



**DIEGO ANDRES RUEDA ORDOÑEZ**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE  
SEGREGAÇÃO DE PARTÍCULAS EM  
MISTURAS BINÁRIAS USANDO ANÁLISE  
DE FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO EM LEITO  
FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO**

29/2014

**CAMPINAS**

**2014**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DIEGO ANDRES RUEDA ORDOÑEZ**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE  
SEGREGAÇÃO DE PARTÍCULAS EM  
MISTURAS BINÁRIAS USANDO ANÁLISE  
DE FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO EM LEITO  
FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Térmica e Fluidos

Orientador: Profa. Dra **Araí Augusta Bernárdez Pécora**  
Coorientador: Prof. Dr. Emerson dos Reis

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO  
ALUNO DIEGO ANDRÉS RUEDA ORDOÑEZ  
E ORIENTADA PELA PROFa. DRa. **ARAÍ AUGUSTA BERNÁRDEZ PÉCORA.**

  
ASSINATURA DA ORIENTADORA

**CAMPINAS  
2014  
iii**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

R836e Rueda, Diego Andres, 1981-  
Estudo experimental de segregação de partículas em misturas binárias usando análise de flutuações de pressão em leito fluidizado gás-sólido / Diego Andres Rueda Ordoñez. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Arai Augusta Bernárdez Pécora.

Coorientador: Emerson dos Reis.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Leito fluidizado. 2. Fluidização. 3. Fourier, Transformadas de. I. Pécora, Arai Augusta Bernárdez. II. Reis, Emerson dos. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Título em outro idioma: Experimental study of segregation in granular binary mixtures using pressure fluctuations analysis in a gas-solid fluidized bed

Palavras-chave em inglês:

Fluidized bed

Fluidization

Fast Fourier transforms

Área de concentração: Térmica e Fluidos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Arai Augusta Bernárdez Pécora [Orientador]

Guilherme José de Castilho

Carlos Alberto Severo Felipe

Data de defesa: 29-01-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

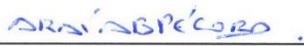
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

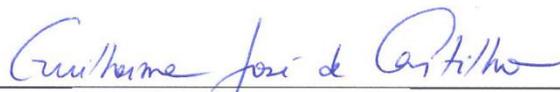
**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE SEGREGAÇÃO  
DE PARTÍCULAS EM MISTURAS BINÁRIAS  
USANDO ANÁLISE DE FLUTUAÇÕES DE  
PRESSÃO EM LEITO FLUIDIZADO GÁS-  
SÓLIDO**

Autor: **Diego Andres Rueda Ordoñez**  
Orientador: **Araí Augusta Bernárdez Pécora**  
Coorientador: **Emerson dos Reis**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

  
\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. Araí Augusta Bernárdez Pécora**  
Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Guilherme José de Castilho**  
Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Carlos Alberto Severo Felipe**  
Universidade Federal do Rio Grande

Campinas, 29 de Janeiro de 2014.

## **Dedicat3ria**

Dedico este trabajo a mi hija Ana Maria Rueda Pabon, que doy todo de mi para ella, que es mi amor e mi amiga, Ella es mi alegr3a y mi vida, sin ella esta investigacion no hubiera sido posible, ella es el motivo de mi trabajo.

A mis padres Luzmila e Diego por su apoyo incansable, porque siempre creyeron en m3, porque siempre entregaron cada d3a de su trabajo, de su dedicaci3n y de su amor a sus hijos.

A mis hermanos que han visto mis errores y aciertos, y siempre han estado en mi tristeza y alegr3a.

A mis amigos que siempre me dan grandes momentos para vivir y re3r.

A la vida y a Dios.

## Agradecimentos

Quero agradecer algumas pessoas, sem as quais este trabalho não houvesse sido possível de realizar.

À Profa. Dra. Araí Augusta Bernárdez Pécora, pela oportunidade, paciência e dedicação para guiar-me e orientar-me neste processo educativo.

Ao Dr. Emerson dos Reis, pela co-orientação, colaborações no desenvolvimento da pesquisa além da paciência e dedicação.

Aos colegas de departamento e aos que participaram direta e indiretamente no desenvolvimento do trabalho

A minha família e em especial aos meus pais Diego José e Maria Luzmula, e a minha filha Ana pelo carinho, e por sempre ser o principal motivo de minhas alegrias e o motor de meu progresso.

A meu irmão que foi um guia e um incansável colaborador e amigo, a sua família que sempre foi como minha e me entregaram carinho e paciência.

A Alejandra minha amiga e companheira que me deu sua paciência e tempo, me da sua companhia e força sempre e mais ainda quando me sinto cansado e sem ideias, por seu amor e carinho, porque sempre esta a meu lado.

A meus amigos Diego e Handel e os que sempre estiveram e me acompanharam em todos os momentos, pelos conselhos e ouvir minha voz, os melhores companheiros neste processo educativo.

A meus amigos na Colômbia por acreditar em mim..

À Unicamp que através da Faculdade de Engenharia Mecânica deram a oportunidade e infraestrutura fornecida para o desenvolvimento de minha pesquisa.

A CAPES pelo seu apoio econômico, com que foi possível esta pesquisa.

Ao Brasil e suas pessoas queridas, que me receberam calorosamente e por deram esta maravilhosa oportunidade.

“Não ganhe o mundo e perca sua alma; sabedoria é melhor que prata e ouro”.

[Bob Marley](#)

## Resumo

Neste trabalho, foi utilizada uma metodologia para a análise dos sinais de flutuações de pressão visando estudar a fluidização e o fenômeno da segregação em leitos fluidizados contendo misturas binárias de partículas de diferentes tamanhos e massas específicas. As medidas foram feitas para caracterizar o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado contendo misturas binárias e encontrar as velocidades inerentes ao fenômeno da segregação. Para tanto, primeiramente foram estudados os comportamentos de cada material isolado para posterior comparação com o comportamento observado para as misturas contendo tais materiais. Três tipos de sólidos particulados foram utilizados neste trabalho: microesferas de plástico (diâmetro médio de Sauter de 971  $\mu\text{m}$ ) e microesferas de vidro (diâmetros médios de Sauter de 462 e 959  $\mu\text{m}$ ). O sistema experimental utilizado consiste de uma coluna, de 0,1 m de diâmetro e 2,5 m de altura, equipada com um distribuidor de gás tipo placa porosa e possuindo seções de vidro, acrílico e aço carbono intercaladas, o que permitiu acompanhar visualmente o processo, e adquirir imagens por meio de uma câmera fotográfica. Medidas de flutuações de pressão foram feitas em diferentes velocidades superficiais do gás para cada material ou mistura estudados. Os sinais de pressão foram medidos em três pontos na coluna do leito, sendo um no plenum e dois na coluna, situados a 0,035 e a 0,115 m acima da placa distribuidora. Em todos os testes a altura do leito foi mantida fixa em 0,150 m. As flutuações de pressão foram analisadas no domínio do tempo e no domínio da frequência aplicando a transformada rápida de Fourier (FFT) o que permitiu diferenciar o comportamento dinâmico das misturas em cada velocidade superficial do gás estudada. Os resultados permitiram identificar regiões com diferentes comportamentos fluidodinâmicos e velocidades inerentes ao processo de segregação como as velocidades de fluidização inicial, fluidização completa, de segregação e de mistura completa. Este trabalho procura contribuir para melhorar o entendimento sobre a fluidização de misturas binárias e sobre o fenômeno de segregação normalmente presente em tais sistemas.

*Palavras Chave:* Fluidização, Transformada rápida de Fourier, Segregação de partículas, Velocidade de mínima fluidização, Análise no domínio do tempo e da frequência, Pesquisa experimental.

## Abstract

A methodology for analysis of pressure fluctuations signals was used, in the present work, to study the fluidizing and segregation phenomena in fluidized beds containing granular binary mixtures with different sizes and densities. Pressure measurements have been made to characterize the dynamic behavior of fluidized beds and to find the velocities involved in the segregation phenomena. The analysis of each single studied material was made before analyzing of the mixtures containing such materials. Three types of solid particles were used in this work: plastic microspheres (971  $\mu\text{m}$  Sauter mean diameter) and glass microspheres (462 and 959  $\mu\text{m}$  Sauter mean diameters). The experimental system presents a column, 0.1m diameter and 2.5 m height, equipped with a porous plate gas distributor. The column was made by glass, acrylic and carbon-steel sections to allow visual observations of the process and acquiring images by a camera. Measurements of pressure fluctuations were made in different gas superficial velocities for each studied material or mixture. The pressure signals were measured at three points in the column: one at plenum and two above the distributor plate, at 0.035 and 0.115 m above the distributor plate. The height of the bed material was fixed in 0.15 m regarding all performed tests. Pressure fluctuations were analyzed on the time domain and on the frequency domain using the fast Fourier transform (FFT) which allows differentiating the dynamic behavior of the mixtures in each superficial gas velocity studied. The results allowed the identification of regions with different fluid dynamic behaviors as well as the determination of gas velocities inherent to the segregation process as the initial fluidization, complete fluidization, segregation and complete mixing velocities. This paper aims to contribute on understanding the fluidization process of binary mixtures and on the phenomenon of segregation normally present in such systems.

*Key Words: Fluidization, fast Fourier transform, Segregation of particles, Minimum fluidization velocity, Analysis in the time domains, Experimental research.*

## Lista de Ilustrações

2.1	Comportamento de um leito em função da velocidade do gás	6
2.2	Etapas de aquisição e processamento de sinais	12
2.3	Desvio Padrão das flutuações de pressão contra o número de medidas no leito fluidizado	15
2.4	Sinais de pressão	19
2.5	Esquema representativo da transformada discreta de Fourier	20
2.6	Espectros de potencia dos sinais de pressão	23
2.7	Curva típica de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás para um material homogêneo	25
2.8	Determinação de $U_{mf,\sigma}$ através do método de Puncocharet <i>al.</i> (1985)	30
2.9	Curva da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás para uma mistura binária e os diferentes estados de fluidização	32
2.10	Evolução da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás para uma mistura binária	33
2.11	Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás para misturas binárias	34
2.12	Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás para uma mistura binária, (a) leito inicialmente bem misturado, (b) leito inicialmente segregado	35
2.13	Processo de fluidização num leito com mistura binária	36
3.1	Fotografia das microesferas de vidro fino, vidro grosso e plástico	41
3.2	Classificação das partículas segundo a classificação de Geldart (1973) para as microesferas de vidro fino, vidro grosso e plástico	44
3.3	Diagrama esquemático do sistema experimental	45
3.4	Diagrama esquemático do leito fluidizado	47
3.5	Distribuidor de gás tipo placa poroso apoiado sobre a base do tubo do vidro	48
3.6	Curva característica da queda de pressão na placa distribuidora de tipo poroso	48
3.7	Transdutor de pressão SMAR modelo LD301-D2	50
3.8	Diagrama de conexão do transdutor de pressão SMAR LD301 – D2	50

3.9	Transdutor de pressão Smar LD-3-1 D2 conectado ao <i>plenum</i> do sistema experimental.	51
3.10	Vista da faixa de trabalho e dos terminais de alimentação do transdutor Rosemount	52
3.11	Circuito de alimentação do transdutor Rosemount 3051	52
3.12	Fotografia do transdutor de pressão Rosemount 3051	52
3.13	Fotografia da coluna de manômetros ao lado do sistema experimental	53
3.14	Instrumentação para medida das condições internas do laboratório (barômetro de Torricelli, termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido)	54
3.15	Sistema de aquisição de sinais de flutuações de pressão	55
3.16	Imagem adquirida com a câmera OLYMPUS SP-800UZ:	56
4.1	Leito carregado com mistura ( <i>PL-VG</i> ) antes de iniciar o teste	61
5.1	Comportamento dos sinais de pressão no plenum ao longo do tempo para o regime de leito fixo (Material <i>VG</i> , teste <i>VG1</i> ).	65
5.2	Comportamento dos sinais de pressão no <i>plenum</i> ao longo do tempo para o regime de leito borbulhante (Material <i>VG</i> , teste <i>VG1</i> ).	65
5.3	Sinal de pressão manométrica no <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ )	66
5.4	Pressão deslocada no domínio do tempo	67
5.5	Espectro de amplitude do sinal de flutuação de pressão adquirido pelo transdutor no <i>plenum</i> (material: <i>VG</i> , $U_o = 0,88$ m/s).	69
5.6	Tela do software Origin 8.0 como uso da ferramenta FFT <i>smooth</i> .(Origin 8.0/OriginLab. FFT FilterSmoothing. OriginLab. 2013	70
5.7	Resultado do processo de filtragem do sinal aplicando a ferramenta FFT <i>smooth</i> com frequência de corte de 20 Hz	71
5.8	Tela do software Origin 8.0 para uso da ferramenta FFT <i>Filter</i> .(OriginLab, 2013), (sinal do vidro grosso na posição $P_{z2}$ )	72
5.9	Resultado do processo de filtragem do sinal através da ferramenta <i>FFT filtersmoothin</i> com frequência de corte de 20 Hz	73
5.10	Curvas da queda de pressão e desvio padrão medido no plenum em função da velocidade superficial do gás, mistura ( <i>PL-VG</i> ).	77

