência média Gaussiana aumenta com a velocidade superficial do gás, mas esse incremento é mais pronunciado para a altura de leito de 15 cm. Porém, ainda assim a região onde o leito está tendendo à defluidização pode ser detectada para a altura de leito de 25 cm ($H/D = 1,75$). No caso da Figura 4.9, após a frequência média Gaussiana atingir valor mínimo, mesmo com o aumento da velocidade do gás não se observa um incremento tão acentuado quanto no caso das Figuras 4.7 e 4.8. Esse comportamento provavelmente deve-se à mudança de regime fluidodinâmico, que começa a se distanciar da fluidização borbulhante convencional. No entanto, tal situação não pôde ser comprovada, pois não foram realizadas as filmagens para os ensaios referentes a essas figuras.

c) Tipo de partícula: CMC, diâmetro de partículas: 460 μm , alturas de leito fixo: 15 e 25 cm.

O comportamento destas condições experimentais apresenta-se nas Figuras 4.10 e 4.11.

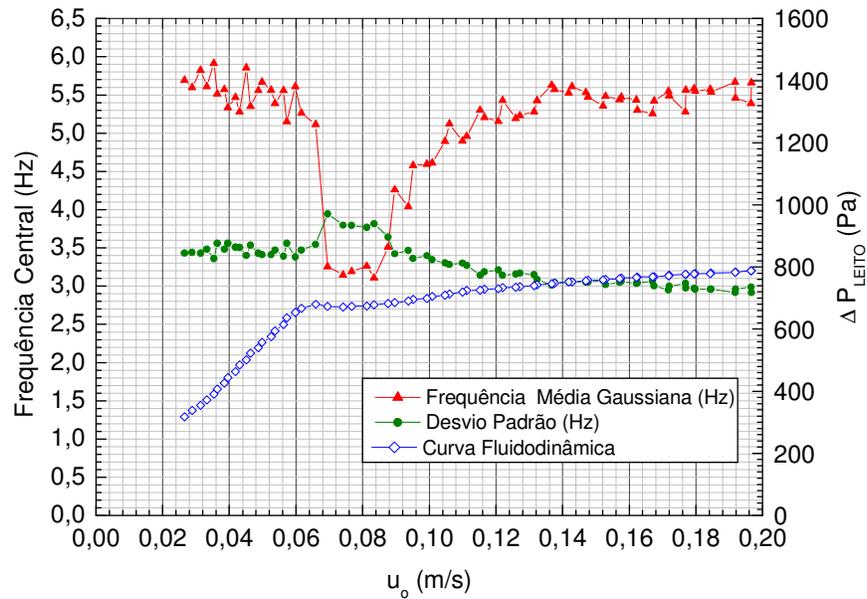


Figura 4.10 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana
- CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar -

$$u_{mf} (\text{curva fluidodinâmica}) \cong 0,063 \text{ m/s.}$$

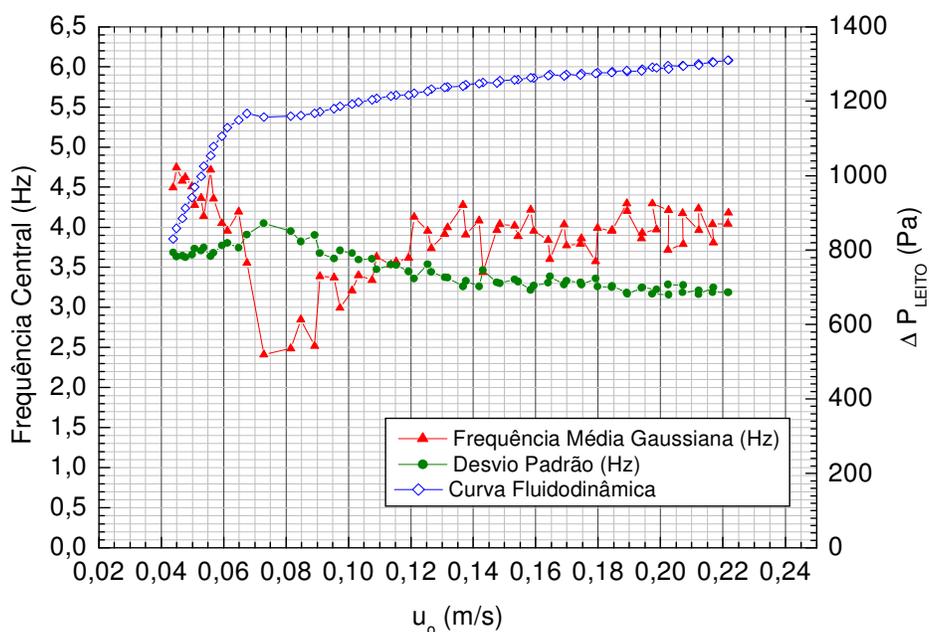


Figura 4.11 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$. - Reduzindo a velocidade do ar –

$$u_{mf} (\text{curva fluidodinâmica}) \cong 0,066 \text{ m/s.}$$

Embora na Figura 4.11 valor da frequência média Gaussiana apresente uma queda significativa na velocidade superficial do gás perto de $0,075 \text{ m/s}$, para velocidades superficiais superiores a esta última, os valores de tal frequência não aumentaram tanto quanto os observados na Figura 4.10 e atingiram valores médios de aproximadamente 4 Hz . Acredita-se esse comportamento possa representar mudança de regime fluidodinâmico, pois durante a realização do teste experimental referente à Figura 4.11, quando se utilizaram velocidades superficiais de gás superiores a $0,12 \text{ m/s}$, foi observada a presença de bolhas de ar com uma diversidade de tamanhos, provavelmente com o regime fluidodinâmico situando-se na transição entre borbulhante e *slugging*.

Observa-se que de maneira geral, para altura de leito de 15 cm , os três diâmetros de partículas de CMC utilizados (Figuras 4.5, 4.7 e 4.10) resultaram em perfis de frequência média Gaussiana similares. Para partículas de $180 \mu\text{m}$ com altura de leito de 25 cm , o perfil também foi similar ao resultado obtido com altura de 15 cm . Além disso, verifica-se que o perfil da frequência para partículas de $325 \mu\text{m}$ e altura de leito de 20 cm é também similar àquele com altura de leito de 15 cm . Isto ocorreu provavelmente porque para esse diâmetro de partículas, o regime borbulhante convencional manteve-se para as duas alturas estudadas. Quando foram utilizadas partículas de 325 e $460 \mu\text{m}$ com alturas de

leito de 25 cm, o perfil da frequência média Gaussiana não resultou ser tão pronunciado como nos demais casos apresentados para CMC, o que pode indicar uma possível mudança de regime fluidodinâmico.

d)Tipo de partícula: areia, diâmetro de partículas: 180 μm , alturas de leito fixo: 15 e 25 cm.

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentadas as curvas para partículas de areia com diâmetro de 180 μm e alturas de leito de 15 e 25 cm.

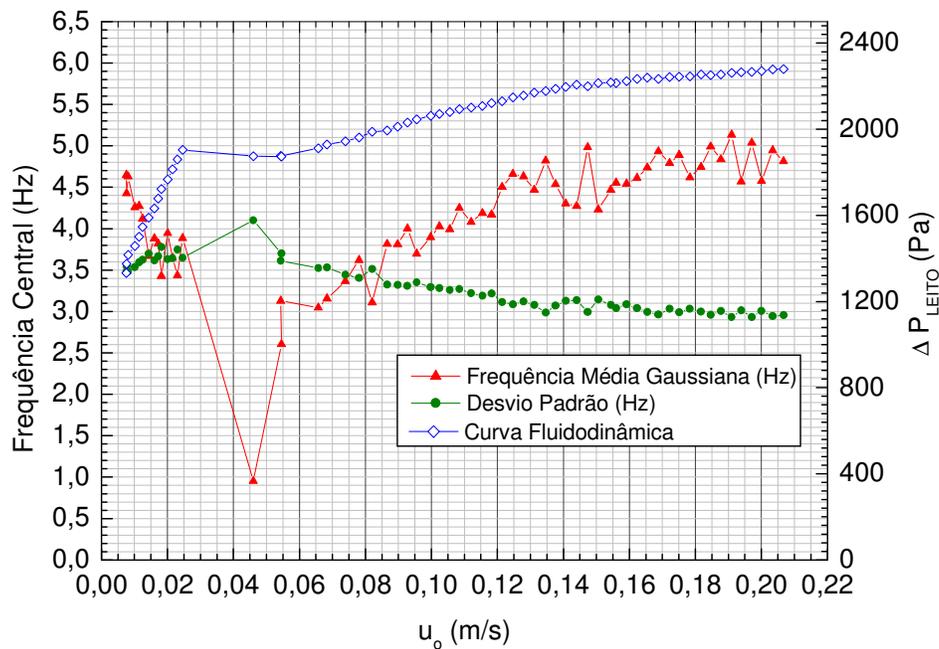


Figura 4.12 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana

Areia, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar -

$$u_{mf} (\text{curva fluidodinâmica}) \cong 0,030 \text{ m/s.}$$

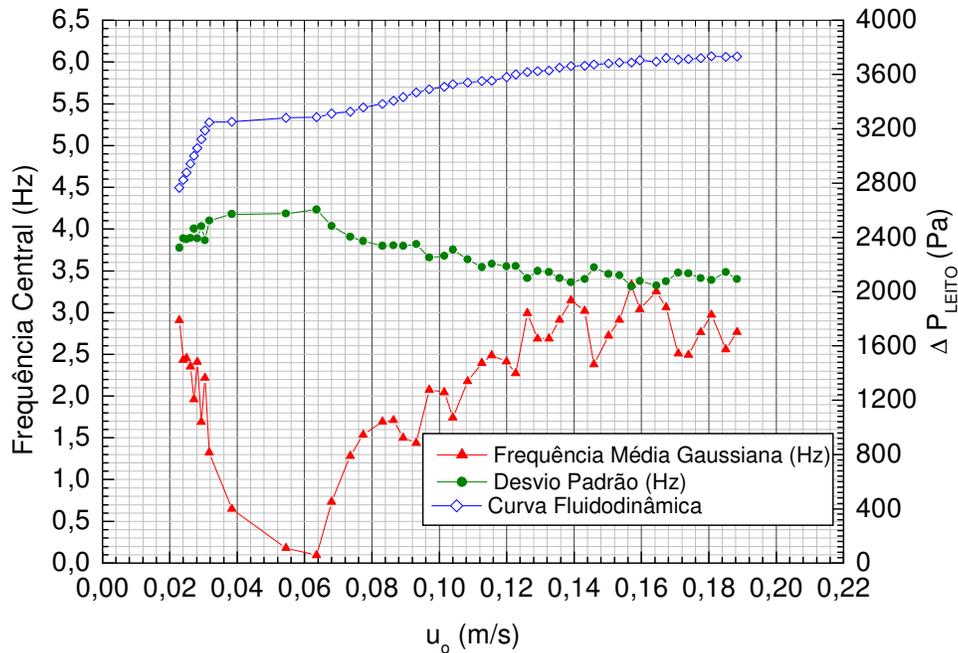


Figura 4.13 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana
Areia, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar –

$$u_{mf} \text{ (curva fluidodinâmica)} \cong 0,032 \text{ m/s.}$$

Na Figura 4.12, apesar da frequência média Gaussiana aumentar após a região onde o leito está tendendo à defluidização ($u_0 \approx 0,045 \text{ m/s}$), o perfil dessa frequência não apresenta acréscimo tão acentuado como no perfil obtido na Figura 4.5 ($u_0 \geq 0,035 \text{ m/s}$), referente à CMC com o mesmo diâmetro de partículas e altura de leito. Esse comportamento provavelmente ocorreu devido às características físicas das partículas.

Nas Figuras 4.12 e 4.13, durante o regime de fluidização, nota-se que o aumento da altura do leito ocasiona uma redução do valor da frequência média Gaussiana, que pode ser indício de mudança de regime fluidodinâmico.

e) Tipo de partícula: areia, diâmetro de partículas: $325 \mu\text{m}$, alturas de leito fixo: 15, 20 e 25 cm.

O comportamento destas condições experimentais é apresentado nas Figuras 4.14 a 4.16.