6.1	Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> em função da $U_o$ com vidro fino ( $VF_I$ ).	80
6.2	Desvio padrão das medidas de pressão em $z_1$ e $z_2$ em função da velocidade superficial do gás com vidro fino ( $VF_I$ ).	81
6.3	Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> como função da $U_o$ com vidro grosso ( $VG_I$ ).	82
6.4	Desvio padrão das medidas de pressão em $z_1$ e $z_2$ em função da velocidade superficial do gás com vidro grosso ( $VG_I$ ).	83
6.5	Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> como função da $U_o$ com o plástico ( $PL_I$ ).	85
6.6	Desvio padrão das medidas de pressão em $z_1$ e $z_2$ em função da velocidade superficial do gás com o plástico ( $PL_I$ ).	85
6.7	Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> em função da velocidade superficial do gás com a mistura ( $VF-VG_I$ ).	89
6.8	Queda de pressão em função da velocidade superficial do gás medido no <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ ) com os materiais ( $VF_I$ ), ( $VG_I$ ) e mistura ( $VF-VG_I$ ).	91
6.9	Desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ ) em função da velocidade superficial do gás com os materiais ( $VF_I$ ), ( $VG_I$ ) e mistura ( $VF-VG_I$ ).	91
6.10	Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas em $P_{z_1}$ em função da velocidade superficial do gás com a mistura ( $VF-VG$ ).	92
6.11	Queda de pressão no leito e desvio padrão de pressão em $z_2$ em função da velocidade superficial do gás com a mistura ( $VF-VG$ ).	92
6.12	Desvio padrão das medidas de pressão medidos em $z_1$ em função da velocidade superficial do gás com os materiais [( $VF_I$ ), ( $VG_I$ ) e mistura ( $VF-VG_I$ )].	93
6.13	Desvio padrão das medidas de pressão medidos em $z_2$ em função da velocidade superficial do gás com os materiais [( $VF_I$ ), ( $VG_I$ ) e mistura ( $VF-VG_I$ )].	94
6.14	Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> em função da $U_o$ para a mistura ( $VF-VG_I$ ) ( $U_{mf,\sigma}$ obtido levando-se em conta todos os dados levantados, ou seja, regiões 2, 3 e 4).	95

6.15	Desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> como função da $U_o$ para a mistura $(VF-VG)_I$ ( $U_{mf,\sigma}$ obtido levando-se em conta apenas os dados levantados na região 2).	95
6.16	Desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> como função da $U_o$ com a mistura $(VF-VG)_I$ , ( $U_{mf,\sigma}$ obtido levando-se em conta apenas os dados levantados nas regiões 3 e 4).	96
6.17	Desvio padrão das medidas de pressão em $P_{z1}$ como função da $U_o$ com a mistura $(VF-VG)_I$	96
6.18	Desvio padrão das medidas de pressão em $P_{z2}$ como função da $U_o$ com a mistura $(VF-VG)_I$	97
6.19	Sinais de pressão no <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ ) com a mistura $(VF-VG)_I$	100
6.20	Sinais de pressão no <i>plenum</i> com o vidro fino (VF), vidro grosso (VG) e com a mistura: $U_o = 0,41$ m/s	103
6.21	Sinais de pressão no <i>plenum</i> com vidro grosso (VG) e com a mistura $(VF-VG)$ : $U_o = 0,62$ m/s	104
6.22	Sinais de pressão no <i>plenum</i> com o vidro grosso (VG) e com a mistura $(VF-VG)$ : $U_o = 0,78$ m/s	105
6.23	Sinais de pressão no <i>plenum</i> com o vidro grosso (VG) e com a mistura $(VF-VG)$ : $U_o = 0,89$ m/s	106
6.24	Sinais de pressão na posição $z_1$ ( $P_{z1}$ ) com a mistura $(VF-VG)_I$	107
6.25	Sinais de pressão na posição $z_1$ com os materiais isolados (VF) e (VG) e com a mistura $(VF-VG)$ : $U_o = 0,41$ m/s	110
6.26	Sinais de pressão na posição $z_1$ com o vidro grosso (VG) e com a mistura $(VF-VG)$ : $U_o = 0,62$ m/s	111
6.27	Sinais de pressão medidos na posição $z_2$ para os materiais homogêneos e a mistura $(VF-VG)$ , $U_o = 0,78$ m/s	111
6.28	Sinais de pressão na posição $z_1$ com o vidro grosso (VG) e com a mistura $(VF-VG)$ : $U_o = 0,89$ m/s	112
6.29	Sinais de pressão na posição $z_2$ ( $P_{z2}$ ) com a mistura $(VF-VG)_I$	113

6.30	Sinais na posição $z_2$ com os materiais isolados e com a mistura (VF- VG): $U_o = 0,41$ m/s	116
6.31	Sinais de pressão na posição $z_2$ com o vidro grosso (VG) e com a mistura (VF-VG): $U_o = 0,62$ m/s	117
6.32	Sinais de pressão na posição $z_2$ com o vidro grosso (VG) e com a mistura (VF-VG): $U_o = 0,78$ m/s	117
6.33	Sinais de pressão na posição $z_2$ com o vidro grosso (VG) e com a mistura (VF-VG): $U_o = 0,89$ m/s	118
6.34	Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> em função da velocidade superficial do gás com a mistura $(PL-VG)_1$ .	122
6.35	Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás medido no <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ ) para os materiais $(PL)_1$ , $(VG)_1$ e $(PL-VG)_1$	123
6.36	Desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ ) em função da velocidade superficial do gás com os materiais $(PL)_1$ , $(VG)_1$ e mistura $(PL-VG)_1$	124
6.37	Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas em $z_1$ em função da velocidade superficial do gás com a mistura $(PL-VG)$ .	125
6.38	Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em $z_2$ em função da velocidade superficial do gás com a mistura $(PL-VG)$ .	125
6.39	Desvio padrão das medidas de pressão em $z_1$ em função da velocidade superficial do gás, com os materiais isolados $(PL)$ e $(VG)$ e com a mistura e $(PL-VG)$	126
6.40	Desvio padrão das medidas de pressão medidos em $z_2$ em função da velocidade superficial do gás com os materiais $(PL)$ , $(VG)$ e $(PL-VG)$	127
6.41	Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> em função da $U_o$ para a mistura $(PL-VG)_1$ ( $U_{mf,\sigma}$ obtido levando-se em conta todos os dados levantados, ou seja, regiões 2, 3 e 4).	128
6.42	Desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> como função da $U_o$ para a mistura $(PL-VG)_1$ ( $U_{mf,\sigma}$ obtido levando-se em conta apenas os dados levantados na região 2).	128

6.43	Desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> como função da $U_o$ com a mistura $(PL-VG)_I$ , ( $U_{mf,\sigma}$ obtido levando-se em conta apenas os dados levantados nas regiões 3 e 4).	129
6.44	Desvio padrão das medidas de pressão em $P_{z1}$ como função da $U_o$ com a mistura $(PL-VG)_I$	129
6.45	Desvio padrão das medidas de pressão em $P_{z2}$ como função da $U_o$ com a mistura $(PL-VG)_I$	130
6.46	Sinais de pressão no <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ ) com a mistura $(PL-VG)_I$ .	133
6.47	Sinais de pressão no <i>plenum</i> com os materiais isolados e com a mistura $(PL-VG)$ : $U_o = 0,41$ m/s	136
6.48	Sinais de pressão no <i>plenum</i> com o vidro grosso (VG) e com a mistura, $(PL-VG)$ : $U_o = 0,56$ m/s	137
6.49	Sinais de pressão no <i>plenum</i> com o vidro grosso (VG) e com a mistura $(PL-VG)$ : $U_o = 0,72$ m/s	138
6.50	Sinais de pressão no <i>plenum</i> com o vidro grosso (VG) e com a mistura $(PL-VG)$ : $U_o = 0,82$ m/s	138
6.51	Sinais de pressão do transdutor na posição $z_1$ ( $P_{z1}$ ) com a mistura $(PL-VG)_I$ .	140
6.52	Sinais de pressão na posição $z_1$ para os materiais isolados e para a mistura $(PL-VG)$ com $U_o = 0,41$ m/s,	142
6.53	Comparação do desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ ) em função da velocidade superficial do gás, materiais $(PL, VF, (PL-VF))$	143
6.54	Sinais de pressão na posição $z_1$ com o vidro grosso (VG) e com a mistura $(PL-VG)$ : $U_o = 0,72$ m/s	143
6.55	Sinais de pressão na posição $z_1$ com o vidro grosso (VG) e com a mistura $(PL-VG)$ : $U_o = 0,82$ m/s	144
6.56	Sinais de pressão na posição $z_2$ ( $P_{z2}$ ) com a mistura $(PL-VG)_I$ .	145
6.57	Sinais de pressão na posição $z_2$ com os materiais isolados e com a mistura $(PL-VG)$ : $U_o = 0,41$ m/s.	147

6.58	Sinais de pressão medidos na posição $z_2$ com o vidro grosso (VG) e com a mistura (PL- VG): $U_o = 0,56$ m/s	148
6.59	Sinais de pressão medidos na posição $z_2$ com o vidro grosso (VG) materiais isolados e com a mistura (PL- VG): $U_o = 0,72$ m/s	149
6.60	Sinais de pressão na posição $z_2$ com o vidro grosso (VG) e com a mistura (PL- VG) com $U_o = 0,82$ m/s	149
6.61	Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> em função da velocidade superficial do gás com a mistura (PL-VF)	153
6.62	Queda de pressão em função da velocidade superficial do gás medido no <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ ) com os materiais (PL) <sub>1</sub> , (VF) <sub>1</sub> e mistura (PL-VF) <sub>1</sub>	154
6.63	Desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ ) em função da velocidade superficial do gás com os materiais (PL) <sub>1</sub> , (VF) <sub>1</sub> e mistura (PL-VF) <sub>1</sub>	155
6.64	Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em $z_1$ em função da velocidade superficial do gás com a mistura (PL-VF).	155
6.65	Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em $z_2$ em função da velocidade superficial do gás com a mistura (PL-VF)	156
6.66	Desvio padrão das medidas de pressão medidos em $z_1$ em função da velocidade superficial do gás com os materiais [(PL) <sub>1</sub> , (VF) <sub>1</sub> e mistura (PL-VF) <sub>1</sub> ]	157
6.67	Desvio padrão das medidas de pressão medidos em $z_2$ em função da velocidade superficial do gás com os materiais [(PL) <sub>1</sub> , (VF) <sub>1</sub> e mistura (PL-VF) <sub>1</sub> ]	157
6.68	Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> em função da $U_o$ para a mistura (PL-VF) <sub>1</sub> ( $U_{mf,\sigma}$ obtido levando-se em conta todos os dados levantados, ou seja, regiões 2, 3 e 4).	158
6.69	Desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> como função da $U_o$ para a mistura (PL-VF) <sub>1</sub> ( $U_{mf,\sigma}$ obtido levando-se em conta apenas os dados levantados na região 2).	159
6.70	Desvio padrão das medidas de pressão no <i>plenum</i> como função da $U_o$ com a mistura (PL-VF) <sub>1</sub> , ( $U_{mf,\sigma}$ obtido levando-se em conta apenas os dados levantados nas regiões 3 e 4).	159

6.71	Desvio padrão das medidas de pressão em $P_{z1}$ como função da $U_o$ com a mistura (PL-VF) <sub>1</sub>	160
6.72	Desvio padrão das medidas de pressão em $P_{z2}$ como função da $U_o$ com a mistura (PL-VF) <sub>1</sub>	160
6.73	Sinais de pressão do transdutor medidos no <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ ) com a mistura (PL-VF) <sub>1</sub>	163
6.74	Sinais de pressão medidos no <i>plenum</i> com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF): $U_o = 0,13$ m/s	166
6.75	Sinais de pressão medidos no <i>plenum</i> com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF): $U_o = 0,30$ m/s	167
6.76	Sinais de pressão medidos no <i>plenum</i> com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF): $U_o = 0,33$ m/s)	168
6.77	Sinais de pressão medidos no <i>plenum</i> com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF): $U_o = 0,78$ m/s.	169
6.78	Sinais de pressão do transdutor medidos na posição $z_1$ ( $P_{z1}$ ) com a mistura (PL-VF) <sub>1</sub> .	170
6.79	Sinais de pressão medidos na posição $z_1$ com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF): $U_o = 0,13$ m/s	173
6.80	Sinais de pressão medidos na posição $z_1$ com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF): $U_o = 0,30$ m/s	174
6.81	sinais de pressão medidos na posição $z_1$ com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF): $U_o = 0,33$ m/s	175
6.82	sinais de pressão medidos na posição $z_1$ com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF): $U_o = 0,41$ m/s	176
6.83	Sinais de pressão para o transdutor medidos na posição $z_2$ ( $P_{z2}$ ) com a mistura (PL-VF) <sub>1</sub>	177
6.84	Sinais de pressão medidos na posição $z_2$ com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF): $U_o = 0,13$ m/s.	179
6.85	Sinais de pressão medidos na posição $z_2$ com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF): $U_o = 0,30$ m/s.	180

6.86	Sinais de pressão medidos na posição $z_2$ com os materiais isolados e com a mistura ( <i>PL-VF</i> ): $U_o = 0,33$ m/s.	181
6.87	Sinais de pressão medidos na posição $z_2$ com os materiais isolados e com a mistura ( <i>PL- VF</i> ): $U_o = 0,41$ m/s	182
7.1	Espectros de amplitude dos sinais de pressão medidos no <i>plenum</i> , para a mistura ( <i>VF-VG</i> ).	192
7.2	Espectros de amplitude dos sinais no <i>plenum</i> para os materiais isolados e com a mistura ( <i>VF- VG</i> ) <sub>1</sub> : $U_o = 0,41$ m/s	196
7.3	Espectros de amplitude dos sinais no <i>plenum</i> para o vidro grosso ( <i>VG</i> ) <sub>1</sub> e com a mistura ( <i>VF- VG</i> ) <sub>1</sub> : $U_o = 0,62$ m/s	197
7.4	Espectros de amplitude dos sinais no <i>plenum</i> para o vidro grosso ( <i>VG</i> ) <sub>1</sub> e com a mistura ( <i>VF- VG</i> ) <sub>1</sub> : $U_o = 0,78$ m/s	197
7.5	Espectros de amplitude dos sinais no <i>plenum</i> para o vidro grosso ( <i>VG</i> ) <sub>1</sub> e com a mistura ( <i>VF- VG</i> ) <sub>1</sub> : $U_o = 0,89$ m/s.	198
7.6	Espectros de amplitude dos sinais de pressão em $z_1$ para a mistura ( <i>VF-VG</i> ) <sub>1</sub> :	199
7.7	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_1$ para os materiais isolados e para a mistura ( <i>VF- VG</i> ) <sub>1</sub> : $U_o = 0,41$ m/s.	202
7.8	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_1$ para o vidro grosso ( <i>VG</i> ) <sub>1</sub> e para a mistura ( <i>VF- VG</i> ) <sub>1</sub> : $U_o = 0,62$ m/s.	202
7.9	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_1$ para o vidro grosso ( <i>VG</i> ) <sub>1</sub> e para a mistura ( <i>VF- VG</i> ) <sub>1</sub> : $U_o = 0,78$ m/s	203
7.10	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_1$ para o vidro grosso ( <i>VG</i> ) <sub>1</sub> e para a mistura ( <i>VF- VG</i> ) <sub>1</sub> : $U_o = 0,89$ m/s	204
7.11	Espectros de amplitude dos sinais de pressão em $z_2$ para a mistura ( <i>VF-VG</i> ) <sub>1</sub> :	205
7.12	Espectros de amplitude dos sinais em $z_2$ para os materiais isolados e para a mistura ( <i>VF- VG</i> ) <sub>1</sub> : $U_o = 0,41$ m/s	208
7.13	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_2$ para o vidro grosso ( <i>VG</i> ) <sub>1</sub> e para a mistura ( <i>VF- VG</i> ) <sub>1</sub> : $U_o = 0,62$ m/s.	208

7.14	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_2$ . para o vidro grosso $(VG)_1$ e para a mistura $(VF- VG)_I$ : $U_o= 0,78$ m/s,	209
7.15	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_2$ .para o vidro grosso $(VG)_1$ e com a mistura $(VF- VG)_I$ : $U_o= 0,89$ m/s	209
7.16	Espectros de amplitude dos sinais de pressão no <i>plenum</i> para ammistura $(PL-VG)$ .	211
7.17	Espectros de amplitude dos sinais no <i>plenum</i> para os materiais isolados e para a mistura $(PL- VG)_I$ : $U_o= 0,41$ m/s mistura $(PL- VG)$ , $U_o= 0,41$ m/s, no <i>plenum</i>	214
7.18	Espectros de amplitude dos sinais no <i>plenum</i> com o vidro grosso $(VG)_1$ e com a mistura $(PL- VG)_I$ : $U_o= 0,56$ m/s	215
7.19	Espectros de amplitude dos sinais no <i>plenum</i> para o vidro grosso $(VG)$ os e para a mistura $(PL- VG)_I$ : $U_o= 0,72$ m/s	215
7.20	Espectros de amplitude dos sinais no plenum para o vidro grosso $(VG)_1$ e para a mistura $(PL- VG)_I$ : $U_o= 0,82$ m/s	216
7.21	Espectros de amplitude dos sinais de pressão medido em $z_I$ , para ammistura $(PL-VG)$ .	217
7.22	Espectros de amplitude dos sinais em $z_I$ para os materiais isolados e para a mistura $(PL - VG)_I$ : $U_o= 0,41$ m/s	220
7.23	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_I$ para o vidro grosso $(VG)_1$ e para a mistura $(PL- VG)_I$ , $U_o= 0,56$ m/s	221
7.24	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_1$ para o vidro grosso $(VG)_1$ e para a mistura $(PL - VG)_I$ , $U_o= 0,72$ m/.	221
7.25	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_I$ para o vidro grosso $(VG)_1$ e para a mistura $(PL- VG)_I$ , $U_o= 0,82$ m/s	222
7.26	Espectros de amplitude dos sinais de pressão em $z_2$ para ammistura $(PL-VG)_I$	223
7.27	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_2$ para os materiais isoladose para a mistura $(PL-VG)_I$ : $U_o= 0,41$ m/s	226
7.28	Espectro de amplitude dos sinais na posição $z_2$ para o vidro grosso $(VG)_1$ e para a mistura $(PL-VG)_I$ : $U_o= 0,56$ m/s.	226
7.29	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_2$ .para o vidro grosso $(VG)_1$ e para a mistura $(PL-VG)_I$ : $U_o= 0,72$ m/s	227

7.30	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_2$ para o vidro grosso ( $VG$ ) <sub>1</sub> e para a mistura ( $PL-VG$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,82$ m/s	227
7.31	Espectros de amplitude dos sinais de pressão no <i>plenum</i> para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub>	229
7.32	Espectros de amplitude dos sinais no <i>plenum</i> para os materiais homogêneos e para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> , $U_o= 0,13$ m/s.	233
7.33	Espectros de amplitude dos sinais no <i>plenum</i> para os materiais isolados e para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,30$ m/s e para a mistura ( $PL-VF$ ), $U_o= 0,30$ m/s, no <i>plenum</i> .	234
7.34	Espectros de amplitude dos sinais no <i>plenum</i> com os materiais isolados e com a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,33$ m/s	235
7.35	Espectros de amplitude no <i>plenum</i> para os materiais isolados e para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,41$ m/s	236
7.36	Espectros de amplitude dos sinais de pressão em $z_1$ para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub>	237
7.37	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_1$ para os materiais isolados e para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,13$ m/s	240
7.38	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_1$ para os materiais isolados e para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,30$ m/s	241
7.39	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_1$ para os materiais isolados e para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,33$ m/s	242
7.40	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_1$ para os materiais isolados e para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,41$ m/s	243
7.41	Espectros de amplitude dos sinais de pressão em $z_2$ para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub>	244
7.42	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_2$ para os materiais isolados e para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,13$ m/s	247
7.43	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_2$ para os materiais isolados e para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,30$ m/s	248
7.44	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_2$ para os materiais isolados e para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,33$ m/s	249
7.45	Espectros de amplitude dos sinais na posição $z_2$ para os materiais isolados e para a mistura ( $PL-VF$ ) <sub>1</sub> : $U_o= 0,41$ m/s	250

7.46	Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes no <i>plenum</i> , para a frequência de 1,8 Hz, na mistura $(VF-VG)_I$	254
7.47	Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes em $z_1$ , para a frequência de 1.8 Hz, na mistura $(VF-VG)_I$	255
7.48	Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes em $z_2$ , para a frequência de 1.8 Hz, na mistura $(VF-VG)_I$	256
7.49	Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes no <i>plenum</i> , para a frequência de 2.2 Hz, na mistura $(PL-VG)_I$	257
7.50	Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes em $z_1$ , para a frequência de 2.2 Hz, na mistura $(PL-VG)_I$	257
7.51	Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes no <i>plenum</i> , para a frequência de 2.2 Hz, na mistura $(PL-VF)_I$	258
7.52	Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes em $z_1$ , para a frequência de 2.2 Hz, na mistura $(PL-VF)_I$	259
7.53	Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes em $z_2$ , para a frequência de 2.2 Hz, na mistura $(PL-VF)_I$	259
7.54	Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes em $z_1$ , para a frequência de 0,2 Hz, na mistura $(VF-VG)_I$	267

## Lista de Tabelas

2.1	Coefficientes $C_1$ e $C_2$ para o cálculo da $U_{mf}$ através da Eq.2.11	28
3.1	Características físicas dos materiais particulados	43
4.1	Características dos testes realizados com cada tipo de material testado	58
4.2	Características dos testes realizados com cada tipo de mistura testada	59
4.3	Composição das misturas binárias estudadas	59
6.1	Resultados na determinação da velocidade de mínima fluidização para o vidro fino	81
6.2	Resultados na determinação da velocidade de mínima fluidização para o vidro grosso	84
6.3	Resultados na determinação da velocidade de mínima fluidização para o plástico	86
6.4	Resultados da determinação da velocidade de mínima fluidização e desvio porcentual para os materiais isolados	87
6.5	Resultados para a determinação da $U_{mf,\sigma}$ na mistura VF-VG	98
6.6	Resultados na determinação das velocidades inerentes ao fenômeno da segregação para a mistura binária (VF-VG)	98
6.7	Pressões médias obtidas ao longo do processo de fluidização para catorze diferentes velocidades superficiais do gás com a mistura (VF-VG) <sub>1</sub> .	119
6.8	Comparação de velocidades e regimes de fluidização para os materiais isolados (VF) e (VG) e com a mistura (VF-VG) <sub>1</sub>	120
6.9	Resultados para a determinação da $U_{mf,\sigma}$ na mistura PL-VG	131
6.10	Resultados na determinação das velocidades inerentes ao fenômeno da segregação para a mistura binária (PL-VG)	131
6.11	Pressões médias obtidas ao longo do processo de fluidização para catorze diferentes velocidades superficiais do gás com a mistura (PL-VG) <sub>1</sub> .	150
6.12	Comparação de velocidades e regimes de fluidização para os materiais isolados (PL) e (VG) e a mistura (PL-VG) <sub>1</sub>	151