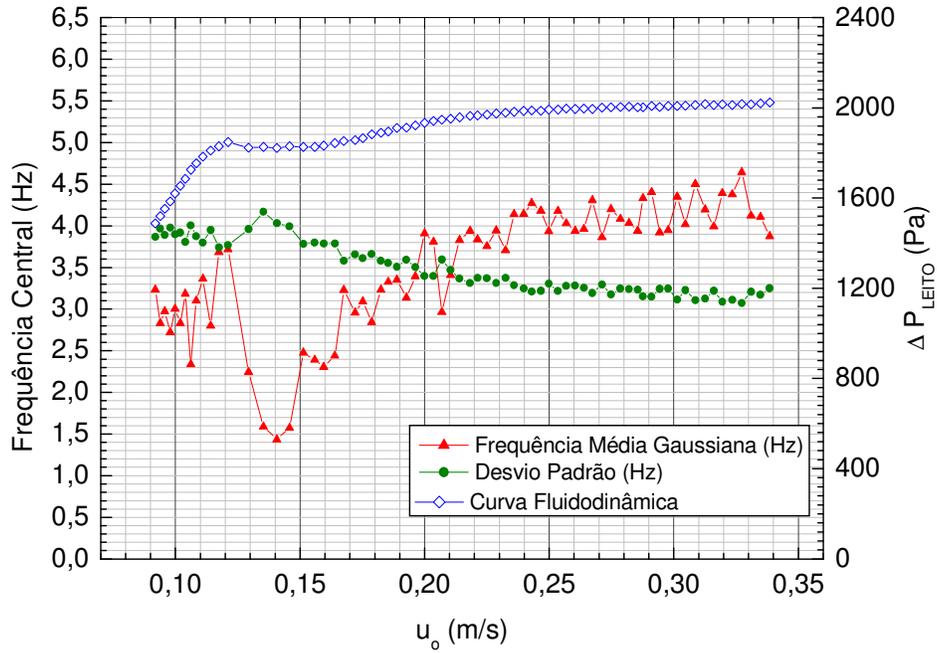


Figura 4.14 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana

Areia, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar-

$$u_{mf} \text{ (curva fluidodinâmica)} \cong 0,115 \text{ m/s.}$$

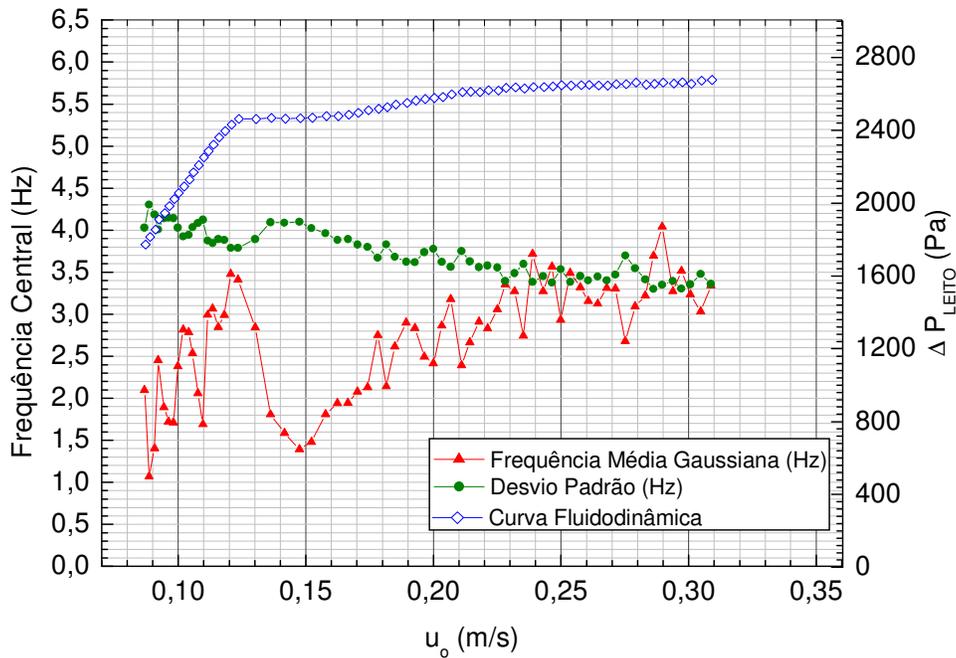


Figura 4.15- Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana -

Areia, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 20 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar-

$$u_{mf} \text{ (curva fluidodinâmica)} \cong 0,120 \text{ m/s.}$$

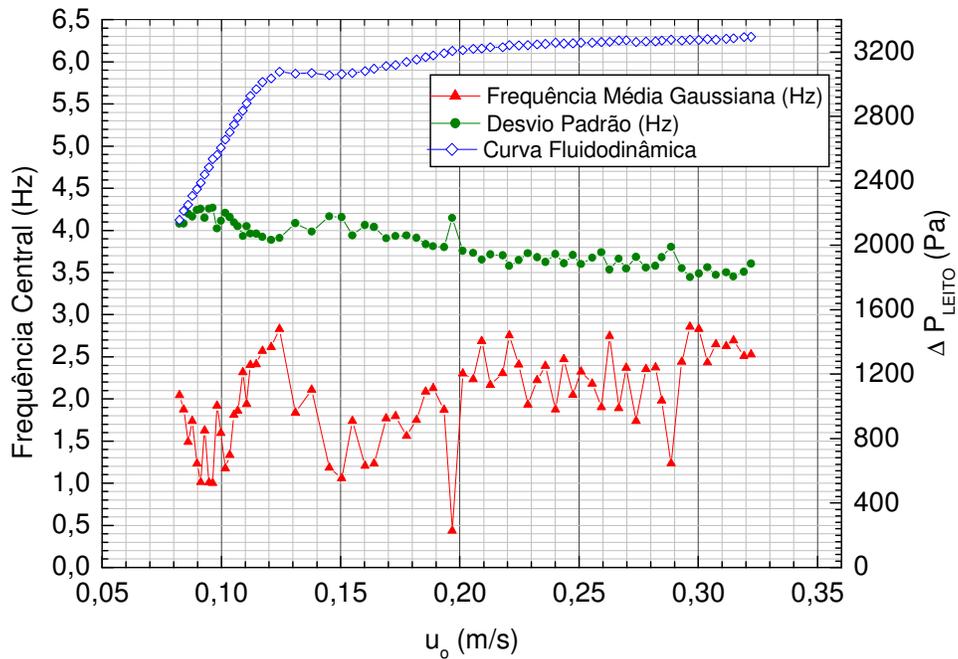


Figura 4.16 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana

Areia, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar –

$$u_{mf} (\text{curva fluidodinâmica}) \cong 0,123 \text{ m/s.}$$

O perfil da frequência média Gaussiana, que era similar nas Figuras 4.5 a 4.14, começa a mostrar uma diferença na Figura 4.15, onde se tem uma altura de leito de 20 cm. Quando se utiliza altura de leito de 25 cm (Figura 4.16), não se pode mais observar nitidamente a região onde o leito está tendendo à defluidização. Acredita-se que esse comportamento deva-se ao fato de que o leito não se enquadre no regime borbulhante convencional, pois através de vídeo referente à velocidade superficial do gás de 0,197 m/s (Figura 4.16) observou-se a presença de pequenas bolhas de gás na base do leito que cresciam ao longo do comprimento da coluna de fluidização, e que nas proximidades da superfície do leito atingiam aproximadamente metade do diâmetro da coluna.

Isso demonstra que o método proposto também pode ser utilizado como uma importante ferramenta para identificar mudança de regime fluidodinâmico.

f) Tipo de partícula: areia, diâmetro de partículas: 460 μm , alturas de leito fixo: 15 e 25 cm.

Nas Figuras 4.17 e 4.18 são apresentadas as curvas para partículas de areia com diâmetro de 460 μm e alturas de leito de 15 e 25 cm.

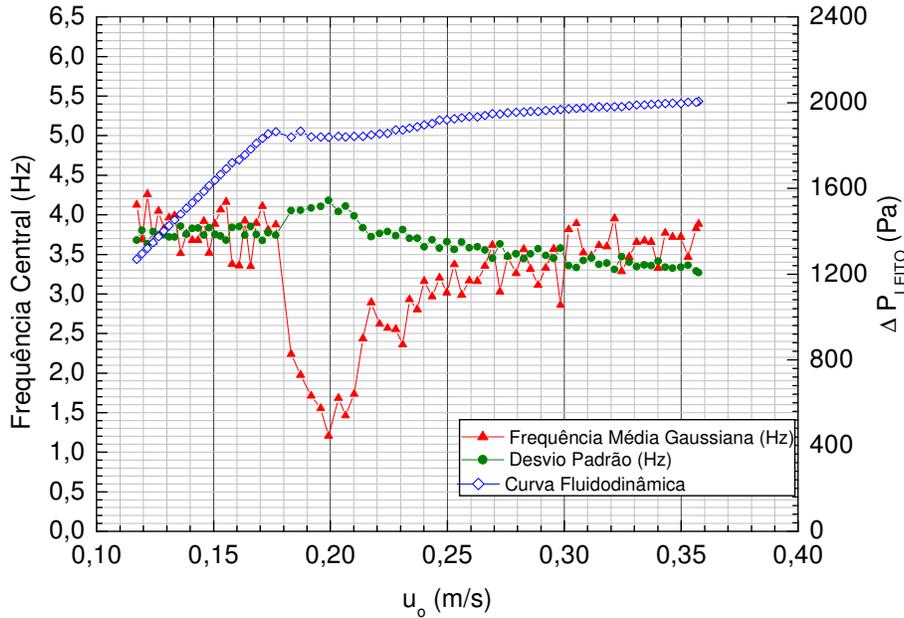


Figura 4.17 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana

Areia, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar -

$$u_{mf} \text{ (curva fluidodinâmica)} \cong 0,178 \text{ m/s.}$$

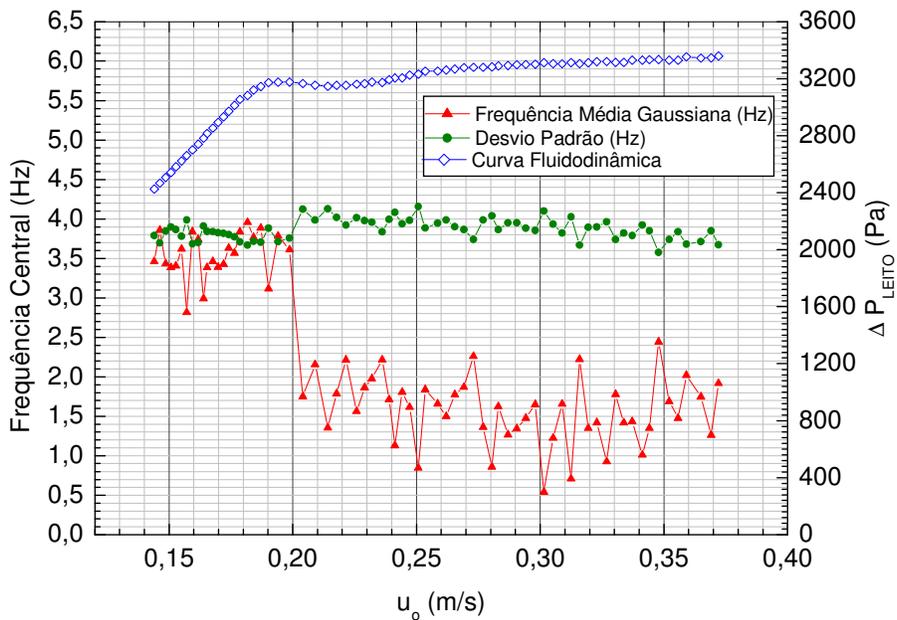


Figura 4.18 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana

- Areia, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$ - Reduzindo a velocidade do ar -

$$u_{mf} \text{ (curva fluidodinâmica)} \cong 0,190 \text{ m/s.}$$

Na Figura 4.17 novamente verifica-se que, para a configuração leito-partícula utilizada, é possível identificar a região onde o leito está tendendo à defluidização, mesmo utilizando partículas com diâmetro e densidade elevados, mas somente para altura de leito menor ($H/D = 1,05$). Por outro lado, o mesmo comportamento observado na Figura 4.17 não acontece na Figura 4.18, onde se utiliza altura de leito de 25 cm ($H/D = 1,75$).

O perfil da frequência média Gaussiana da Figura 4.18 indica uma mudança de regime fluidodinâmico, que foi comprovado através de análise das filmagens realizadas durante a realização desse experimento. Analisando o último vídeo realizado antes de atingir as proximidades da defluidização ($u_o \cong 0,239$ m/s), verifica-se comportamento similar ao observado para a velocidade superficial do gás de 0,173 m/s da Figura 4.16. Porém, o aumento da velocidade do gás na Figura 4.18 faz com que o tamanho das bolhas de ar seja superior ao observado na Figura 4.16 para uma velocidade próxima.

Durante o ensaio experimental referente à Figura 4.16, observou-se visualmente que, após atingir a região da defluidização e com o aumento da velocidade superficial do gás, o leito praticamente não apresentou um regime fluidodinâmico do tipo borbulhante convencional. Isto indica mais uma vez que o método proposto tem um grande potencial de aplicabilidade, não somente para detectar a região de defluidização, mas também para identificar mudança de regime fluidodinâmico.

Em regime de fluidização *slugging*, alguns estudos têm mostrado que o espectro apresenta banda de frequência estreita, com a presença de praticamente um pico dominante situado em torno de 2 Hz (TARANTO, 1996; SILVA, 1998; JOHNSON et. al., 2000; FELIPE, 2004). No caso do presente trabalho, por se tratar da aplicação de uma distribuição espectral, não é procedente fazer a comparação dos resultados obtidos com o valor da frequência dominante sugerido por outros pesquisadores da literatura. Contudo, a proximidade dos valores obtidos pelos dois métodos parece evidente, como demonstrado no caso da Figura 4.18 para a condição de fluidização (perfil da frequência média Gaussiana mantido em aproximadamente 1,5 Hz). Embora não se tenha identificado com clareza o regime *slugging* no ensaio correspondente, as observações realizadas durante o experimento indicaram que essa condição operacional foi a que mais se aproximou de tal estado fluidodinâmico.

De maneira geral, nota-se que a relação altura do leito fixo - diâmetro interno da coluna (H/D), o diâmetro das partículas e a densidade das mesmas são fatores que alteram significativamente o perfil da frequência média Gaussiana e, conseqüentemente, a aplicabilidade do método proposto no presente trabalho para a identificação da região onde o leito está tendendo à defluidização. Por outro lado, esses fatores também podem favorecer a utilização do método na identificação de mudança de regime fluidodinâmico.

Os perfis da frequência média Gaussiana que melhor identificam a região onde o leito está tendendo à defluidização foram obtidos com relação altura do leito fixo- diâmetro interno da coluna (H/D) próxima à unidade, isto é, operando em leito mais raso. Já para identificar mudança de regime fluidodinâmico, os melhores perfis da frequência média Gaussiana foram alcançados com partículas de densidade maior e com $H/D > 1$.

Na prática, a técnica apresentada neste trabalho possibilita evitar o fenômeno de defluidização com auxílio de um controlador que garanta que o valor da frequência média Gaussiana fique dentro de uma faixa estabelecida, definida através de um ensaio preliminar. Por exemplo, na Figura 4.10, supondo-se que o processo necessite operar a uma velocidade superficial do gás em torno de duas vezes a velocidade de mínima fluidização ($u_0 \cong 0,12$ m/s e frequência média Gaussiana de aproximadamente 5,5 Hz). Observa-se nessa figura que quando a operação está se dirigindo à defluidização do leito, a frequência média Gaussiana sofre uma redução, atingindo um valor mínimo em torno de 3,5 Hz ($u_0 \cong 0,07$ m/s). Isto indica que na faixa de 3,5 a 5,5 Hz o controlador deverá atuar no processo aumentando a vazão de ar, assegurando dessa maneira que a fluidização volte à condição requerida. Entretanto, a frequência média Gaussiana não é exatamente função da velocidade superficial do gás, mas ela varia com o regime de fluidização. Isso é importante em operações de fluidização que podem estar em risco de sofrer defluidização, como é o caso de recobrimento de partículas e granulação.