- 6.13 Resultados para a determinação da  $U_{mf,\sigma}$  na mistura *PL-VF*
- 6.14 Resultados obtidos na determinação das velocidades inerentes ao fenômeno da segregação para a mistura binária (*PL-VF*)
- 6.15 Pressões médias obtidas ao longo do processo de fluidização para catorze diferentes velocidades superficiais do gás (mistura (*PL-VF*)<sub>1</sub>)
- 6.16 Comparação de velocidades e regimes de fluidização com os materiais isolados (*PL e VF*) e com a mistura (*PL-VF*)<sub>1</sub>)
- 6.17 Velocidade superficiais do gás selecionadas em cada regime para a análise dos sinais de pressão para os três materiais testados.
- 6.18 Faixas de velocidade superficial do gás em cada regime para as três misturas testadas

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### Letras Latinas

$Ar$	Número de Arquimedes
$D_L$	Diâmetro do leito
$dp$	Diâmetro médio de Sauter da partícula
$F_{cutoff}$	Frequência de corte
$L$	Altura do leito
$N$	Número de dados a serem considerados
$\bar{P}$	Valor médio da pressão para os $N$ pontos de pressão coletados
$P_k$	Pressão do leito medida pelo sinal $k$
$PL$	Plástico
$PN_k$	Pressão deslocada do sinal $k$
$Re$	Número de Reynolds
$t$	Tempo
$U_{fc}$	Velocidade de fluidização completa
$U_{fi}$	Velocidade de fluidização inicial
$U_k$	Velocidade de transição para o regime turbulento
$U_{mb}$	Velocidade de mínimo borbulhamento
$U_{mf}$	Velocidade de mínima fluidização
$U_{mf,\sigma}$	Velocidade de mínima fluidização, determinada pelo método do desvio padrão das flutuações de pressão.
$U_{ms}$	Velocidade de mínimo <i>slugging</i>
$U_o$	Velocidade superficial do gás
$U_s$	Velocidade de segregação completa
$U_{tr}$	Velocidade de transporte das partículas
$V$	Vazão volumétrica de ar
$VF$	Vidro fino
$VG$	Vidro grosso
$z1$	Posição do transdutor (35mm acima do distribuidor de gás)
$z2$	Posição do transdutor (115mm acima do distribuidor de gás)

## Letras Gregas

$\alpha$	Fração percentual em volume
$\Delta P$	Queda de pressão
$\varepsilon$	Porosidade do leito de partículas
$\mu$	Viscosidade dinâmica do gás
$\rho$	Massa específica
$\sigma$	Desvio padrão

## Subscritos

$e$	Efetivo
$f$	Flotsam
$g$	Gás
$j$	Jetsam
$L$	Leito
$mf$	Mínima fluidização
$mon$	Montante
$or$	Orifício
$p$	Partícula
$s$	Sólido

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativas da pesquisa	2
1.2	Objetivos	3
2	REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1	Fundamentos da fluidização	5
2.2	Flutuações de pressão e a fluidodinâmica de leitos fluidizados	9
2.3	Técnicas de análises dos sinais de flutuações de pressão em leitos fluidizados.	12
2.3.1	Frequência de amostragem e número de pontos de pressão	14
2.3.2	Transdutores de pressão	16
2.3.3	Análise de sinais no domínio do tempo	18
2.3.4	Análise no domínio da frequência	19
2.4	Determinação da velocidade de mínima fluidização	24
2.4.1	Método da curva fluidodinâmica	24
2.4.2	Método de medidas de flutuações de pressão	29
2.5	Leitos fluidizados contendo misturas	31
3	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E DO SISTEMA EXPERIMENTAL	40
3.1	Materiais particulados e misturas binárias	40
3.2	Sistema experimental	44
3.2.1	Instrumentação	49
3.2.2	Sistema de aquisição de dados e imagens	55
4	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	57
4.1	Planejamento experimental dos testes	57
5	REDUÇÃO DE DADOS	64
5.1	Redução de dados para as análises dos sinais de pressão no domínio do tempo	64
5.1.1	Redução de dados das análises para os materiais isolados	64
5.1.2	Análise para as misturas binárias	67

5.2	Análises dos sinais de pressão no domínio da frequência para materiais isolados e misturas binárias	68
5.3	Determinação da velocidade de mínima fluidização pelo método da queda de pressão e pelo método do desvio padrão das flutuações de pressão	74
5.3.1	Método tradicional a partir da curva fluidodinâmica	74
5.3.2	Método do desvio padrão das flutuações de pressão	76
5.4	Determinação das velocidades inerentes ao fenômeno de segregação de partículas em leitos fluidizados gás-sólido contendo misturas binárias	76
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES: VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO E ANÁLISES NO DOMINIO DO TEMPO</b>	79
6.1	Determinação da velocidade de mínima fluidização para materiais isolados	79
6.1.1	Microesferas de vidro fino	80
6.1.2	Microesferas de vidro grosso	82
6.1.3	Microesferas de plástico	85
6.1.4	Análise geral da velocidade de mínima fluidização para os materiais isolados	87
6.2	Mistura de microesferas de vidro fino e vidro grosso ( <i>VF-VG</i> )	88
6.2.1	Determinação das regiões de fluidização e das velocidades superficiais do gás de transição inerentes ao fenômeno de segregação para a mistura ( <i>VF-VG</i> )	88
6.2.2	Comportamento das flutuações de pressão no domínio do tempo a mistura ( <i>VF-VG</i> )	99
6.3	Mistura de micro esferas de plástico e vidro grosso ( <i>PL-VG</i> )	125
6.3.1	Determinação das regiões de fluidização e das velocidades superficiais do gás inerentes ao fenômeno de segregação para a mistura ( <i>PL-VG</i> )	121

5.2	Análises dos sinais de pressão no domínio da frequência para materiais isolados e misturas binárias	68
5.3	Determinação da velocidade de mínima fluidização pelo método da queda de pressão e pelo método do desvio padrão das flutuações de pressão	74
5.3.1	Método tradicional a partir da curva fluidodinâmica	74
5.3.2	Método do desvio padrão das flutuações de pressão	76
5.4	Determinação das velocidades inerentes ao fenômeno de segregação de partículas em leitos fluidizados gás-sólido contendo misturas binárias	76
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES: VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO E ANÁLISES NO DOMINIO DO TEMPO</b>	79
6.1	Determinação da velocidade de mínima fluidização para materiais isolados	79
6.1.1	Microesferas de vidro fino	80
6.1.2	Microesferas de vidro grosso	82
6.1.3	Microesferas de plástico	85
6.1.4	Análise geral da velocidade de mínima fluidização para os materiais isolados	87
6.2	Mistura de microesferas de vidro fino e vidro grosso ( <i>VF-VG</i> )	88
6.2.1	Determinação das regiões de fluidização e das velocidades superficiais do gás de transição inerentes ao fenômeno de segregação para a mistura ( <i>VF-VG</i> )	88
6.2.2	Comportamento das flutuações de pressão no domínio do tempo a mistura ( <i>VF-VG</i> )	99
6.3	Mistura de micro esferas de plástico e vidro grosso ( <i>PL-VG</i> )	125
6.3.1	Determinação das regiões de fluidização e das velocidades superficiais do gás inerentes ao fenômeno de segregação para a mistura ( <i>PL-VG</i> )	121

6.3.2	Comportamento das flutuações de pressão no domínio do a mistura ( <i>PL-VG</i> )	132
6.4	Mistura de micro esferas de plástico e vidro grosso ( <i>PL-VF</i> )	152
6.4.1	Determinação das regiões de fluidização e das velocidades superficiais do gás inerentes ao fenômeno de segregação	152
6.4.2	Comportamento das flutuações de pressão no domínio do tempo para o primeiro ensaio com plástico e vidro grosso e a mistura ( <i>PL-VF</i> )	162
6.5	Análise geral dos sinais de pressão no domínio do tempo	185
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES: ANÁLISES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	190
7.1	Mistura de microesferas de vidro fino e vidro grosso ( <i>VF-VG</i> )	191
7.2	Mistura de microesferas de plástico e vidro grosso ( <i>PL-VG</i> )	210
7.3	Mistura de microesferas de plástico e vidro fino ( <i>PL-VF</i> )	228
7.4	Análise geral dos sinais de pressão no domínio da frequência	252
8	CONCLUSÕES	265
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	272
	APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARTICULADOS UTILIZADOS NA PESQUISA	271
	APÊNDICE B - ANÁLISE DA REPETITIVIDADE DOS RESULTADOS	277
	APÊNDICE C - RESULTADOS DOS TESTES FLUIDODINÂMICOS	309
	APÊNDICE D - CÁLCULO DE VAZÃO POR MEIO DE PLACA DE ORIFÍCIO UTILIZANDO A NORMA ASME MFC-14M-2003	332
	APÊNDICE E - PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	336
	APÊNDICE F - VERIFICAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO	343
	APÊNDICE G -MÉTODO PARA CÁLCULO DE PREPARAÇÃO DAS MISTURAS BINÁRIAS	348

# 1. INTRODUÇÃO

Para conversão de biomassas em energia, o uso de leitos fluidizados destaca-se por suas inúmeras vantagens tais como: transferência de calor elevada, temperaturas uniformes, contato gás-sólido favorável e a possibilidade de utilização de partículas com propriedades bastante variadas (densidade, esfericidade e diâmetro).

A eficiência dos processos que envolvem leitos fluidizados requer uma boa mistura entre os componentes granulares do leito. Porém, muito embora a fluidização contribua para a mistura entre os componentes do leito, a segregação, caracterizada por concentrações heterogêneas das diferentes partículas presentes, é um fenômeno que se apresenta quando existe diferença de tamanho e/ou massa específica entre elas. Destaca-se que, nos sistemas para geração de energia que utilizam misturas binárias compostas por biomassa e material inerte, a mistura efetiva entre esses componentes é desejada. Entretanto, existem processos em que a remoção contínua de um dos componentes da mistura é necessária, sendo que, nesses casos, a segregação é desejável. Logo, em leitos contendo misturas de partículas, a condição operacional na qual ocorre o início do fenômeno de segregação deve ser conhecida. Isso permite que alterações na fluidodinâmica do processo sejam detectadas e, dessa forma, o fenômeno de segregação poderá ser controlado através do aumento da velocidade do gás.

Através de observações experimentais, Rasul *et al.* (1999) mostraram que o fenômeno da segregação ocorre quando a velocidade do gás está na faixa formada entre as velocidades de fluidização inicial e a velocidade de fluidização completa.

Uma maneira de detectar e/ou estudar os fenômenos de mistura e segregação que acontecem em sistemas fluidizados é através da análise das flutuações de pressão em diferentes regiões na coluna contendo o leito (ZHANG *et al.*, 2009). Além disso, a evolução do desvio padrão total das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás pode ser utilizada como método para a determinação das velocidades de transição entre os regimes de fluidização (FELIPE; ROCHA, 2007).

A forma mais comum para o estudo da fluidodinâmica em leito fluidizado é a utilização de séries de tomadas de pressão na parede da coluna de leito. Sendo assim, sinais de flutuações de

pressão são a base de uma técnica que pode ser utilizada para controlar e monitorar a qualidade da fluidização.

A grande vantagem desta técnica é o fato de incluir o efeito de diferentes fenômenos ocorrendo em leitos fluidizados, como a turbulência do escoamento devido à formação de bolhas de gás, o efeito das bolhas que estouram no topo do leito e o efeito da passagem de ar e de bolhas em torno das tomadas de pressão (SCHOUTEN; VAN DEN BLEEK, 1998).

No presente trabalho, foram diagnosticados o comportamento do leito e o fenômeno de segregação utilizando análises de sinais de flutuações de pressão adquiridas no *plenum* e em duas alturas diferentes acima do distribuidor de placa porosa. Estas análises foram feitas tanto no domínio do tempo, através da determinação do desvio padrão, como no domínio da frequência aplicando-se a transformada rápida de Fourier (*FFT*) aos sinais. Dessa forma, foi possível o estudo dinâmico do comportamento do leito fluidizado composto por misturas binárias de diferentes tamanhos e massas específicas. O trabalho apresenta, adicionalmente, a determinação da velocidade inicial de fluidização ( $U_{fi}$ ), velocidade de segregação completa ( $U_s$ ), velocidade de fluidização completa da mistura ( $U_{fc}$ ) e velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ).