Observou-se também que, de maneira geral, o desvio padrão da distribuição aumenta na região onde o leito está tendendo à defluidização, porém, esse parâmetro não é tão sensível quanto a frequência média Gaussiana.

4.4 Ensaios de Secagem de Sólidos

Geralmente, quando se realiza secagem de sólidos em leito fluidizado, a operação é iniciada a partir de uma velocidade do gás acima da mínima fluidização, ou seja, para a qual o leito se encontra fluidizado. Neste trabalho, porém, no início de cada ensaio de secagem garantia-se que o leito estivesse quase fluidizado, isto é, com a presença de uma bolha de ar no centro da coluna e de canais preferenciais. Isso teve como propósito observar o perfil das técnicas estudadas desde um leito quase fluidizado com alto conteúdo de umidade até um leito totalmente fluidizado e com pouca umidade. Cabe ressaltar que, em cada ensaio de secagem, obteve-se a vazão de gás mínima para que o leito apresentasse as características descritas neste parágrafo e então ela foi mantida constante até o final do experimento.

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais de secagem de CMC para os dois diâmetros de partículas utilizados: 275 e 460 μm .

Para uma melhor visualização do ponto crítico da secagem (descrito na Seção 2.3.3), foi obtida a taxa de secagem $\left(-\frac{dx}{dt}\right)$ dos ensaios realizados. Esta pode ser obtida em qualquer ponto através da derivada da curva de secagem $(X'_{BASE\ SECA,i})$ em função do tempo. O período de taxa constante foi determinado pela diferenciação da equação ajustada nesse período $(X = a + b.t)$, com coeficientes de correlação de 0,994 ($d_p = 275\ \mu\text{m}$) e 0,997 ($d_p = 460\ \mu\text{m}$). Para obtenção do período de taxa decrescente, realizou-se diferenciação da equação $X = c + \frac{d}{t^2}$, com coeficientes de correlação de 0,997 ($d_p = 275\ \mu\text{m}$) e 0,998 ($d_p = 460\ \mu\text{m}$).

a) CMC - $d_p = 275\ \mu\text{m}$

As Figuras 4.19 (a) e (b) mostram o perfil da frequência média Gaussiana obtido através do transdutor da marca Cole Parmer e o da marca Endevco, para a curva e a taxa de secagem, respectivamente.

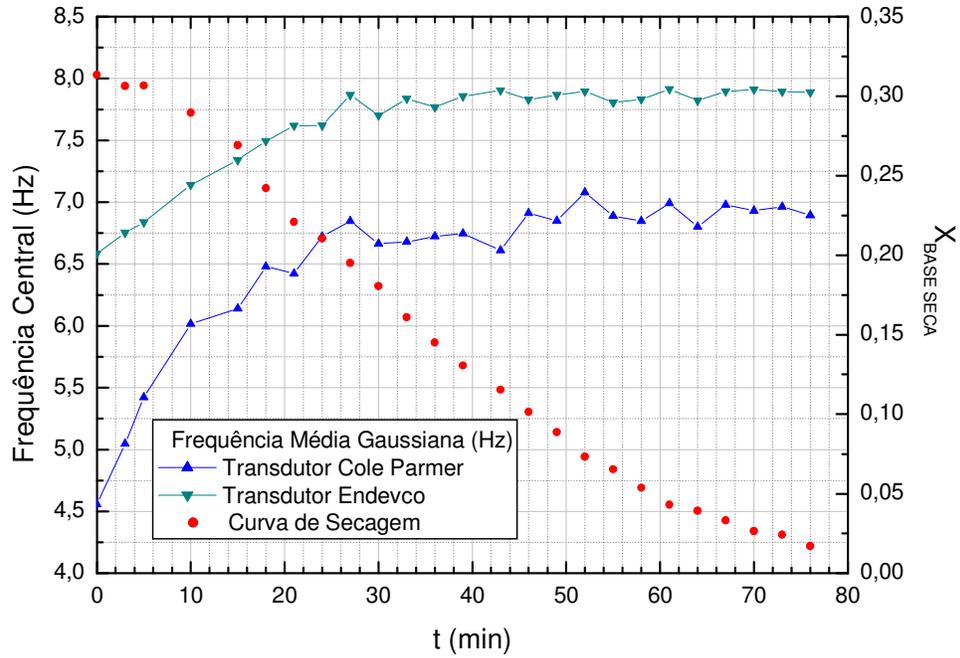


Figura 4.19 (a) - Perfil da frequência média Gaussiana e curva de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$.

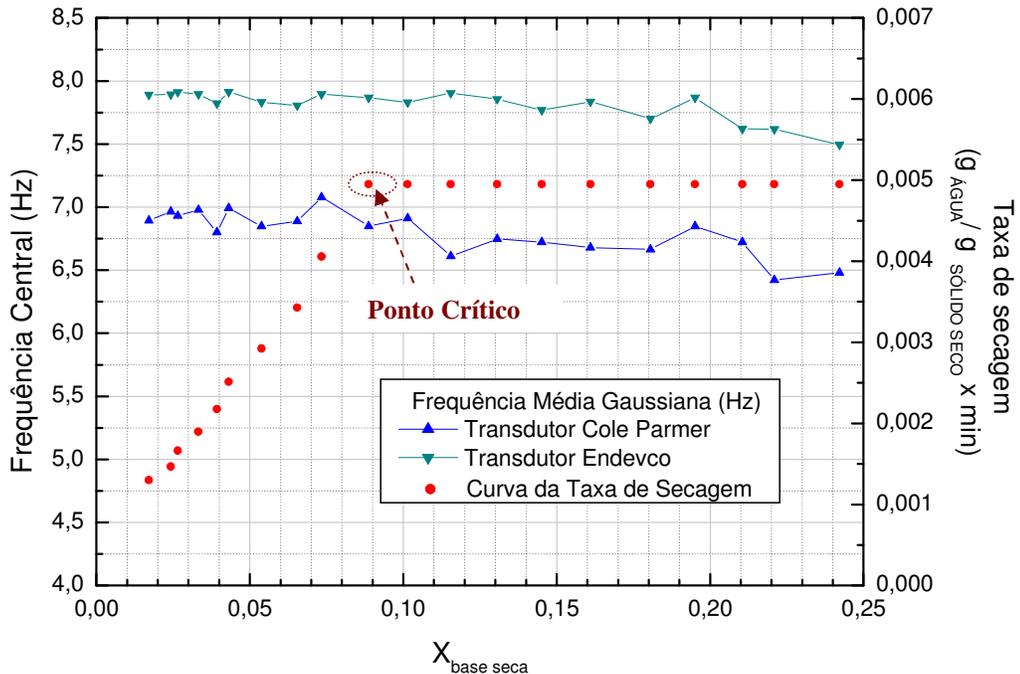


Figura 4.19 (b) - Perfil da frequência média Gaussiana e curva da taxa de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$.

Na Figura 4.19 (a), observa-se um aumento da frequência central nos primeiros 28 minutos de secagem. Isto ocorreu porque o leite encontrava-se ainda em transição entre leite fixo e fluidizado. Verifica-se também que os perfis da frequência média Gaussiana, obtidos pelos dois tipos de transdutores, são similares, embora o valor da frequência central seja sempre maior quando utilizado o transdutor de pressão da marca Endevco (como observado também na Figura 3.11).

Além disso, para a mesma Figura 4.19 (a) verifica-se que quando o leite está fluidizado (a partir de 28 minutos de secagem) os perfis da frequência média Gaussiana mantiveram-se praticamente constantes. Este comportamento pode ser uma ferramenta de grande utilidade em processos de secagem, tanto em laboratório, quanto na indústria. Neste caso, geralmente o leite é continuamente alimentado com sólidos que apresentam alto teor de umidade, e muitas vezes ocorre defluidização do leite. Este problema seria solucionado com a utilização de um controlador que pudesse indicar que o perfil da frequência média Gaussiana está deixando de ser constante, e em seguida aumentasse a vazão de ar de fluidização e/ou reduzisse a alimentação de sólidos.

Como o objetivo da Figura 4.19 (b) é a melhor visualização do ponto crítico da secagem, que é a transição entre o período de taxa crescente e decrescente, desconsideraram-se os primeiros 15 minutos de secagem, pois somente após este intervalo de tempo que iniciava a taxa constante de secagem.

Na Figura 4.19 (b), verifica-se que não ocorreu variação do perfil da frequência média Gaussiana no ponto crítico, o que mostra, neste caso, que o método não é adequado para sua identificação.

As Figuras 4.20 (a) e (b) mostram o perfil do desvio padrão da distribuição, obtido a partir da metodologia proposta no presente trabalho, para a curva e a taxa de secagem, respectivamente.

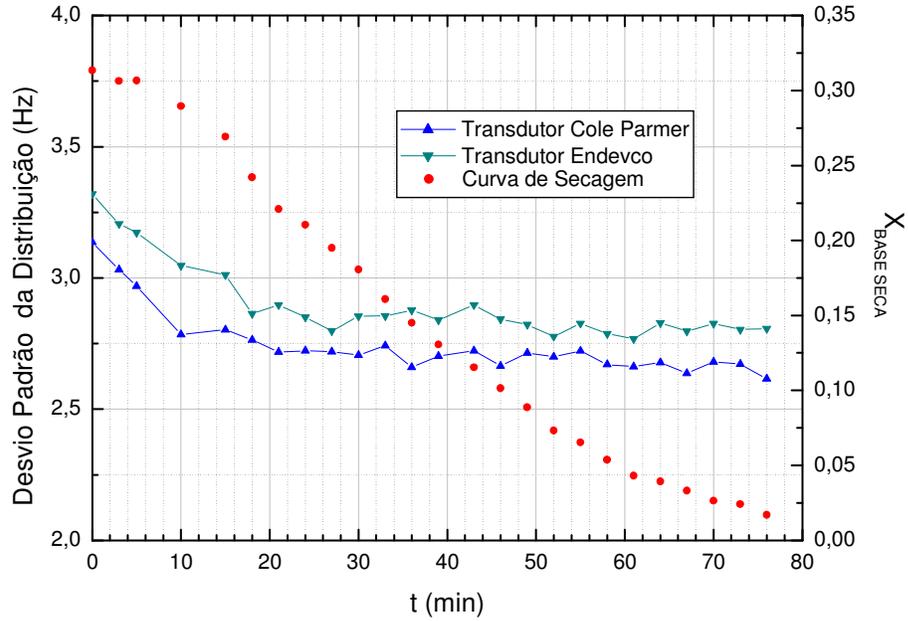


Figura 4.20 (a) - Perfil do desvio padrão da distribuição e curva de secagem.

CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$.

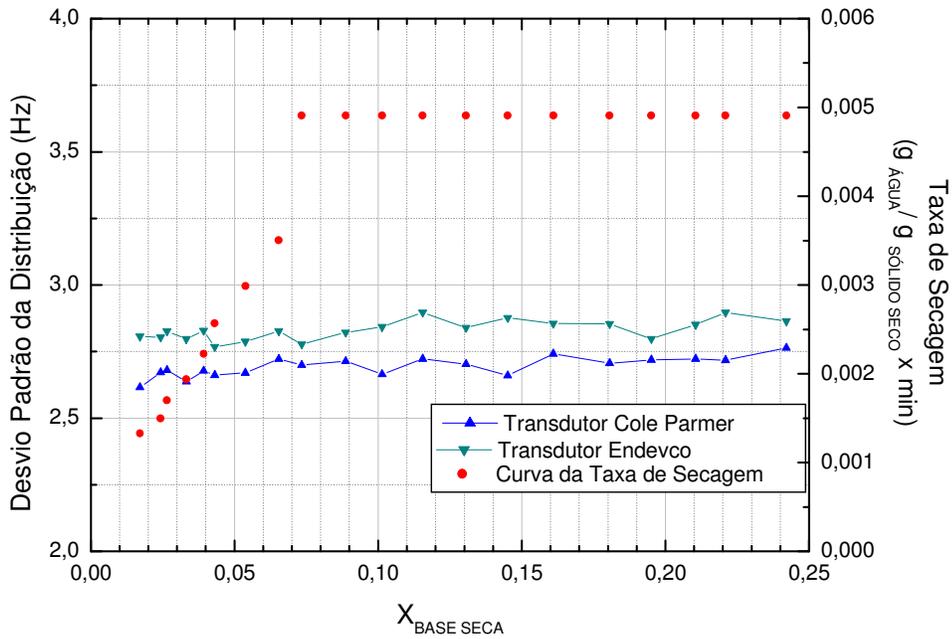


Figura 4.20 (b) – Perfil do desvio padrão da distribuição e curva da taxa de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$.

A Figura 4.20 (a) mostra que o perfil manteve-se constante a partir de 20 minutos de experimento. Embora o perfil do desvio padrão da distribuição apresente uma queda nos primeiros 20 minutos de secagem, a mudança de regime fluidodinâmico nesta figura não se mostra de maneira tão clara como quando se utiliza a frequência média Gaussiana [Figura 4.19 (a)].

Na Figura 4.20 (b) observa-se que não houve variação no perfil do desvio padrão da distribuição nas proximidades do ponto crítico. Um comportamento similar foi verificado na Figura 4.19 (b).

Através das tomadas de pressão no leito, foram obtidos espectros de potência com a finalidade de determinar a sua respectiva frequência dominante, isto é, a frequência na qual a amplitude atinge o valor máximo. A Figura 4.21 mostra o espectro de potência relativo à pressão no leito obtida em 30 minutos de secagem.

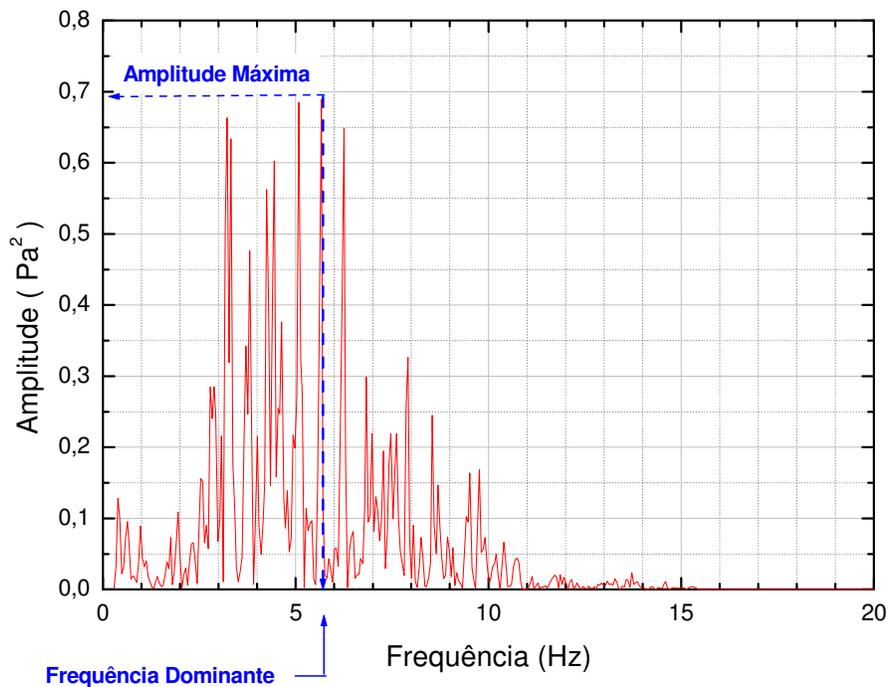


Figura 4.21 - Espectro de potência. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$, tempo de secagem: 30 minutos.

A Figura 4.21 indica que a amplitude máxima do espectro é de $0,69 \text{ Pa}^2/\text{Hz}$, correspondendo ao valor de frequência dominante de $5,7 \text{ Hz}$. Como se pode observar, na frequência de $5,1 \text{ Hz}$, o valor da amplitude é de $0,68 \text{ Pa}^2/\text{Hz}$; e na frequência de $3,2 \text{ Hz}$, o valor de amplitude é de $0,66 \text{ Pa}^2/\text{Hz}$. Isso demonstra que, nesse caso, para amplitudes próximas, a respectiva frequência sofre uma variação significativa, o que torna o método não muito confiável.

Nas Figuras 4.22 (a) e (b) são ilustrados o perfil da frequência dominante do espectro de potência ao longo da secagem utilizando os dois transdutores de pressão, para a curva e a taxa de secagem, respectivamente.

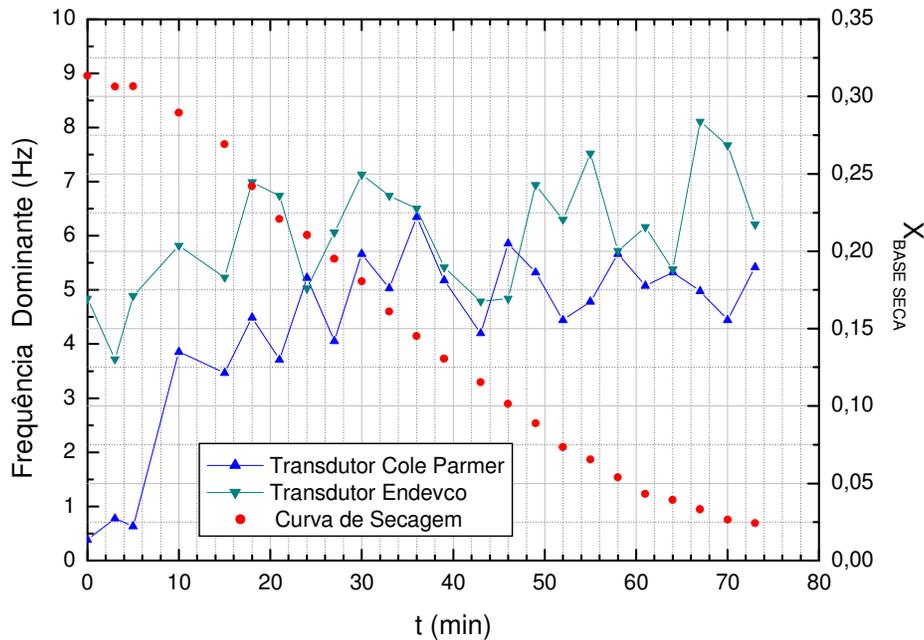


Figura 4. 22 (a) - Frequência dominante e curva de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$,
 $u_0 = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$.

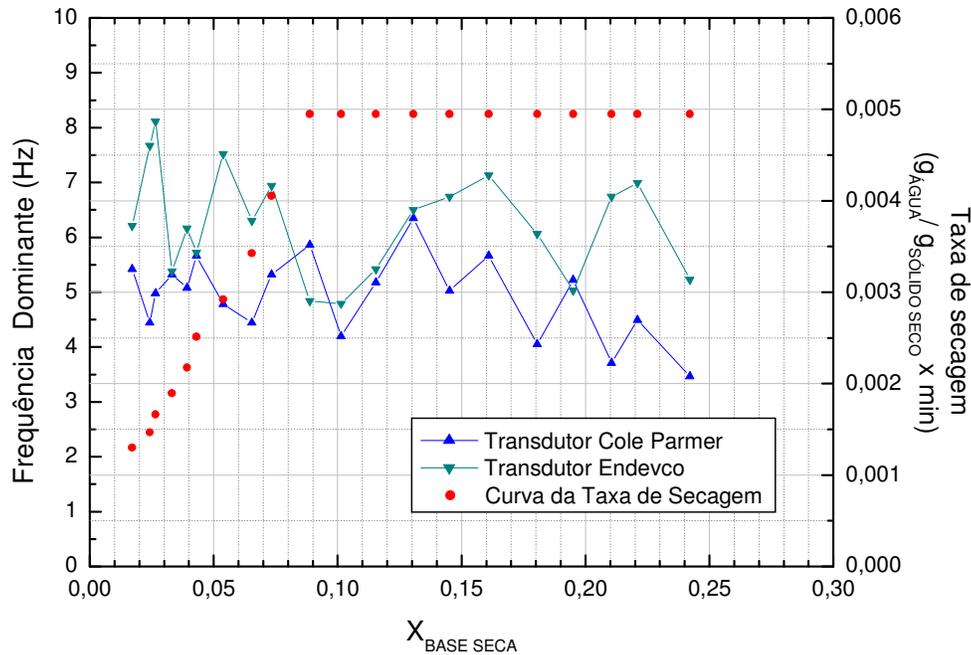


Figura 4.22 (b) - Frequência dominante e curva da taxa de secagem. CMC,

$$d_p = 275 \mu\text{m}, u_o = 0,15 \text{ m/s}, T_g = 70^\circ\text{C}, m_{s,u} = 0,653 \text{ kg.}$$

Na Figura 4.22 (a) observa-se que os primeiros 28 minutos de secagem a frequência dominante apresenta valores mais baixos, isso porque o leito encontra-se ainda na transição entre leito fixo e fluidizado, como observado na Figura 4.19 (a). Após esses primeiros 28 minutos, a frequência dominante atinge valores mais elevados e com média em torno de 5Hz, mas, tais valores variam consideravelmente até o final da secagem. Em geral, esta técnica pode ser aplicada na identificação de mudança de regime fluidodinâmico, pois quando o leito está fluidizado (a partir de 28 minutos de secagem) a frequência dominante varia na faixa de 4 a 6 Hz. Porém, para essa finalidade, a técnica tão evidente como no caso da frequência média Gaussiana [Figura 4.19(a)].

Pelos resultados da Figura 4.22 (b) não é possível verificar a utilização da frequência dominante para identificar o ponto crítico da secagem.

As Figuras 4.23(a) e (b) mostram os perfis do desvio padrão da flutuação pressão utilizando os dois tipos de transdutores, para a curva e taxa de secagem, respectivamente.

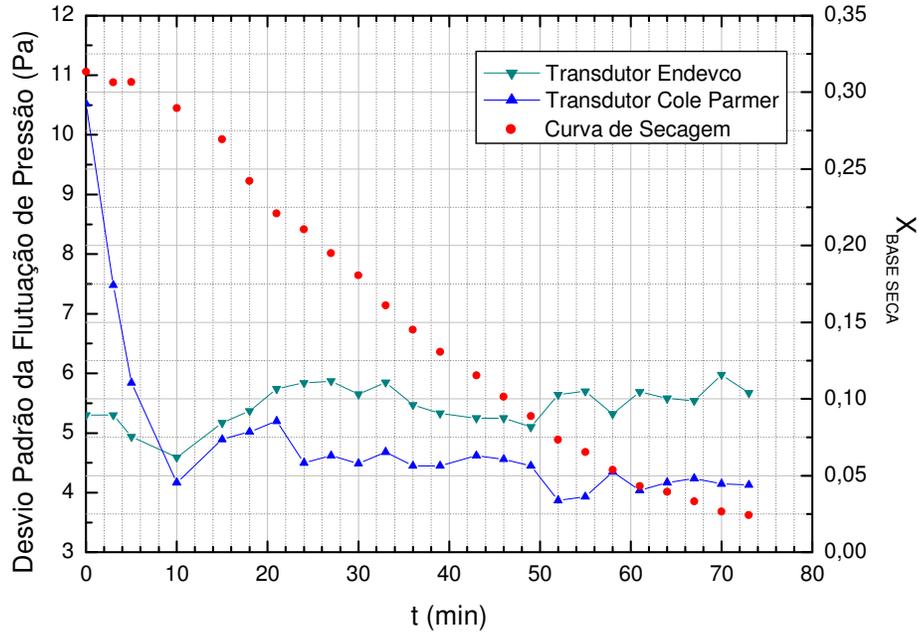


Figura 4.23 (a) - Desvio Padrão da flutuação de pressão e curva de secagem.

CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$.

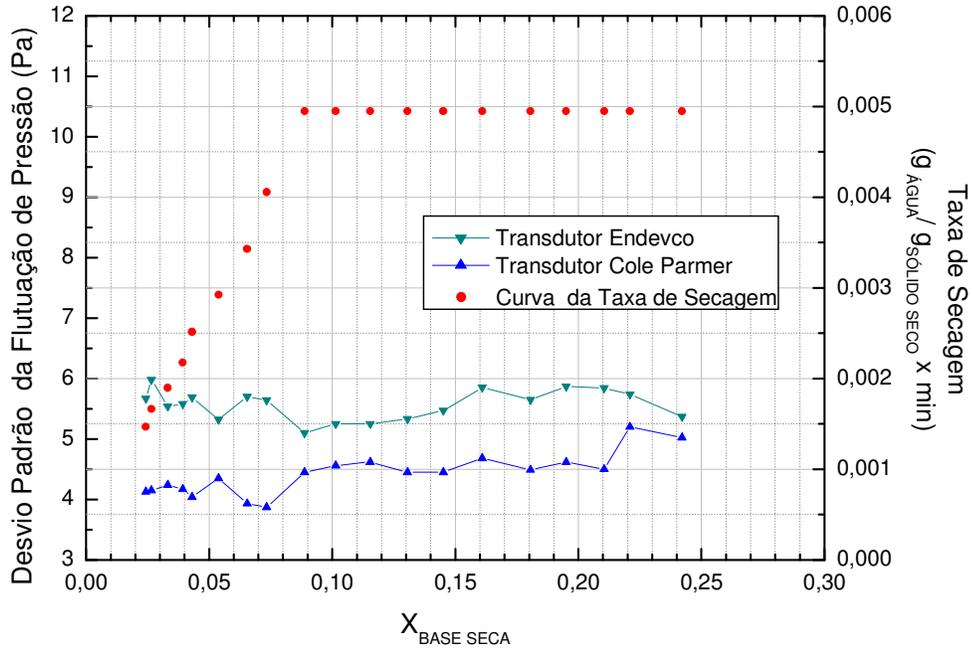


Figura 4.23 (b) - Desvio Padrão da flutuação de pressão e curva da taxa de secagem. CMC, $d_p = 275 \mu\text{m}$, $u_o = 0,15 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,653 \text{ kg}$.

Na Figura 4.23 (a) pode-se observar que a partir de 10 minutos de secagem, os perfis se mantêm praticamente constantes. Neste instante, o material ainda está com alto conteúdo de umidade, isto é, em torno de 28 % de umidade em base seca.

Na Figura 4.23 (b), observa-se que não houve variação na fluidodinâmica das partículas na transição entre taxa constante e decrescente (ponto crítico) que fosse detectada pela técnica do desvio padrão da flutuação de pressão. Um comportamento similar foi observado nas Figuras 4.19 (b), 4.20 (b) e 4.22 (b).

b) CMC - $d_p = 460 \mu\text{m}$

As Figuras 4.24 (a) e (b) mostram o perfil da frequência média Gaussiana utilizando os dois tipos transdutores, para a curva e taxa de secagem, respectivamente

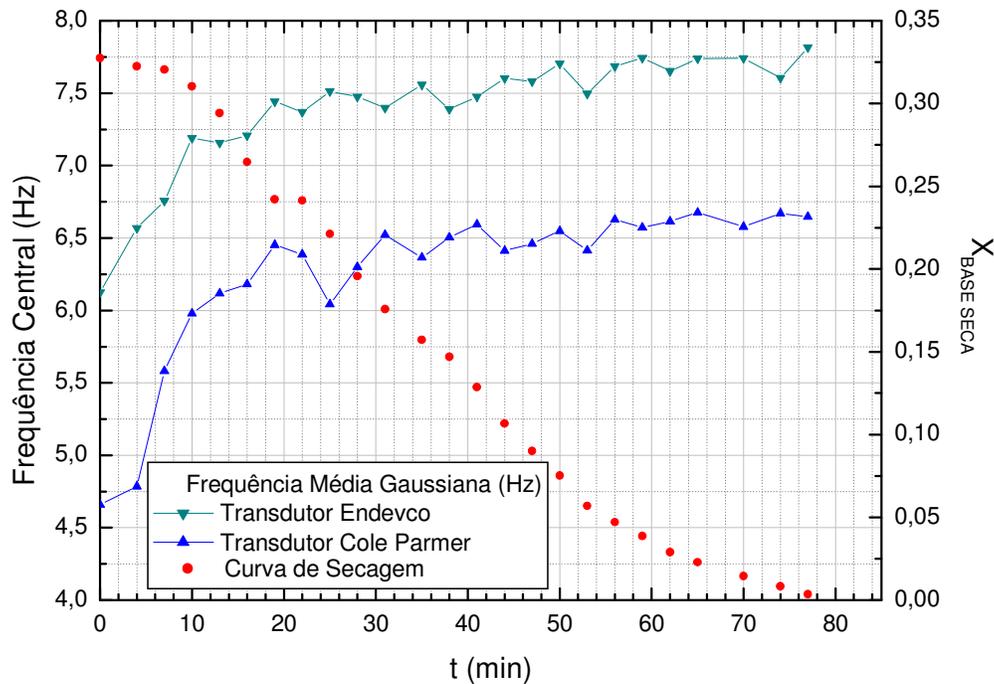


Figura 4.24 (a) - Perfil da frequência média Gaussiana e curva de secagem. CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$.