O resultado deste estudo pretende contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia apropriada para identificação da faixa de velocidade superficial do gás onde ocorre o fenômeno de segregação em leitos fluidizados contendo misturas binárias.

## **1.1 Justificativas à pesquisa**

O uso de biomassa tem o potencial de atenuar a emissão de gases de efeito estufa e diminuir o volume de resíduos gerados. Pesquisadores do mundo todo verificaram a importância de estudos nesta área, que resultaram no desenvolvimento tecnológico de processos envolvendo a conversão de biomassas para geração de energia, entre as quais se destacam a combustão, a pirólise e a gaseificação. Essas tecnologias requerem, comumente, a utilização de leitos fluidizados em função de suas vantagens em relação à eficiência da mistura entre os componentes do leito e altas taxas de transferência de calor e de massa envolvidas (LECKER; KARLSSON, 1993).

Uma vez que as características das partículas de biomassas (esfericidade, tamanho e massa específica) dificultam, ou impossibilitam, muitas vezes, o estabelecimento do regime de leito fluidizado borbulhante, é comum a adição de um material inerte (usualmente areia), que permite que o processo de fluidização seja estabelecido mais facilmente. A inclusão desse material também melhora a eficiência da transferência de calor e de massa no reator, além de manter o inventário no interior do reator em sistemas onde reações químicas estão envolvidas. No entanto, devido à diferença de tamanho e massa específica entre material inerte e biomassa, é comum ocorrer separação entre os dois componentes da mistura, formando a areia uma camada no fundo e a biomassa uma camada na superfície do leito. Desta forma, é importante estudar o fenômeno da segregação em leitos contendo misturas binárias uma vez que a separação dos componentes da mistura prejudica a eficiência do processo.

A segregação do leito pode ocorrer em leitos fluidizados com misturas de materiais diferentes (misturas binárias ou multicomponentes) e misturas com diferentes tamanhos de partícula do mesmo material (misturas polidispersas). No entanto, o fenômeno pode ser evitado controlando-se as condições operacionais do sistema.

A revisão da literatura mostra que são necessários estudos envolvendo a segregação em leitos fluidizados contendo misturas de partículas, visando o desenvolvimento tecnológico de processos que utilizam diferentes partículas no interior do leito. Pesquisas relacionadas com o tema da segregação são apresentadas no capítulo 2. Portanto, os estudos de sinais de pressão como uma ferramenta de diagnóstico do funcionamento e de identificação do regime de fluidização em leitos fluidizados poderão beneficiar setores industriais envolvidos com a utilização de biomassas para geração de energia.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral da pesquisa é estudar o fenômeno da segregação em leito fluidizado contendo misturas binárias a partir da análise de sinais de flutuações de pressão.

## Objetivos específicos

- Realizar ensaios fluidodinâmicos em sistemas de leito fluidizado com misturas binárias em escala laboratorial, medindo a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) pelo método da análise do desvio padrão das flutuações de pressão para cada mistura binária, e pelo método que utiliza a curva fluidodinâmica da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás.
- Determinar as velocidades intrínsecas a um processo de fluidização de uma mistura binária, sendo estas a velocidade de fluidização inicial ( $U_{fi}$ ) e a velocidade de fluidização completa ( $U_{fc}$ ), através das análises de sinais de flutuações de pressão.
- Determinar a velocidade de segregação completa ( $U_s$ ) para cada mistura binária, medindo a velocidade superficial do gás, adquirindo e analisando sinais de flutuações de pressão.
- Analisar as flutuações de pressão coletadas por transdutores diferenciais de pressão instalados no *plenum* e na parede do leito em diferentes posições longitudinais acima do distribuidor, procurando avaliar os sinais de flutuações de pressão no domínio do tempo e no domínio da frequência em cada posição.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são abordados aspectos da literatura sobre temas de interesse na pesquisa realizada como: fundamentos da fluidização, determinação da velocidade de mínima fluidização, análise dos sinais de flutuações de pressão em leitos fluidizados, e o fenômeno da segregação em leitos fluidizados contendo misturas binárias.

### 2.1 Fenômeno da fluidização

O fenômeno de fluidização envolve o contato entre um leito de partículas sólidas e o escoamento ascendente de um fluido (líquido ou gás), o qual ocorre com velocidade suficiente para que a mistura adquira o comportamento semelhante ao de um fluido. A velocidade do fluido que permite o início da fluidização das partículas é denominada velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ).

Sistemas fluidizados gás-sólido têm como características principais a uniformidade da temperatura e taxas elevadas de transferência de calor e de massa, que ocorrem devido à geração de uma mistura efetiva do material sólido provocada pela presença de bolhas de gás no interior do leito (WU; BAEYENS, 1998). Nesses sistemas, a velocidade do gás é fator determinante para controlar o comportamento do leito e o regime de contato gás-sólido.

Quando se considera o escoamento de uma corrente de gás através de um leito de partículas sólidas depositadas sobre uma placa distribuidora de gás no interior de uma coluna, observa-se que, à medida que a velocidade do fluido aumenta, diferentes regimes de contato fluido-sólido podem ocorrer no interior da coluna conforme é apresentado na Fig. 2.1(a) a (f).

O comportamento fluidodinâmico é diferente para cada regime de contato (leito fixo até transporte pneumático), podendo ser predito através da observação de sinais de pressão fornecidos por sensores instalados na coluna (YATES; SIMONS, 1994).

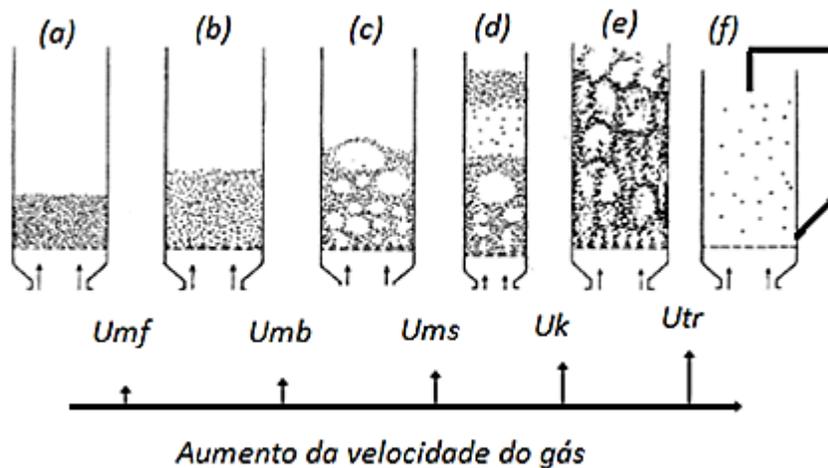


Figura 2.1 - Comportamento de um leito em função da velocidade do gás  
(adaptado de Kunii; Levenspiel, 1991).

O aumento da velocidade do gás provoca o surgimento de diferentes regimes de fluidização (KUNII; LEVENSPIEL, 1991), os quais são descritos a seguir:

**Leito fixo:** nesse regime, o fluido em movimento ascende com vazão de ar baixa, e simplesmente percola o leito através dos espaços vazios entre as partículas estacionárias, Fig. 2.1(a).

**Leito expandido** (início da fluidização homogênea ou particulada): aumentando a velocidade do fluido, as partículas distanciam-se de forma independente por meio de pequenas vibrações alcançando uma condição em que todas as partículas são suspensas pelo escoamento ascendente do gás ou líquido. Nessa condição, a força de atrito entre as partículas e o gás contrabalança o peso aparente das partículas, e a queda de pressão através de qualquer seção do leito iguala-se ao peso da suspensão presente naquela seção. Quando a expansão do leito ocorre, atinge-se a condição de leito fluidizado incipiente. Este ponto indica a transição entre o leito fixo e o leito plenamente fluidizado e a velocidade superficial do fluido em que esse fenômeno ocorre é denominada velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ). A Fig. 2.1(b) mostra o leito expandido uniformemente caracterizando o regime de fluidização homogênea.

**Leito fluidizado borbulhante** (fluidização borbulhante, heterogênea ou agregativa): o aumento da velocidade do gás acima da velocidade de mínimo borbulhamento ( $U_{mb}$ ) produz instabilidades gerando o aparecimento de bolhas e de canais preferências. Nessa condição, a agitação do leito torna-se maior e o movimento das partículas é mais vigoroso. O leito não se expande muito mais do que seu volume na condição de mínima fluidização, sendo esse regime denominado de fluidização agregativa, borbulhante ou heterogênea, Fig. 2.1.(c).

**Leito empistonado:** ocorre normalmente em leitos onde a altura do leito é superior ao dobro do diâmetro da coluna e a velocidade do gás é superior à velocidade de mínimo *slugging* ( $U_{ms}$ ). É caracterizado por bolhas que ocupam mais da metade da seção transversal da coluna. Esse comportamento conduz à formação de bolhas grandes que ascendem no leito com o movimento semelhante ao de um pistão, Fig. 2.1.(d).

**Leito fluidizado turbulento:** esse regime caracteriza-se pelo uso de altas velocidades do gás, que são suficientes para o arraste de boa parte das partículas presentes no leito provocando o desaparecimento da superfície superior do leito. A velocidade de transição para o regime turbulento é denominada  $U_k$ . Nesse regime se observa a ocorrência da movimentação dos aglomerados de partículas intercalados por espaços contendo gás de várias formas e tamanhos, Fig.2.1(e).

**Leito fluidizado rápido:** o aumento da velocidade do gás acima da velocidade de transporte das partículas ( $U_{tr}$ ) leva ao surgimento do regime de fluidização rápida. O arraste de partículas torna-se acentuado exigindo a recirculação do material saindo pelo topo para evitar o esvaziamento do leito. Esses sistemas são denominados leitos fluidizados circulantes, Fig. 2.1(f).

O comportamento fluidodinâmico dos sistemas anteriormente mencionados depende, em grande parte, das propriedades das partículas as quais podem ser classificadas em quatro grupos (A, B, C e D), conforme foi proposto por Geldart (1973).

Sólidos pertencentes ao **grupo A de Geldart** são sólidos de tamanho pequeno variando, em geral, entre 20 e 100  $\mu\text{m}$  e com massa específica reduzida (inferior a  $1400 \text{ kg/m}^3$ ), os quais fluidizam facilmente sendo que, quando isso ocorre, o leito se expande consideravelmente antes

do aparecimento de bolhas. Em velocidades elevadas do gás, as bolhas de gás movimentam-se rápido atravessando a emulsão gás-sólido. Esse grupo é representado pelo catalisador FCC (*Fluid Catalytic Cracking*).

Os Sólidos do **grupo B de Geldart** também fluidizam facilmente, entretanto, o surgimento de bolhas ocorre imediatamente após a velocidade de mínima fluidização, ou seja,  $U_{mb} \cong U_{mf}$  para essas partículas. O tamanho das bolhas aumenta ao longo da altura do leito e com a velocidade do gás. A expansão do leito é pequena. De modo geral, as partículas deste grupo apresentam diâmetro médio na faixa de 40 a 500 $\mu$ m e massa específica entre 1400 e 4000 kg/m<sup>3</sup>. Um sólido típico desse grupo é a areia.

No **grupo C de Geldart** os sólidos são finos, coesivos e difíceis de fluidizar. Os sólidos deste grupo apresentam pequeno tamanho (normalmente menores de 20  $\mu$ m) e, para eles, as forças interpartículas são maiores que as forças exercidas pelo fluido sobre elas. No entanto, a fluidização é possível ou melhorada através da utilização de agitadores mecânicos ou vibradores que evitam a formação de canais preferenciais. A fluidização com este tipo de partículas caracteriza-se por uma intensidade de mistura muito baixa. Como exemplos de materiais sólidos pertencentes a esse grupo são citados a farinha de trigo, o pó facial, o amido e o cimento.

Por último, os sólidos pertencentes ao **grupo D de Geldart** são granulares, possuindo normalmente diâmetro superior a 1 mm. As forças coesivas interpartículas são menores que a força de arraste exercida pelo gás. Grandes bolhas horizontais são observadas próximo ao distribuidor, as quais cruzam o leito como pistões. A fluidização torna-se difícil em leitos profundos. Apresenta pequena expansão do leito e mistura deficiente das partículas. Esse tipo de material apresenta tendência a operar em regime de leito de jorro. Como exemplos são citados os grãos de arroz, ervilha e café.

## 2.2. Flutuações de pressão e a fluidodinâmica de leitos fluidizados

A medição da pressão está presente em praticamente todos os trabalhos mais recentes envolvendo leitos fluidizados. A queda de pressão através de um leito fixo de partículas sólidas é função da velocidade superficial do gás através dele, sendo essa grandeza normalmente utilizada para determinar a velocidade de mínima fluidização das partículas, uma vez que a queda de pressão torna-se praticamente constante (igual ao peso das partículas) quando o regime de leito fluidizado é atingido (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). Também o valor da diferença de pressão entre diferentes locais da coluna contendo o leito fluidizado é usado rotineiramente em unidades industriais para indicar a concentração de partículas ao longo da altura e, assim, controlar a altura do leito de partículas no interior da coluna.

A técnica envolvendo a aquisição e a análise de sinais de flutuação de pressão no interior de leitos fluidizados tem sido frequentemente aplicada para estudar o comportamento de sistemas gás-sólido. Sua grande vantagem reside no fato de incluir os efeitos de diferentes fenômenos dinâmicos que ocorrem no sistema, como a turbulência do escoamento, a formação de bolhas de gás e a passagem e erupção dessas bolhas (SCHOUTEN; VAN DEN BLEEK, 1998). Segundo Clark e Atkinson (1988), a forma mais comum para o estudo da fluidodinâmica do leito fluidizado é a utilização de séries de tomadas de pressão na parede da coluna.

As flutuações de pressão em leitos fluidizados gás-sólido têm sido estudadas, sobretudo, em virtude da facilidade na realização das suas medidas, mesmo em condições industriais desafiadoras. As medições de pressão podem ser usadas para inferir estabilidade e qualidade da fluidização, estrutura do fluxo e transição entre regimes (TRNKA *et al.*, 2000).

Uma das mais recorrentes associações que se faz entre as flutuações de pressão e o comportamento de um leito fluidizado operando a baixas velocidades está relacionada ao movimento das bolhas de gás. A erupção das bolhas na superfície do leito fomenta a formação de ondas de pressão que se propagam através do leito (FAN *et al.*, 1981). Esses autores também sugeriram que a frequência das flutuações de pressão é afetada pelos seguintes fatores: tempo de residência médio das bolhas, pressão média no *plenum*, volume do *plenum*, área da seção transversal da coluna, altura do leito e composição da mistura, indicando que a erupção de bolhas na superfície do leito não é a única fonte de flutuações de pressão.

A geração das flutuações de pressão é devida, principalmente, pela ação das bolhas geradas no leito que passam pela região da tomada de pressão. Ou seja, para uma tomada de pressão instalada na trajetória vertical de passagem de uma bolha, a pressão estática varia desde sua aproximação até sua saída da região da tomada, aumentando e diminuindo a pressão no ponto de instalação, gerando as flutuações (BI, 2007, PUNCOCHAR; DRAHOS, 2005).

O segundo meio de geração de flutuações de pressão em leitos fluidizados ocorre devido às ondas geradas na superfície do leito. Estas ondas ocorrem devido ao movimento gerado pela erupção das bolhas de diferentes tamanhos que alcançam a superfície do leito (BI, 2007).

O terceiro meio de geração de flutuações de pressão é a vibração mecânica das partículas do leito fluidizado (HAO; BI, 2005). A câmara de gás abaixo do distribuidor ou *plenum* pode gerar oscilações no leito devido à compressibilidade do gás na câmara quando a resistência do distribuidor é baixa. Bi (2007) assumiu que os sólidos no leito comportam-se como uma massa oscilante, comprimindo e expandindo o gás no *plenum*.

A técnica baseada na aquisição e análise de sinais de flutuações de pressão representa um método simples de controle e monitoramento da qualidade da fluidização, pois ela é fácil de ser realizada requerendo só um transdutor de pressão conectado por um pequeno tubo à tomada de pressão que usualmente é um furo na parede da coluna (BROWN; BRUE, 2001). Isto devido à contínua variação do estado de fluidização causada pela expansão do leito em função da velocidade do gás. As flutuações de pressão estão associadas a fenômenos complexos e dependem, basicamente, do diâmetro do leito, das propriedades das partículas, do tipo de distribuidor, da localização dos medidores de pressão e altura estática do leito (YATES; SIMONS, 1994; BI, 2007). Kage *et al.* (1993) diagnosticaram o comportamento do leito por meio de análises no espaço da frequência, aplicando-se transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) aos sinais de flutuações de pressão no *plenum* de um leito fluidizado gás-sólido. Também constataram a relação que há entre a frequência de geração de bolhas e a queda de pressão no distribuidor, obtida por meio da análise das flutuações de pressão medidas no *plenum* do leito fluidizado utilizando diferentes diâmetros de abertura no distribuidor de gás.

Johnsson *et al.* (2000) salientaram que uma descrição quantitativa de regimes fluidodinâmicos pode ser obtida a partir da análise de séries temporais das sinais de flutuações de pressão no leito fluidizado. A análise de séries temporais é realizada estudando-se o desvio padrão e variância da amplitude do sinal, ou mesmo no espaço da frequência determinando-se as

frequências das componentes dominantes a partir da transformada rápida de Fourier (*FFT*) e dos espectros dos sinais, ou em espaço-estado (caos), sendo este último usado em análise de séries temporais não lineares.

Felipe (2004) identificou e distinguiu diferentes regimes de fluidização a partir da avaliação das flutuações de pressão no domínio da frequência. O pesquisador 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.

Parise (2008) analisou as flutuações de pressão de um leito fluidizado gás-sólido utilizando a análise espectral junto com a técnica de distribuição exponencial Gaussiana. Ela propôs uma metodologia para detectar a região de mínima fluidização no leito. Utilizando essa metodologia, a pesquisadora encontrou a região onde o leito está tendendo à defluidização e com isso foi possível detectar a mudança de regime de fluidização.

Yang e Leu (2008) estudaram as velocidades de transição desde leitos borbulhantes até turbulentos utilizando análise estatística e a transformada de Gabor (*wavelet*) sobre sinais de flutuações de pressão absolutas. Os experimentos foram realizados em três leitos fluidizados de diferentes diâmetros e altura e nas mesmas condições ambientes, Os autores empregaram diferentes materiais particulados do grupo A e B da classificação Geldart. As flutuações de pressão foram adquiridas em diferentes locais ao longo do leito. Como resultados desse estudo, eles conseguiram prever algumas velocidades de transição entre regimes.

Tannous e Mizonov (2009) estudaram o comportamento fluidodinâmico de misturas binárias compostas por biomassa (casca de arroz) e material inerte (alumina) medindo o desvio padrão dos sinais de flutuações de pressão, a porosidade do leito e a queda de pressão no leito em função da velocidade do gás. O objetivo desse trabalho foi analisar o comportamento fluidodinâmico do leito composto por misturas binárias e definir a velocidades de gás inerentes ao processo de fluidização de misturas binárias.

Lourenço e Tannous (2012), a partir das análises do desvio padrão dos sinais de flutuações de pressão, avaliaram a influência das razões de diâmetro médio de cada componente da mistura binária e da concentração de biomassas agrofloretais no leito sobre o comportamento fluidodinâmico em leito fluidizado gás-sólido. As biomassas analisadas foram cavacos de madeira de eucalipto e caroço de tucumã formando misturas binárias com areia.

Estes trabalhos demonstraram a importância do estudo dos sinais de pressão provenientes do leito para prever a fluidodinâmica do escoamento. Assim como a influência de parâmetros como: diâmetro médio, massa específica, tamanho e forma das partículas, velocidade superficial do gás, geometria do leito, localização das tomadas de pressão e método de medida de pressão sobre as medidas das flutuações.

### 2.3. Técnicas de análises dos sinais de flutuações de pressão em leitos fluidizados.

As técnicas apropriadas para a aquisição e processamento de dados aleatórios são fortemente dependentes do fenômeno físico. Em geral, este processo apresenta alguns passos determinantes apresentados a seguir, sendo o mesmo processo seguido na pesquisa de Cárdenas-Fonseca (2009) e Rueda-Ordoñez (2012).

As etapas de aquisição de dados estão esquematizadas na Fig. 2.2.



Figura 2.2 - Etapas de aquisição e processamento de sinais

A captura de dados é feita pela etapa de medida das flutuações de pressão através de um transdutor. Em termos gerais, mede-se uma grandeza física que, neste caso, é a pressão e a transforma em um sinal elétrico analógico partindo-se do conhecimento da relação entre a quantidade de entrada e de saída, chamada de curva de calibração do transdutor.

A etapa seguinte é a preparação dos dados no que se refere à conversão do sinal analógico para o formato digital (digitalização), este processo consiste em duas operações diferentes: amostragem e quantificação.

A amostragem é o processo de registro de valores discretos a partir de um sinal contínuo (analógico), sendo que, em geral, o intervalo de tempo entre as amostras é constante.

Não obstante, a quantificação é a conversão dos dados do sinal analógico, que possui resolução infinita, para uma informação com resolução finita dependente das características do sistema de aquisição de dados.

Na etapa de amostragem, é necessário levar em conta o teorema de amostragem ou de Nyquist que estabelece que, caso o transdutor seja considerado um sistema linear e invariante no tempo (sistema SLIT), a taxa de amostragem deve ser maior do que duas vezes a componente de frequência mais alta do espectro do sinal analógico.

Portanto, a fim de garantir uma adequada aquisição do sinal, é necessário escolher uma frequência de amostragem que registre o sinal analógico corretamente, já que, se o valor dessa frequência não for superior a duas vezes o valor da frequência da componente de maior do espectro do sinal que se pretende estudar, há uma sobreposição de forma de onda denominada *aliasing*, o que pode acarrear em uma análise equivocada dos resultados no espaço da frequência (PARISE, 2008).

Essa recomendação evita que ocorra perda de informação no processo de amostragem. Se o teorema de amostragem não for atendido e/ou se for escolhida uma frequência de amostragem baixa, haverá a ocorrência do chamado erro de “*aliasing*”.

A etapa de conversão de dados refere-se às operações de pré-análises com o intuito de detectar e eliminar falsos sinais e degraus originados da aquisição do sinal, de problemas como o excesso de ruído e a perda de sinal devido ao mau funcionamento do sensor. Esta etapa é usualmente acompanhada pela apreciação visual do pesquisador antes de sua conversão para o formato digital. A etapa de análise de dados pode ser no domínio da frequência, aplicando a transformada rápida de Fourier (FFT) a cada sinal, e tem como objetivo a obtenção dos espectros e, por conseguinte, as frequências dominantes presentes nas séries temporais.

A análise de flutuações de pressão em leitos fluidizados tem sido uma forma usual de caracterização de regimes fluidodinâmicos (HONG *et al.*, 1990, BAI *et al.*, 1999, TRNKA *et al.*, 2000).

Segundo os estudos feitos por Rueda-Ordóñez (2011) e Cárdenas-Fonseca (2009) o uso da transformada rápida de Fourier (*FFT*) é a ferramenta apropriada para o estudo dos sinais de flutuações de pressão.

A informação obtida pela aplicação da transformada de Fourier é válida no caso de sinais estacionários. No caso das medidas de flutuações de pressão em leitos fluidizados, tal hipótese é verdadeira, visto que a velocidade do fluido é mantida constante durante a obtenção de cada série de tempo (JOHNSSON *et al.*, 2000).

### **2.3.1. Frequência de amostragem e número de pontos de pressão**

Wilkinson (1995) concentrou-se em dois aspectos distintos do método de flutuação de pressão para determinação da  $U_{mf}$ . No primeiro, foi analisado o número mínimo de medições da pressão necessário que permite obter estimativas confiáveis do desvio padrão e foi encontrado que o número de 10.000 medidas. No segundo aspecto, relativo à localização da tomada de pressão, verificou que os sinais de flutuação de pressão no *plenum*, situado abaixo do distribuidor de gás, são adequados para determinação da  $U_{mf}$  e, assim, os problemas de entupimento da tomada de pressão por partículas do leito podem ser evitados.