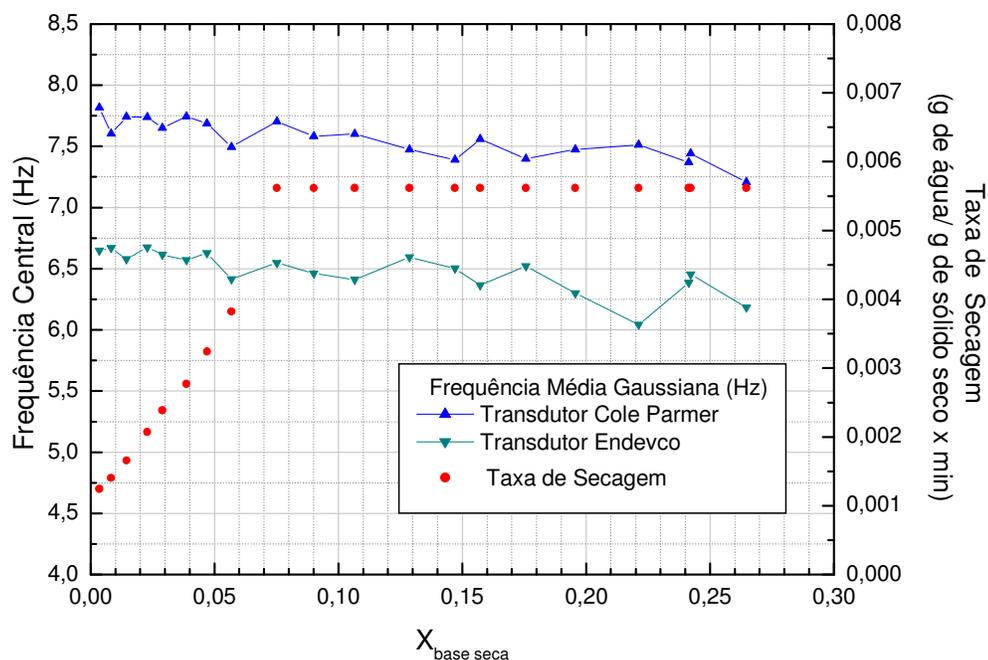


Figura 4.24 (b) - Perfil da frequência média Gaussiana e curva da taxa de secagem.

CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$.

Na Figura 4.24 (a), observa-se que o perfil da frequência média Gaussiana resultou similar com a utilização dos dois instrumentos, embora os valores da frequência central tivessem sido mais elevados para o caso do transdutor Endevco. Em geral, esta figura apresentou um comportamento semelhante ao da Figura 4.19 (a), pois a frequência média Gaussiana também se tornou constante a partir do instante que o leito estava fluidizado, que no caso da Figura 4.24 (a) ocorreu aproximadamente após 30 minutos de secagem. Isso destaca mais uma vez a importância da utilização da frequência média Gaussiana como uma ferramenta capaz de monitorar o regime fluidodinâmico em leito fluidizado gás-sólido de forma fácil, rápida e objetiva.

A Figura 4.24 (b) mostra que não ocorreu variação da frequência média Gaussiana no ponto crítico, como observado também na Figura 4.19 (b).

As Figuras 4.25 (a) e (b) mostram o desvio padrão da distribuição obtido com os dois tipos de transdutores, para a curva e taxa de secagem, respectivamente.

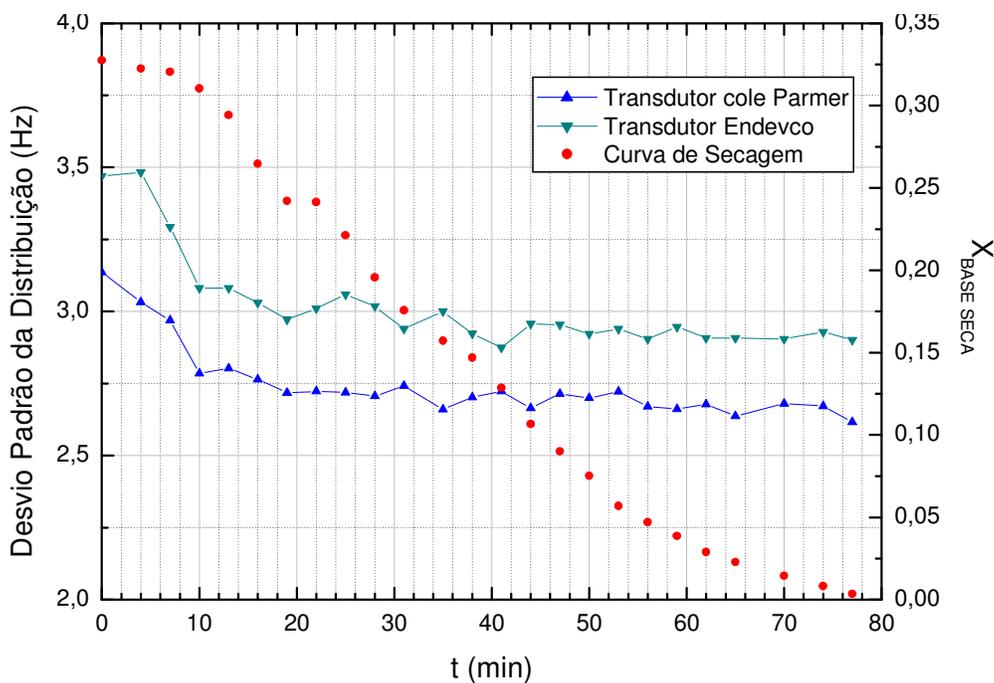


Figura 4.25 (a) - Perfil do desvio padrão da distribuição e curva de secagem.

CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$.

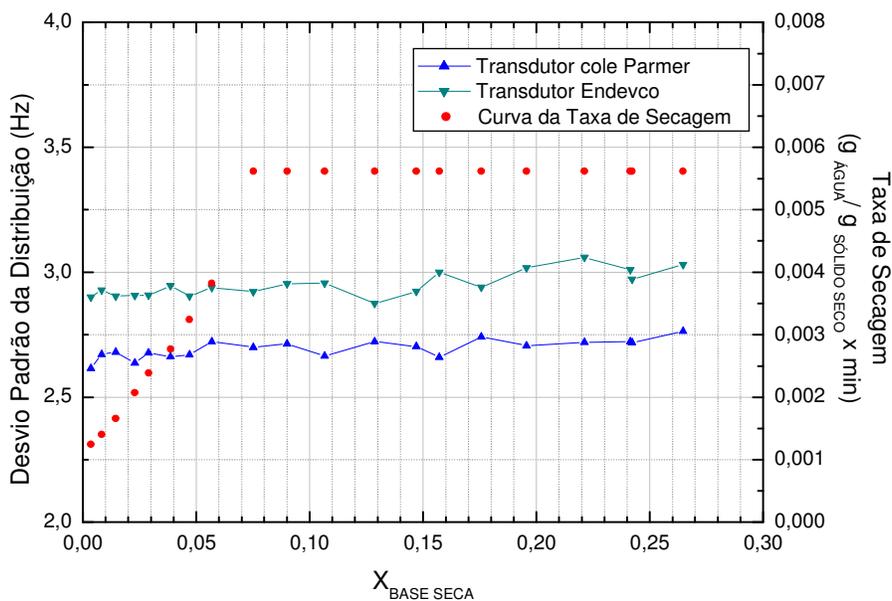


Figura 4.25 (b) - Perfil do desvio padrão da distribuição e curva da taxa de secagem.

CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16 \text{ m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$.

Como se observa, o perfil do desvio padrão da distribuição na Figura 4.25(a) resultou semelhante ao obtido na Figura 4.23(a). Isto confirma que em todos os casos

estudados no presente trabalho, a frequência média Gaussiana resultou um parâmetro mais sensível para detectar a mudança de regime e para identificar a região onde o leito está tendendo à defluidização.

Assim como obtido na Figura 4.20 (b), na Figura 4.25 (b) também não se verificaram alterações do desvio padrão da distribuição no ponto crítico da secagem.

Também foram obtidas as frequências dominantes dos espectros de potência ao longo do tempo de secagem, que são ilustradas nas Figuras 4.26 (a) e (b).

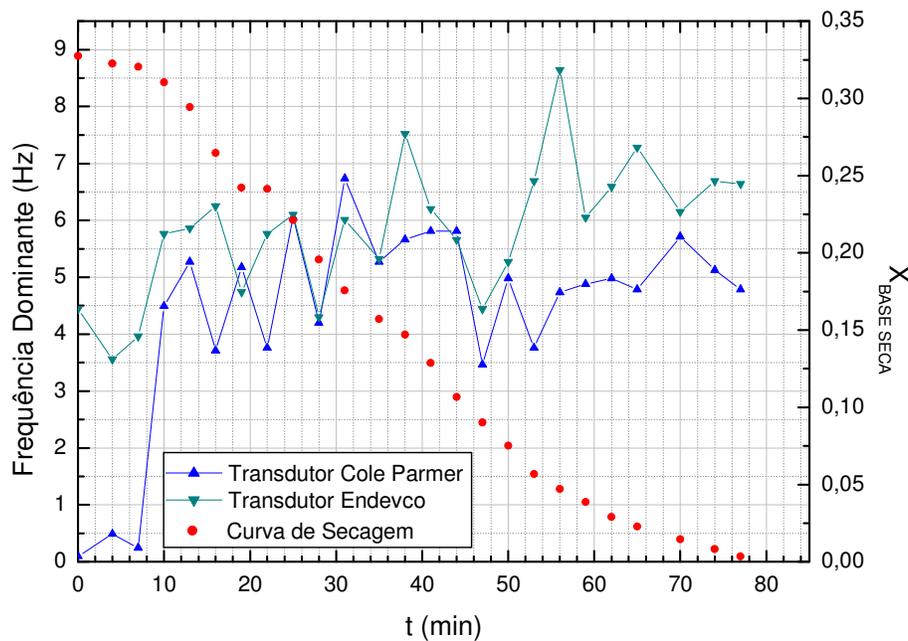


Figura 4.26 (a) - Frequência dominante e curva de secagem.CMC – $d_p = 460 \mu\text{m}$,
 $u_o = 0,16\text{m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$.

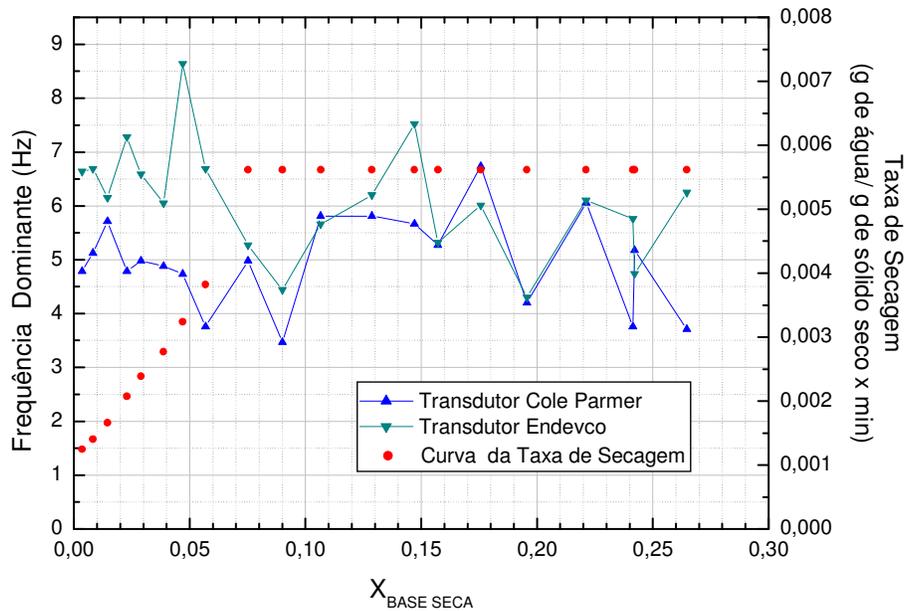


Figura 4.26 (b) - Freqüência dominante e curva da taxa de secagem.CMC –
 $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16\text{m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$.

Na Figura 4.26 (a) verifica-se que, embora a freqüência dominante apresente valor distinto com a utilização de cada transdutor, os perfis dessas freqüências são similares. Os valores da freqüência dominante variaram bastante ao longo da secagem, comportamento parecido foi observado na Figura 4.22 (a). O ajuste dos pontos pela Gaussiana diminui a dispersão dos valores, favorecendo a análise do fenômeno.

Através da Figura 4.26 (b) observa-se que não há indícios de aplicabilidade desse método na identificação do ponto crítico, como também ocorreu na Figura 4.22 (b).

As Figuras 4.27 (a) e (b) mostram os perfis do desvio padrão da flutuação de pressão obtidos pelos dois tipos de transdutores.