Na figura 2.3 mostra-se o efeito de aumentar o número de medições sobre os desvios padrão calculado no *plenum* para a pesquisa feita por Wilkinson (1995). O desvio padrão foi normalizado em relação ao desvio padrão máximo de  $N$  (quantidade de número de medições). Concluiu que o resultado de 10.000 medições causou uma variação entre as medições inferior a 2%, o que é muito significativo.

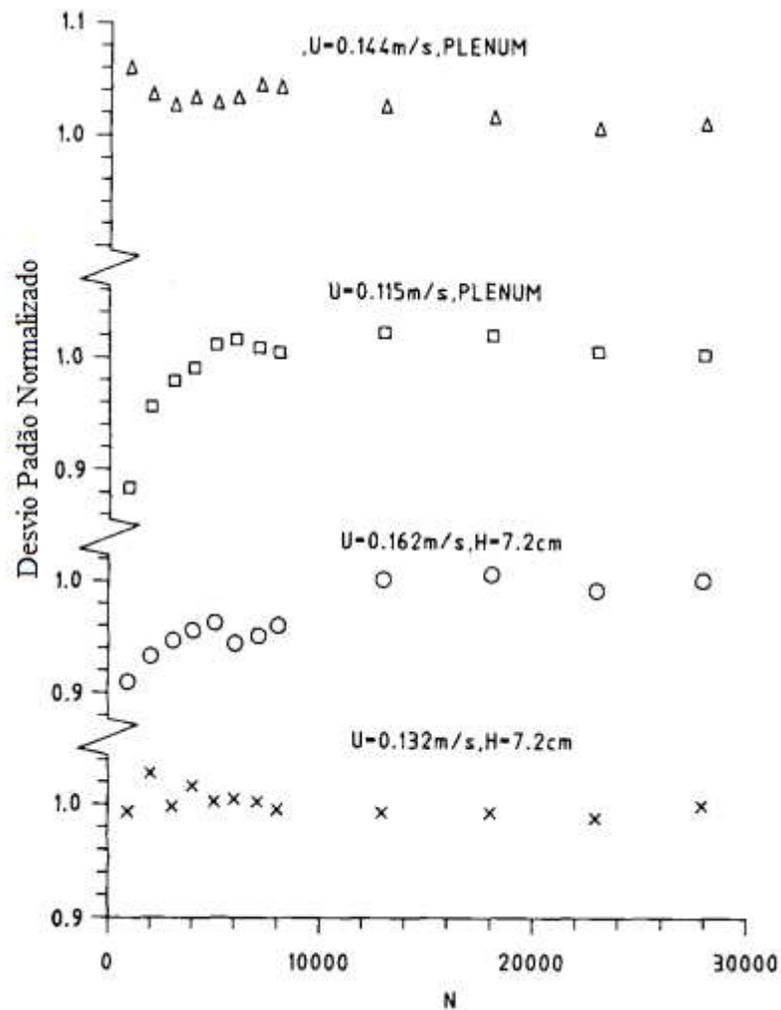


Figura 2.3 – Desvio padrão das flutuações de pressão em função do número de medidas (N) realizado (WILKINSON, 1995)

Segundo Johnson *et al.* (2000) e Sasic *et al.*(2007), para se determinar as frequências dominantes, uma taxa de amostragem de 20 Hz é considerada suficiente. Em leito fluidizado, a frequência máxima do sinal geralmente é inferior a 10 Hz.

As frequências de amostragem comumente utilizadas por diferentes pesquisadores variam na faixa de 10 a 1000 Hz, com tempos de aquisição maiores do que 30 s. Brown e Brue (2001) estudaram os efeitos das frequências de amostragem e tempos de aquisição nas medidas de flutuações de pressão. Encontraram que as frequências dominantes no leito fluidizado são menores do que 10 Hz, concluindo com isto que as frequências de amostragem maiores de 50 Hz (tipicamente empregadas) são suficientemente altas para a obtenção da informação dinâmica

requerida em um leito fluidizado, evitando o chamado erro de “*aliasing*” no sinal. Além disso, o tempo de aquisição deve ser tal que permita adquirir uma quantidade suficiente de informação do leito que permita a caracterização da sua fluidodinâmica.

Em leito fluidizado, a frequência máxima do sinal geralmente é inferior a 10 Hz. Embora uma taxa de amostragem de 20 Hz fosse suficiente (JOHNSSON *et al.*, 2000), os trabalhos encontrados na literatura utilizam uma frequência de amostragem de até 1000 Hz (BRIENS *et al.*, 2003, BAI *et al.*, 2005).

### **2.3.2. Transdutores de pressão**

Trabalhos da literatura que envolveram medidas de flutuações de pressão em leitos fluidizados utilizaram transdutores de pressão com faixa operacional em frequências de até 1000 Hz, possuindo tempo de resposta mínimo de aproximadamente 1 ms (JOHNSSON *et al.* 2000, CHEN; BI, 2003, BAI *et al.*, 2005).

Parise (2008) comparou os sinais de pressão provenientes de dois transdutores de pressão com tempo de resposta significativamente diferentes, com o objetivo de verificar a validade de utilização de um transdutor da marca Cole Parmer 68014-18 com faixa de 0 a 6221 Pa, sinal de saída de 4 a 20 mA e tempo de resposta de 250 ms, em seus ensaios de flutuação de pressão. Tal verificação foi realizada utilizando 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. Nas verificações feitas pela pesquisadora, não se observou uma variação significativa entre os dois transdutores de pressão sendo utilizado o transdutor da Cole Parmer no desenvolvimento de seu trabalho.

Cárdenas-Fonceca (2009) empregou o transdutor Smar LD301-D2 para medir as flutuações de pressão no *plenum*, o qual possuía uma faixa de medição de 0 a 50 kPa. Para a utilização deste transdutor, ele utilizou uma mangueira para conectar a tomada de pressão com o transdutor, além de filtros de tela fina, para evitar entupimentos da tomada de pressão. O transdutor, com sinal de saída em corrente de 4 a 20 mA, teve seu sinal convertido a voltagem e estava conectado ao sistema de aquisição de dados. Em seu trabalho, a velocidade de mínima fluidização para a areia foi determinada pelo método de análises de flutuações de pressão.

Rueda-Ordóñez (2012) analisou as características dinâmicas do sensor SMAR LD301 – D2. O autor realizou análises do desempenho deste transmissor de pressão diferencial em um tubo de rarefação comparando seu desempenho dinâmico com o transdutor de pressão piezo-resistivo marca ENTRAN modelo EPB – C1 para medição de pressão relativa, com faixa de medição de 0 a 34 kPa (0 a 5 psi), que possui frequência de ressonância fundamental igual a 55 kHz e o tempo de resposta é de 1 milissegundo. A partir da análise dos desempenhos dos dois modelos diferentes de transdutores, ele concluiu que o transdutor SMAR pode ser utilizado para medir flutuações de pressão de até 14 Hz com faixa de desvio de  $\pm 2\%$  da função resposta na frequência (FRF). Na pesquisa, o autor analisou o tempo de resposta destes medidores, determinado através de análise dos sinais no tempo, quando se constatou um valor ao redor de 0,15 s. Além disso, a frequência das flutuações de pressão foram superiores a 10 Hz, que é um valor máximo normalmente encontrado em sistemas fluidizados gás-sólido. O autor concluiu ser confiável a utilização desse sensor para medidas e análise de flutuações de pressão em tais sistemas. Adicionalmente, o trabalho apresenta a avaliação da influência do comprimento da mangueira da tomada de pressão sobre o sinal detectado. Foram estudados três comprimentos das mangueiras (0,1, 2 e 4 m). Os resultados mostraram que a mangueira de 0,1 m de comprimento afetou o sinal apenas para componentes de frequência acima de 18 Hz para faixa de desvio de  $\pm 2\%$  da FRF. Esse limite de frequência foi reduzido com o aumento do comprimento da mangueira, caindo para 4 Hz (mangueira de 2m) e 3 Hz (mangueira de 4m). Entretanto, segundo o autor, comprimentos menores de mangueira poderão diminuir as faixas de desvio da FRF, enquanto que comprimentos maiores poderão aumentar.

### 2.3.3. Análise de sinais no domínio do tempo

Fenômenos físicos da engenharia são, muitas vezes, analisados em termos da amplitude do sinal em função do tempo, sendo que, neste caso, este se apresenta como um registro do comportamento do fenômeno ao longo do tempo. A amplitude instantânea de um sinal pode representar alguma quantidade física como, por exemplo: deslocamento, velocidade aceleração, pressão, ângulo, entre outras. De forma similar, a escala do tempo de registro pode representar diferentes variáveis independentes apropriadas, como o tempo relativo, localização espacial, posição angular, etc. (BENDAT; PIERSOL, 1980).

A avaliação do comportamento das flutuações de pressão ao longo do tempo antes de se partir para um tratamento matemático mais elaborado permite, antes de tudo, uma avaliação preliminar sobre a qualidade da fluidização, mesmo que isto se dê, ainda, de forma um tanto subjetiva (JOHNSSON *et al.*, 2000).

M'chirgui *et al.* (1997) relacionaram as diferenças observadas nas séries de flutuações de pressão ao longo do tempo em diferentes e bem definidas condições de operação do leito (leito fixo, leito borbulhante, início de *slugging* e *slugging* estável) longe da transição entre os regimes. O trabalho expõe, de forma elucidativa, a associação entre a descrição do regime e o comportamento do sinal de pressão no tempo. Eles verificaram fenômenos como: a formação, a coalescência e a variação do tamanho das bolhas de fluido, as diferentes formas como as bolhas emergem da superfície do leito, as diferentes quantidades de sólidos lançados pelas bolhas e que permaneciam em suspensão acima da superfície do leito, a expansão do leito e início de arraste de partículas. Como consequência de todos esses fenômenos no interior da coluna, o resultado foi uma série temporal com características dinâmicas, cujos fenômenos associados foram identificados e discutidos por Bendat e Piersol (1980). Estes fenômenos dependem da velocidade superficial ( $U_o$ ) do gás. M'chirgui *et al.* (1997), perceberam diferenças marcantes na dinâmica de cada regime de contato gás-sólido, as quais marcaram a representação de flutuações de pressão em função do tempo como observado na Fig. 2.4.

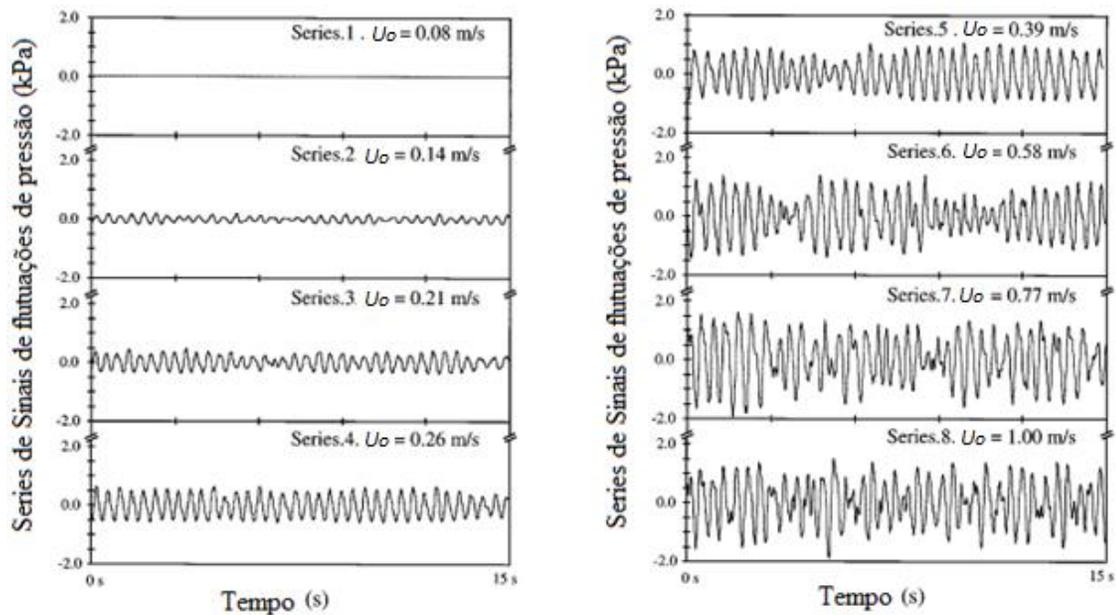


Figura 2.4 – Sinais de pressão (M'CHIRGUI *et al.*, 1997)

Segundo Roy *et al.* (1990), as flutuações de pressão em leitos fluidizados são causadas principalmente pela formação de bolhas de fluido, e em menor escala pela oscilação dos sólidos, sendo que esta última aparece quando há ausência de bolhas.