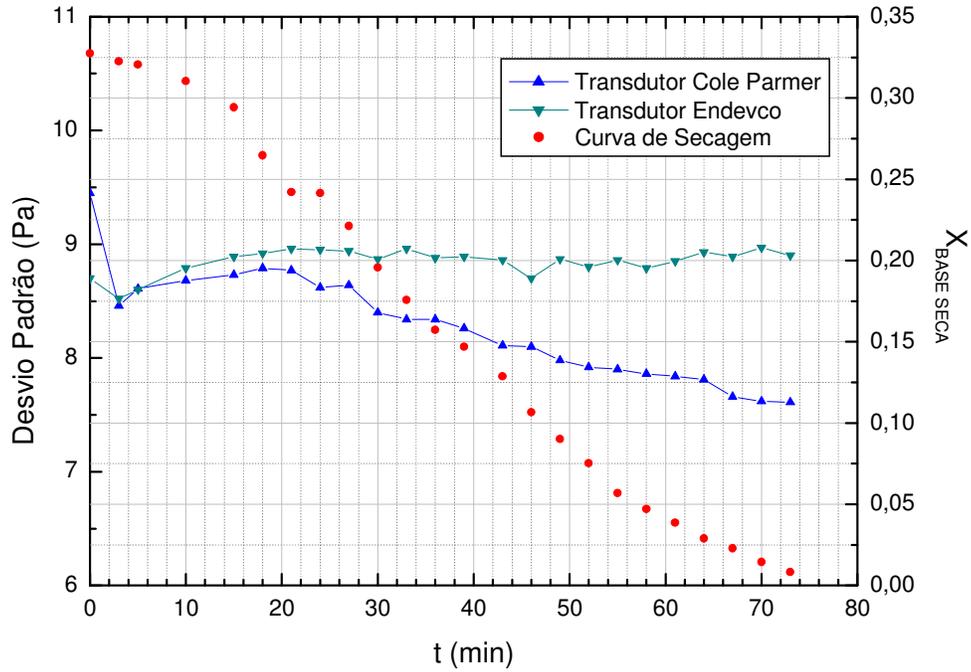


Figura 4.27 (a) - Desvio Padrão da flutuação de pressão e curva de secagem.

CMC – $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16\text{m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$.

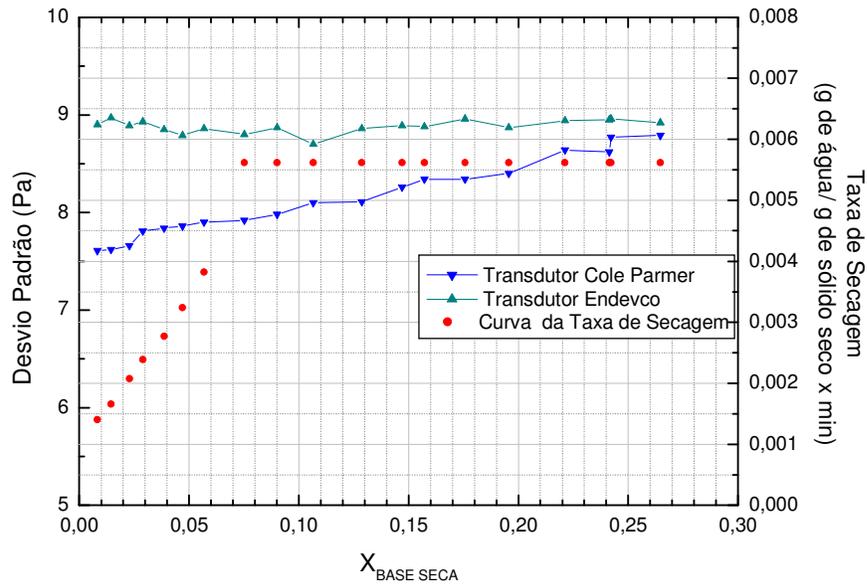


Figura 4.27 (b) - Desvio Padrão da flutuação de pressão e curva da taxa de secagem. CMC – $d_p = 460 \mu\text{m}$, $u_o = 0,16\text{m/s}$, $T_g = 70^\circ\text{C}$, $m_{s,u} = 0,655 \text{ kg}$.

De maneira similar ao observado na Figura 4.25 (a) e (b), verifica-se na Figura 4.27 (a) e (b) que não é possível identificar o ponto crítico através do desvio padrão da flutuação de pressão.

A partir do exposto, observa-se que não ocorreram substanciais alterações fluidodinâmicas durante o processo de secagem para as partículas em estudo que fossem detectadas pela metodologia proposta no presente trabalho, e pelas análises de frequência dominante e de desvio padrão da pressão para a identificação do ponto crítico da secagem, ou seja, o material, mesmo com umidade superficial, apresentou regime de fluidização estável. Para materiais coesivos, cujo regime fluidodinâmico seja alterado a partir do ponto crítico, espera-se que a metodologia permita a identificação desse ponto.

Por outro lado, verificou-se que a metodologia proposta no presente trabalho também apresenta um grande potencial para ser utilizada em monitoramento de regimes fluidodinâmicos, podendo também ser uma importante ferramenta para detectar uma possível defluidização do leito em processo de secagem em leito fluidizado gás-sólido. Além disso, o emprego dessa técnica não requer a utilização de transdutores de pressão de resposta rápida, que é uma grande vantagem para aplicações tanto em laboratório quanto na indústria, pois o valor desse tipo de instrumento é significativamente mais elevado do que aquele utilizado nos ensaios experimentais do presente trabalho.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Neste trabalho foi proposta uma nova metodologia capaz de identificar a região onde o leito está tendendo à defluidização, baseada na transformada de Fourier de sinais de pressão e na Distribuição Exponencial Gaussiana. A análise dos resultados experimentais permitiu obter as seguintes conclusões:

- A técnica é consistente com os resultados obtidos pela curva fluidodinâmica, e identifica a região onde o leito está tendendo à defluidização;
- Observou-se que, para a configuração leito-partícula utilizada, os melhores resultados para detectar essa região foram adquiridos com leito mais raso ($H/D \approx 1$);
- A metodologia tem um alto potencial de aplicabilidade em leito fluidizado gás-sólido, para processos onde a identificação do fenômeno de defluidização é relevante;
- Essa técnica mostrou também ser uma importante ferramenta para identificar mudança de regime fluidodinâmico;
- O procedimento tem a vantagem de não necessitar de transdutor de pressão de resposta rápida;

Com relação aos estudos realizados com secagem, pode-se concluir que:

- Para as partículas utilizadas, não foi possível identificar o ponto crítico de secagem através das três técnicas analisadas;
- A metodologia desenvolvida neste trabalho pode ser aplicada para detectar mudança de regime fluidodinâmico na secagem de sólidos.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Baseado nos resultados obtidos, sugere-se:

- Aplicação da técnica apresentada em recobrimento de partículas em leito fluidizado, e assim desenvolver um sistema de controle que seja utilizado de modo *on line* visando evitar a defluidização do leito;
- Um estudo mais detalhado dessa metodologia utilizando sólidos de densidade baixa e com uma faixa de diâmetro de partículas inferior à utilizada, compreendendo aqueles do tipo A e C de Geldart;
- A aplicação da metodologia desenvolvida nesse trabalho na secagem de sólidos coesivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BAI, B., GHEORGHIU, S., VAN OMMEN, J.R., NIJENHUIS, J., COPPENS, M.-O. Characterization of the void size distribution in fluidized beds using statistics of pressure fluctuations. *Powder Technology*, v.160, p. 81 – 92, 2005.

BAI, D., GRACE, J.R., ZHU, J-X. Characterization of gas fluidized beds of group C, A and B particles based on pressure fluctuations. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.77, p.319-324, 1999.

BENDAT, J.S., PIERSOL, A.G. *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. John Wiley & Sons, 1980, 302 p.

BI, H.T. A critical review of the complex pressure fluctuation phenomenon in gas-solid fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, v. 62, p. 3473-3493, 2007.

BRIENS, C., McDOUGALL, S., CHAN, E. On-line detection of bed fluidity in a fluidized bed coker. *Powder Technology*, v. 138, p. 160-168, 2003.

BRIGHAM, E.O. *The fast Fourier transform and its applications*. Prentice-Hall, Inc., 1988, 448 p.

CHANDRAN, A.N.; SUBBA RAO, S.; VARMA, Y.B.G. Fluidized bed drying of solids, *AIChE Journal*, v. 36, p. 29-38, 1990.

CHAPLIN, G. *Monitoring fluidized bed dryer hydrodynamic using pressure fluctuation and electrical capacitance tomography*. 2005, 226p. PhD Thesis.

CHEN, A. BI, H.T. pressure fluctuations and transition from bubbling to turbulent fluidization. *Powder Technology*, v. 133, p. 237-246, 2003.

DiMATTIA, D.G., AMYOTTE, P.R., HAMDULLAHPUR, F. Fluidized bed drying of large particles, *Transactions of the ASAE*, v. 39, p. 1745-1750, 1996.

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

FAN, L.T., HO, T.C., HIRAOKA, S. Pressure fluctuations in a fluidized bed. *AIChE Journal*, v. 27, p. 388-396, 1981.

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.

FELIPE, C.A.S., ROCHA, S.C.S. Prediction of Minimum Fluidization Velocity of Gas-Solid Fluidized Bed by Pressure Fluctuation Measurements – Analysis of the Standard Deviation Methodology. *Powder Technology*, v.174, p. 104-113, 2007.

FONSECA, J.S., MARTINS, G.A. *Curso de Estatística*. 3^a Ed. Editora Atlas.1982, 286 p.

FOUST, A.S., WENZEL, L.A., CLUMP, C.W., MAUS, L. ANDERSEN, L.B. *Princípios das Operações Unitárias*. Editora Guanabara Dois, Segunda Edição, 1982, 670 p.

FREY, G.M. *Multiresolutional Partial Least Squares and Principal Component Analysis of Fluidized Bed Drying*. Saskatoon, University of Saskatchewan, 2005, 162 p. PhD Thesis.

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

GRACE, J., Bi, H. Introduction to circulating fluidized beds. p. 1-20. In: GRACE, J., AVIDAN, A., KNOWLTON, T. *Circulating Fluidized Beds*. Blackie Academic & Professional: London, 1997, 585 p.

HONG, S.C.; JO, B.R., DOH, D.S., CHOI, C.S. Determination of Minimum Fluidization Velocity by Statistical Analysis of Pressure Fluctuations in a Gas –Solid Fluidized Bed. *Powder Technology*, v. 60, p. 215-221, 1990.

JOHANSSON, 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.

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.

KARAMAVRUÇ, A. L., CLARK, N.N. Local differential pressure analysis in a slugging bed using deterministic chaos theory. *Chemical Engineering Science*, v. 52, p. 357-370, 1997.

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

KURKA, P.R.G. *Notas de aula de Processamento de Sinais em Sistemas Mecânicos I*. 2004.

LabView. Disponível em: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371299B-01/lvdsp/dsp_filter/>, Acesso em: 22 fev. 2007.

LI, Z., KOBAYASHI, N., NISHIMURA, A., DEGUCHI, S., HASATANI, M. Fluidization Characteristics in a Fluidized bed of Dissimilar Particles. *Proceedings of the 13th International Drying Symposium (IDS)*. Beijing, China, v. A, p. 587-595, 2002.

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: fev. 2007.

MORIS, V.A.S, VISNADI, C.B., CUNHA, R.L.G., ROCHA, S.C.S., TARANTO, O.P. Monitoramento do Processo de Recobrimento de Celulose Microcristalina em Leito Fluidizado. *Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, CD Rom, Maringá, PR. 2006.

NETO, B.B., SCARMINIO, I.S., BRUNS, R.E. *Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria*. 2^a ed. Editora Unicamp. 2003, 401p.

OLIVEIRA Jr, A.B., FREIRE, J.T. Secagem de partículas de alumina e sílica –gel em leito fluidizado e vibro-fluidizado. In: *XXXI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, Uberlândia, MG. 2004.

OKADA, M., VITALI, A.A., TEIXEIRA NETO, R.O., CARVALHO, R., GONÇALVES, J.R. Secagem de sólidos. In: *Curso de secagem industrial*. IPT, p. 1.1 - 1.37, 1995.

OWER, E., PANKHURST, R.C. *The measurement of air flow*. 5th ed., New York, NY, Pergamon Press, 1977, 362 p.

POSWIATA, A., SZWAST, Z. Optimization of fine solid drying in bubble fluidized bed. *Transport in Porous Media*, v.66, p. 219-231, 2007.

PUNCOCHAR, M., DRAHOS, J., CERMAK, J., SELUCKY, K. Evaluation of minimum fluidizing velocity in gas fluidized bed from pressure fluctuations. *Chemical Engineering Communications*, v. 35, p. 81-87, 1985.

ROY, R., DAVIDSON, J.F., TUPONOGOV, G.V. The velocity of sound in fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, v. 45, p. 3233-3245, 1990.

SAXENA, S.C., RAO, N.S., TANJORE, V.N. Diagnostic Procedures of Establishing the Quality of Fluidization of Gas-Solid Systems. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 6, p. 56-73, 1993.

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, V. A. *Monitoramento de Regimes de Contato Gás-Sólido em Leito de Jorro Cone-Cilíndrico por Medidas de Queda de Pressão em Tempo Real*. Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1998. Dissertação (Mestrado).

STRUMILLO, C., KUDRA, T. *Drying: Principles, Applications and Design*. Gordon and Breach Science, 1986, 448 p.

SVOBODA, K., CERMAK, J., HARTMAN, M., DRAHOS, J., SELUCHY, K. Influence of particle size on the pressure fluctuations and slugging in a fluidized bed. *AIChE Journal*, v. 30, p. 513-517, 1984.

TATEMOTO, Y., BANDO, Y., YASUDA, K., SENDA, Y., NAKAMURA, M. Effect of fluidizing particle on drying characteristics of porous material in fluidized bed. *Drying Technology*, v. 19, p. 1305-1318, 2001.

TARANTO, O. P. *Monitoramento de Regimes e Recobrimento de Partículas em Leito de Jorro Bi-Dimensional*. Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1996. Tese (Doutorado)

TRNKA, O., VESELÝ, V., HARTMAN, M., BERAN, Z. Identification of the State of a Fluidized Bed by Pressure Fluctuation. *AIChE Journal*, v. 46, p. 509-514, 2000.

van der SCHAFF, J. SCHOUTEN, J.C., JONSON, F., van der BLEEK, C.M. Non-intrusive 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.

VITOR, J.F.A., MASSARANI, G. Secagem em leito fluidizado de material particulado: experimentação da operação em batelada. *Anais do 30º Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, CD Rom, São Carlos, SP. 2002.

WEN, C. J., YU, Y. H., apud KUNII, D., LEVENSPIEL, O. Fluidization Engineering. Butterworth-Heinemann, 2nd Ed, 1991, 491 p; *AIChE Journal*., v. 12, p. 610, 1966.

WILKINSON, D. Determination of Minimum Fluidization Velocity by Pressure Fluctuation Measurement. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 73, p. 562-565, 1995.

APÊNDICE A – Ensaios experimentais referentes ao incremento da velocidade do ar

Este Apêndice é composto dos 14 ensaios experimentais utilizando CMC e areia realizados com o aumento da velocidade superficial do gás.

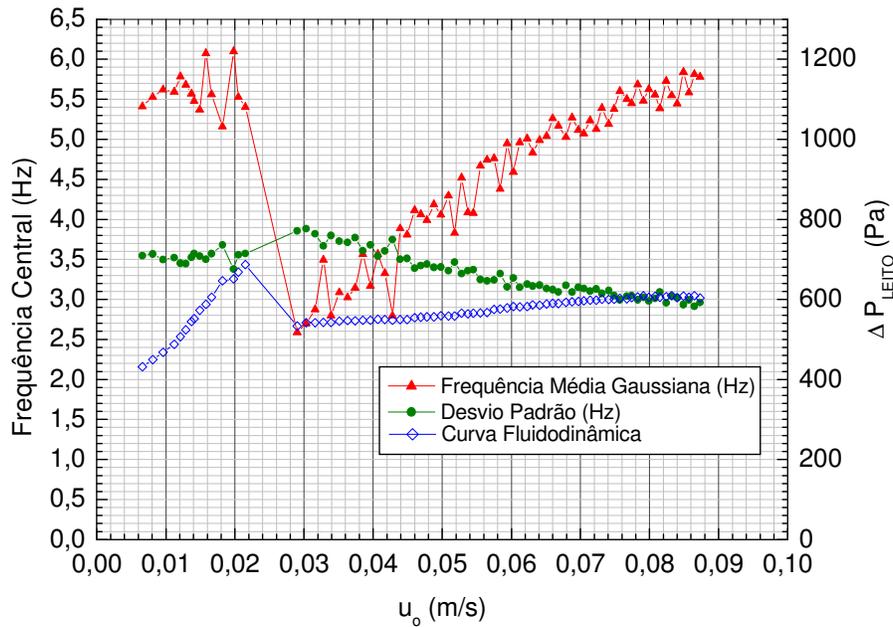


Figura A. 1 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana-
CMC, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$.

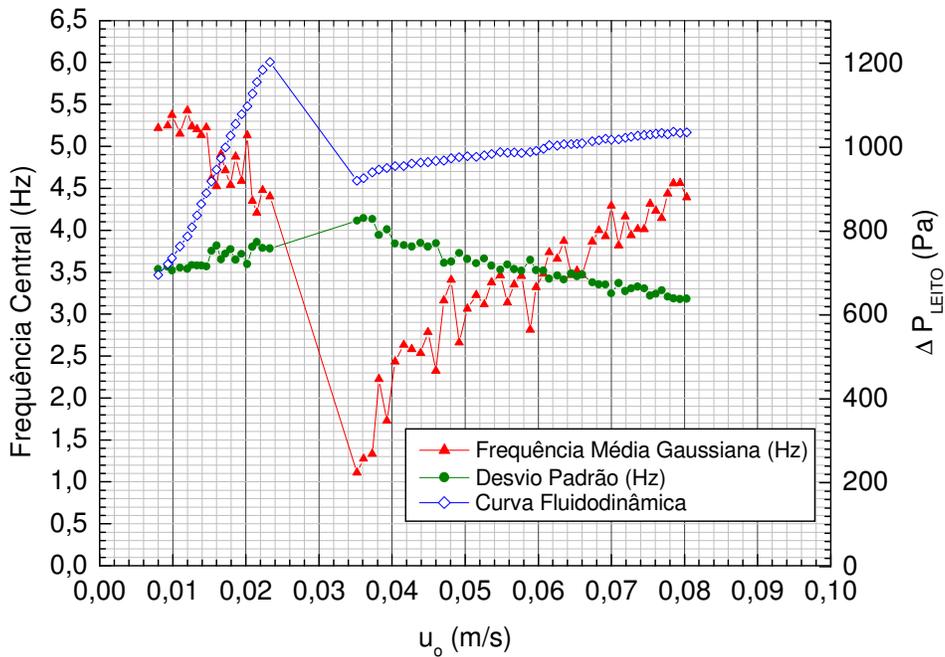


Figura A.2 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana-
CMC, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$.

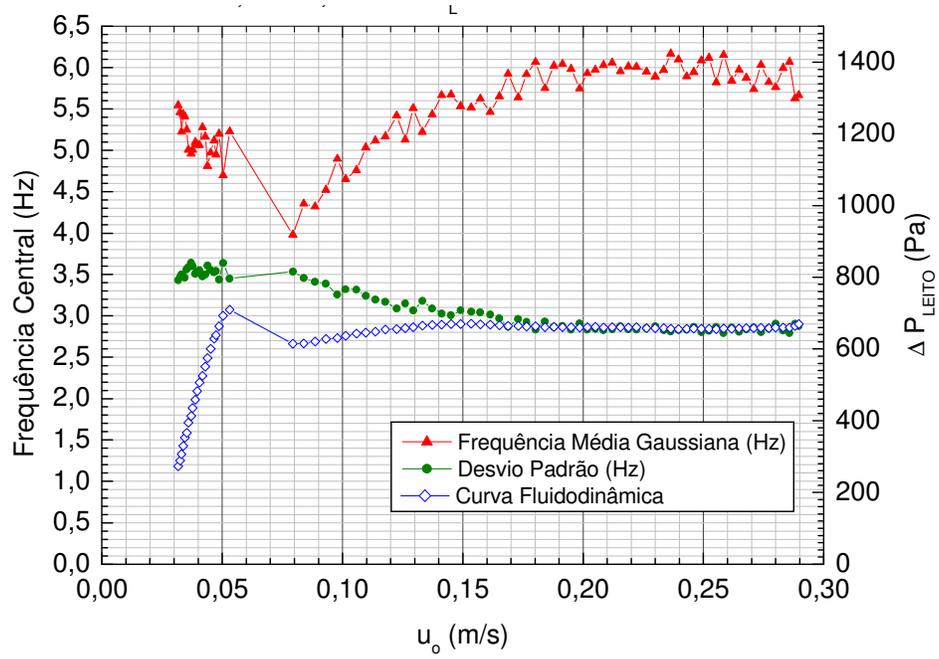


Figura A.3 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana -
CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 15$ cm.

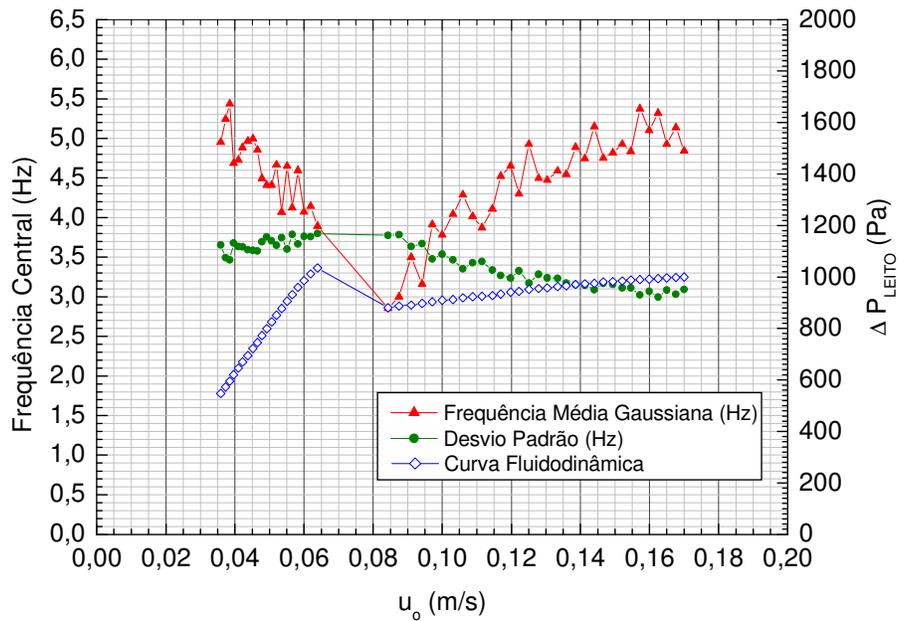


Figura A.4 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana -
CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 20$ cm.

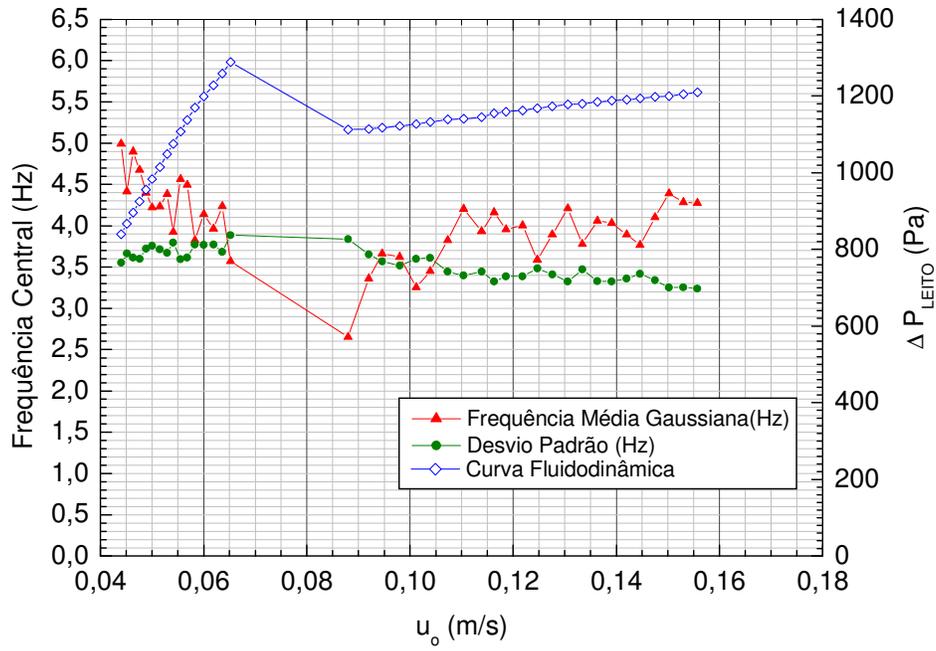


Figura A.5 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana - CMC, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$.

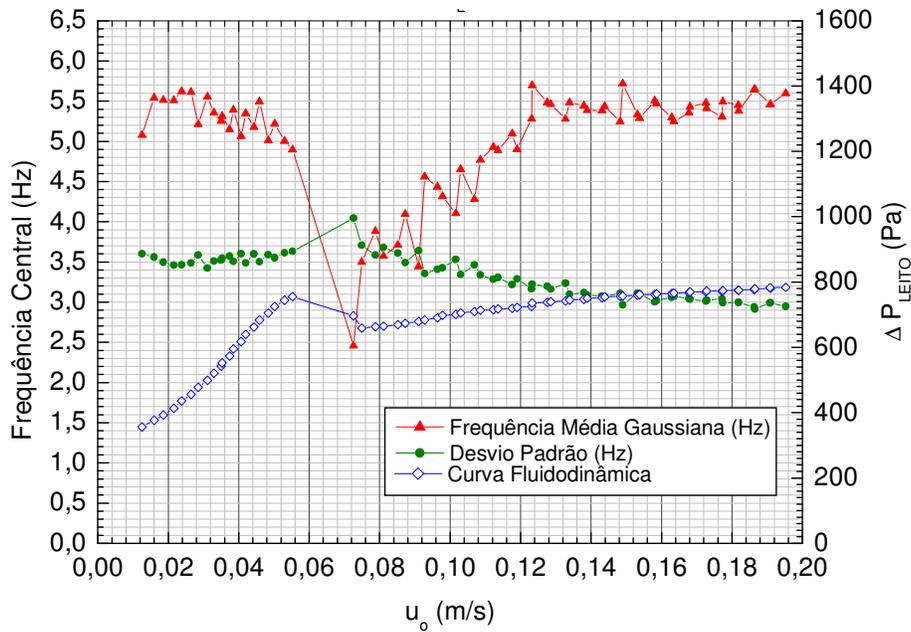


Figura A.6 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$.

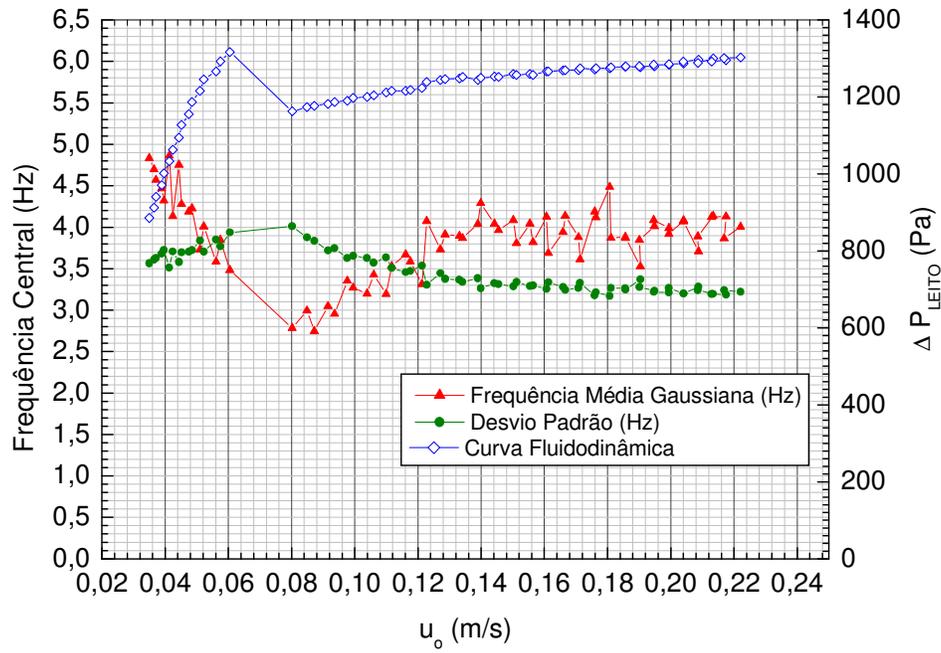


Figura A.7 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana -
CMC, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$.

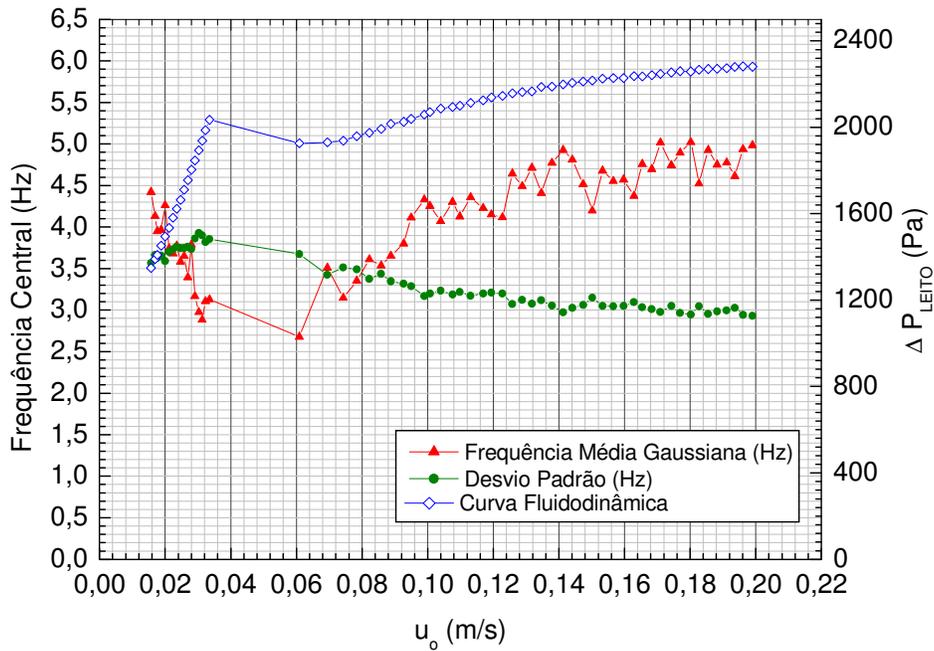


Figura A.8 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana -
Areia, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$.

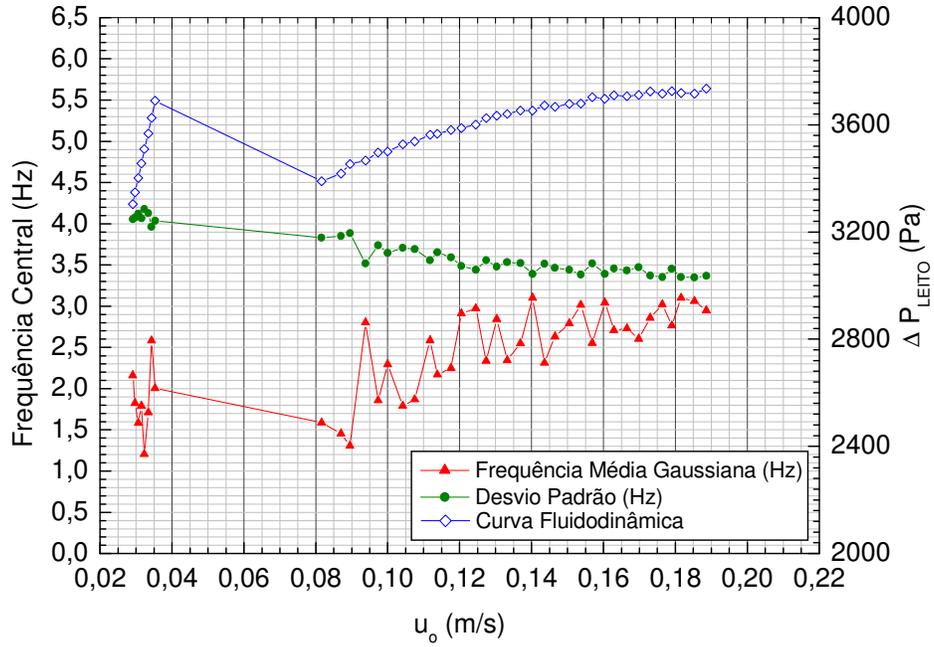


Figura A.9 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana -
Areia, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$.

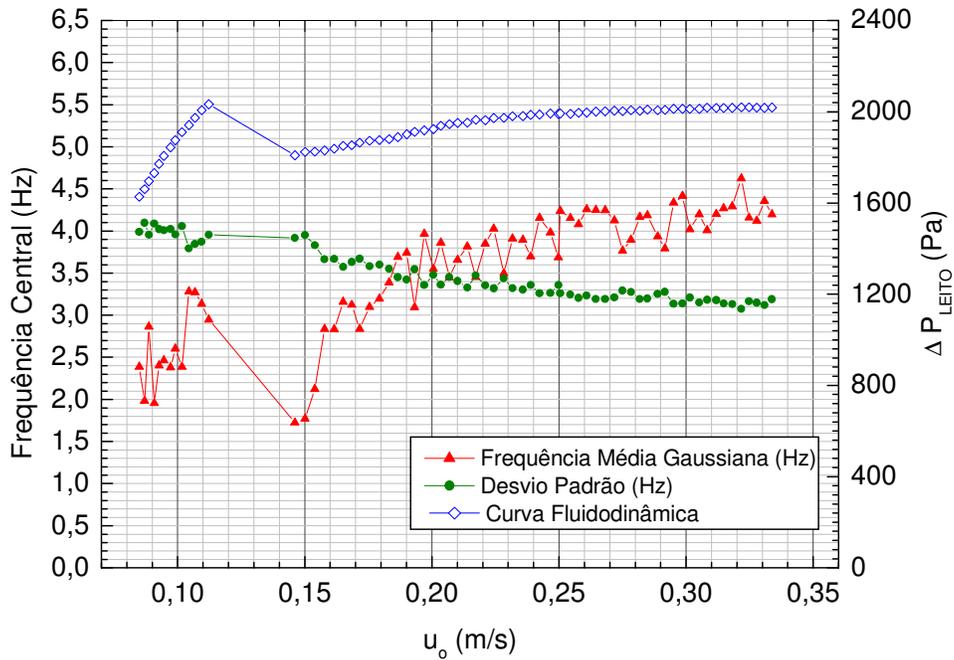


Figura A.10 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial
Gaussiana- Areia, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$.

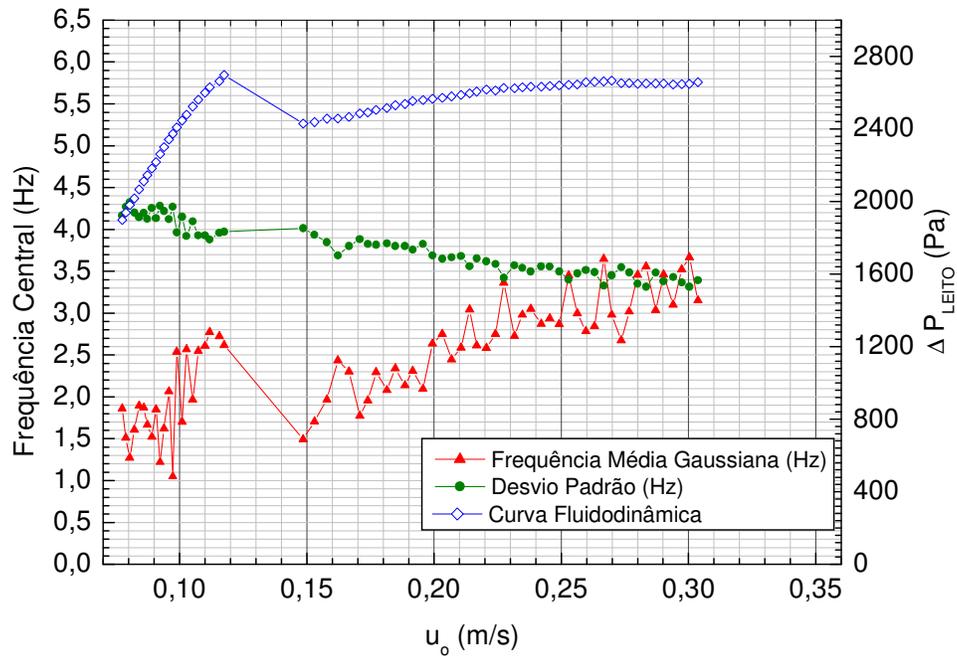


Figura A.11 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- Areia, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 20 \text{ cm}$.

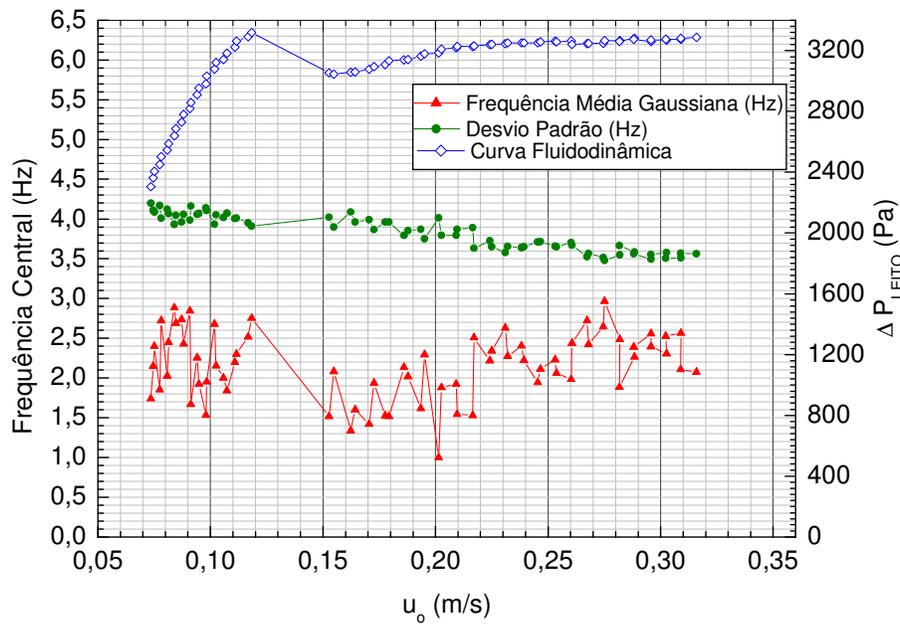


Figura A.12 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- Areia, $d_p = 325 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$.

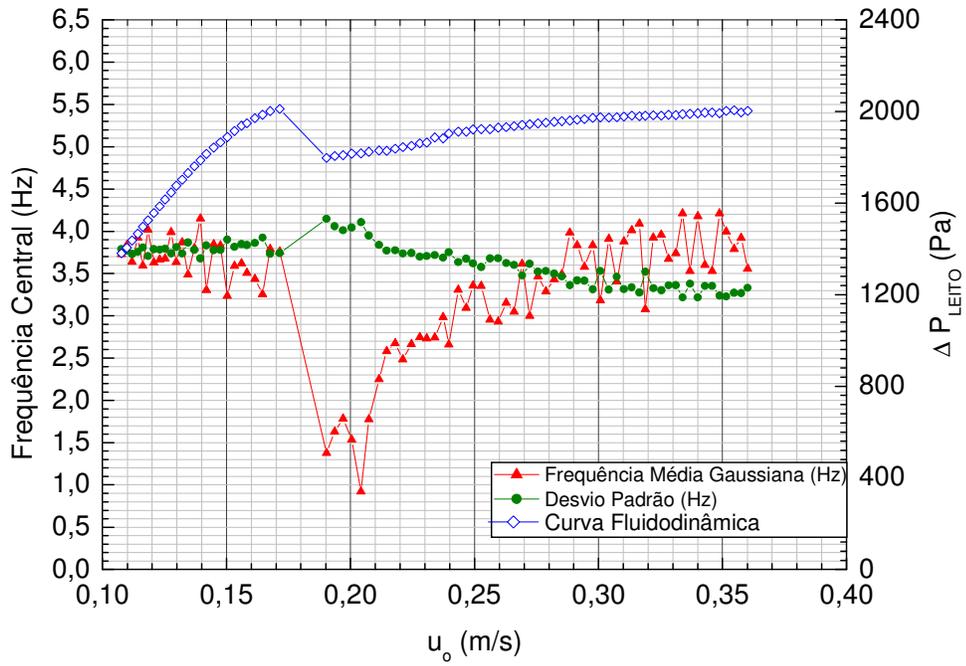


Figura A.13 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- Areia, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 15 \text{ cm}$.

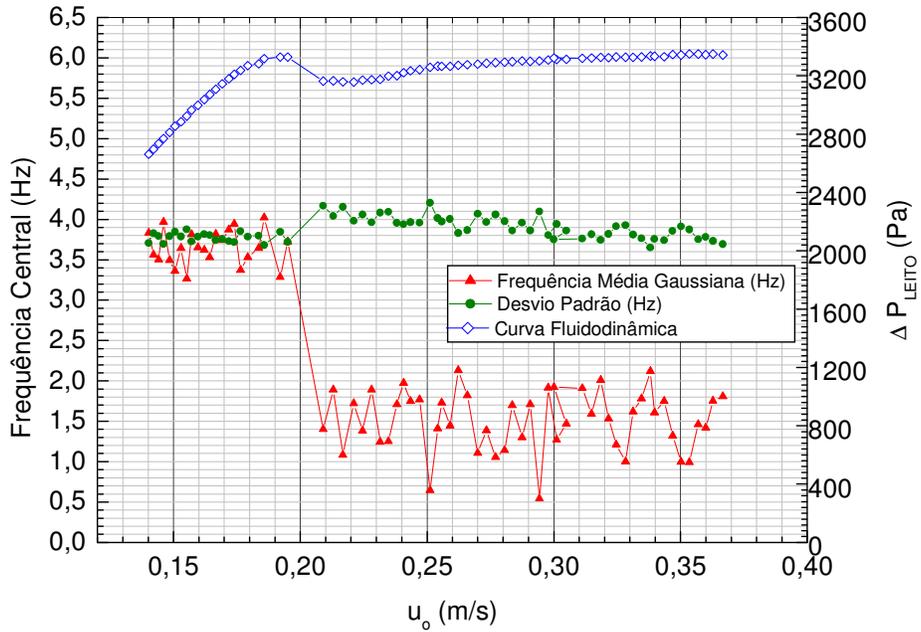


Figura A.14 - Transformada de Fourier com a Distribuição Exponencial Gaussiana- Areia, $d_p = 460 \mu\text{m}$, $h_L = 25 \text{ cm}$.