#### 2.3.4. Análise de sinais no domínio da frequência

A análise no domínio da frequência é uma ferramenta muito utilizada para caracterizar o conteúdo de frequência de um sinal. Como já comentado anteriormente, é realizada a partir da transformada discreta de Fourier, a qual permite transpor um sinal discreto no domínio do tempo para uma representação discreta no domínio da frequência.

Esta análise é uma ferramenta utilizada para o estudo de sinais de pressão provenientes de leitos fluidizados. A análise espectral de Fourier tem como objetivo determinar as frequências e as amplitudes das componentes dominantes presentes em séries de tempo. Para determinados fenômenos físicos, ela tem sido utilizada para avaliar leitos fluidizados em escala laboratorial

para a comparação espectral de modelos desenvolvidos para escala industrial (NICASTRO; GLICKSMAN, 1984).

Na prática, é utilizado o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier ou em inglês “*Fast Fourier Transform*” (*FFT*). Este algoritmo é a versão rápida da transformada discreta de Fourier e permite encontrar a transformada discreta de Fourier (*DTF*) com menor esforço computacional. A Fig. 2.5 esquematiza este processo sendo apresentado o sinal de pressão e o espectro de amplitudes do sinal de pressão.



Figura 2.5 - Esquema representativo da transformada discreta de Fourier

- **Transformada de Fourier de sinais contínuos no tempo**

A transformada de Fourier tem sido aplicada em diversas áreas como Engenharia, Física, Oceanografia, Acústica. Ela é uma importante ferramenta matemática que relaciona a variável tempo, espaço ou modelo de um sinal com a variável frequência associada ao mesmo. Ela permite identificar ou distinguir as diferentes componentes de frequência senoidal (ou cosenoidal) e suas respectivas amplitudes (ou potências), que se combinam para gerar uma forma de onda arbitrária (BRIGHAM, 1988).

A qualidade da análise pela transformada de Fourier de um sinal dependerá de sua natureza (se permanente ou transiente durante o processo de amostragem), (KURKA, 2004). Matematicamente e para sinais contínuos, a transformada de Fourier é dada por:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j.2\pi.f.t} dt \quad -\infty < f < \infty \quad (2.1)$$

Onde:

$X(f)$  é denominada transformada rápida de Fourier direta (ou espectro) de  $X(t)$ , e a condição para sua existência é que o sinal seja um sinal de energia ou:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (2.2)$$

No caso de sinais discretos, a análise pela transformada de Fourier dependerá também da qualidade da amostragem em si, ou seja, número de amostras tomadas,  $N$ , e da taxa de amostragem,  $f_s$ , como discutido no item logo à frente.

- **Transformada discreta de Fourier de sinais discretos no tempo**

Não se pode medir  $x(t)$  no intervalo de  $-\infty$  a  $+\infty$  conforme a Eq. 2.1, já que os sinais tratados provêm da observação de fenômenos físicos, os quais terão um início e um término dentro de limites finitos no tempo. Com isso, adota-se a hipótese de que o sinal é periódico e com período  $T$  igual ao intervalo de tempo em que  $x(t)$  foi observado. Esta é uma hipótese razoável desde que, ao longo de  $T$  suficientemente longo, todas as principais características do sinal estejam presentes. Desta forma, determina-se uma estimativa de  $X(f)$  através da transformada de Fourier finita, dada por:

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j.2\pi.f.t} dt \quad (2.3)$$

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

$$X(k, N) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-\frac{j.2\pi.n.k}{N}} \quad (2.4)$$

Onde:

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

$N$  é o número total de amostras;

$k$  é o índice da  $k$ -ésima componente de frequência separadas por  $f_s/N$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ .

Os chamados espectros, que podem ser de amplitude ou de potência, permitem gerar gráficos da distribuição espectral do sinal. No caso da amplitude, eles são determinados a partir do cálculo do módulo da transformada discreta de Fourier (DFT) dada por  $X(k, N)$ , sendo que seu cálculo é mais eficientemente se for realizado utilizando um algoritmo conhecido como Transformada Rápida de Fourier (FFT). Com este algoritmo, é possível calcular a DFT com  $N \log_2(N)$  multiplicações complexas. 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,

M'chirgui *et al.* (1997) utilizaram as análises no domínio da frequência de sinais de flutuações de pressão correspondentes a diferentes velocidades do gás, onde identificaram a componente da frequência dominante e sua relação com o processo de fluidização do leito.

Na figura 2.6, são apresentados os espectros (espectros de potência) analisados por M'chirgui *et al.* (1997) para diferentes condições operacionais do leito: espectro 1 - leito fixo com leve vibração das partículas; espectro 2 - leito borbulhante; espectro 3 - início do leito empistonado; espectro 4 - leito empistonado estável; espectro 5 - leito empistonado com pequenas flutuações ocasionais; espectro 6 - leito empistonado com múltiplas flutuações pequenas; espectro 7 - leito empistonado com frequentes pequenas flutuações; espectro 8 - regime turbulento.

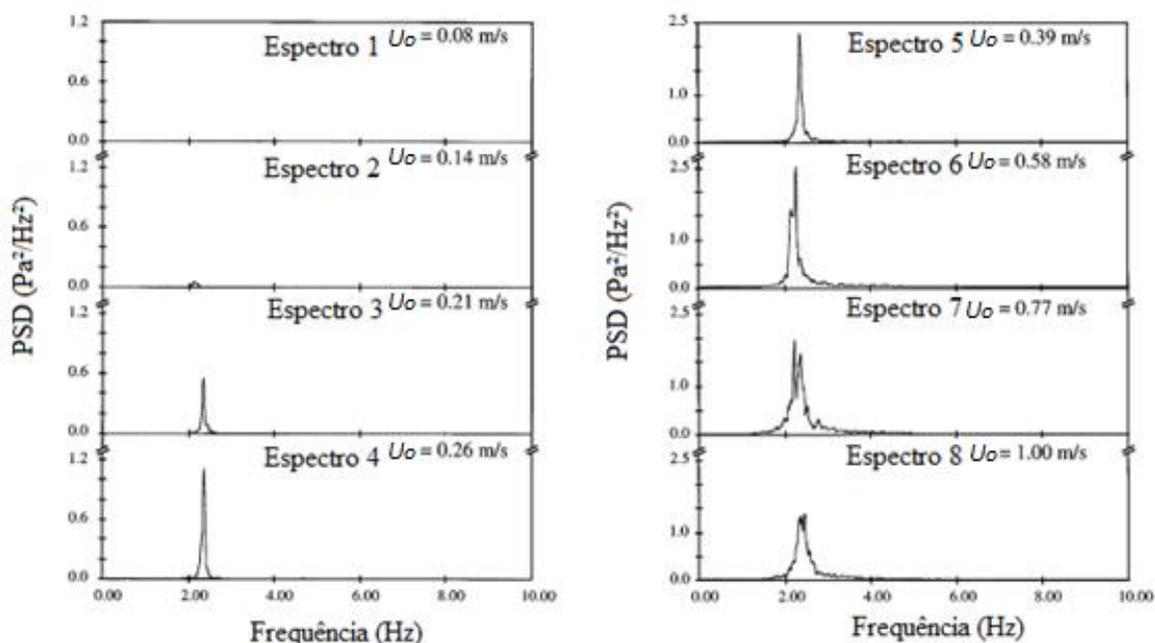


Figura 2.6 - Espectros de potência dos sinais de pressão (M'CHIRGUI *et al.*, 1997)

Os processos baseados em leitos fluidizados geram sinais de pressão que apresentam diferentes espalhamentos na sua distribuição espectral. Estes sinais são uma consequência da presença de forças dinâmicas na interface partícula-fluxo de ar. Esta interação dinâmica ocorre em baixas frequências e depende da velocidade do fluido e das características físicas das partículas que estão sendo fluidizadas. Segundo Parise (2007), exceto em regime de fluidização do tipo *slugging*, em geral não é observada a presença de um único pico de frequência dominante em processos que envolvem leitos fluidizados. Desta forma, segundo a autora, a observação individual de frequências tem pouca utilidade na análise da fluidodinâmica do processo.

A distribuição espectral de pressão ou de amplitude, entretanto, carrega consigo informações sobre o processo de fluidização. Em regime de leito fixo, há uma distribuição de amplitude ou de energia sem uma frequência dominante (BENDAT; PIERSOL, 1980). Já no caso de leito fluidizado, há a 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.

É muito pequeno o número de trabalhos encontrados na literatura envolvendo a análise de sinais de frequência em leitos fluidizados contendo misturas de partículas, sendo este um dos objetivos específicos desta pesquisa.

## **2.4. Determinação da velocidade de mínima fluidização**

A velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) é um parâmetro importante no projeto de sistemas fluidizados, pois é a velocidade superficial do gás [ $U_o = (\text{vazão de gás})/(\text{área transversal da coluna})$ ] no início do processo de fluidização.

Nos itens a seguir discute-se sobre dois métodos utilizados para determinação da velocidade mínima de fluidização: o método da curva fluidodinâmica e o método das medidas de flutuação de pressão.

### **2.4.1 Método da curva fluidodinâmica**

O método tradicionalmente utilizado para a determinação experimental da velocidade de mínima fluidização está baseado na análise da curva fluidodinâmica representada na Fig. 2.7. A figura apresenta a variação da queda de pressão através do leito de partículas ( $\Delta P_L$ ) em função da velocidade superficial do gás. O aumento da velocidade do gás provoca a expansão do leito fixo e, conseqüentemente, o aumento da porosidade do leito de  $\varepsilon_m$  (porosidade do leito fixo empacotado livremente) para  $\varepsilon_{mf}$  (porosidade do leito na condição de mínima fluidização). Essa expansão provoca uma redução na queda de pressão para o valor correspondente ao peso das partículas, mantendo-se constante até que algum arraste de partículas seja observado ou até que o atrito gerado pelo escoamento do gás seja considerável (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

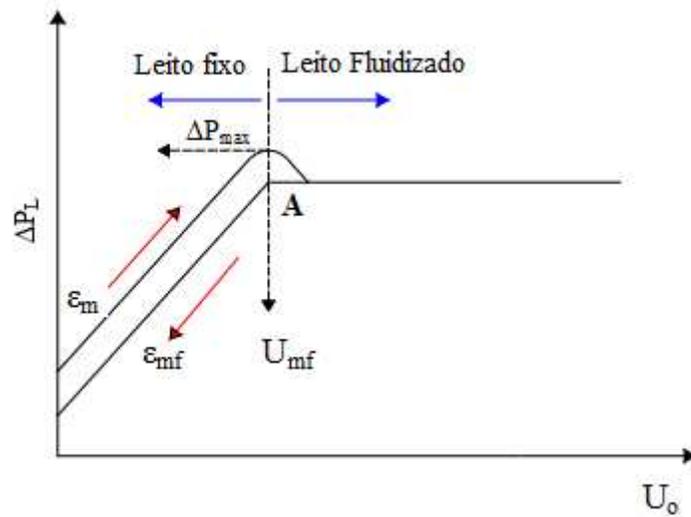


Figura 2.7 – Curva típica de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás para um material homogêneo (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Quando a velocidade do gás iguala-se à velocidade de mínima fluidização a queda de pressão através do leito multiplicada pela área da seção transversal iguala-se ao peso da suspensão por unidade de área da seção transversal do leito. Assim:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Queda de} \\ \text{pressão através} \\ \text{do leito} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Área da} \\ \text{Seção} \\ \text{Transversal} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Volume} \\ \text{do} \\ \text{leito} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Fração} \\ \text{de Sólidos} \\ \text{no leito} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Peso} \\ \text{Específico} \\ \text{do Sólido} \end{array} \right)$$

A forma de estimar-se a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) parte do fato que, na condição de mínima fluidização (ponto A na Fig. 2.7), o leito encontra-se na transição entre o regime de leito fixo e o regime de leito fluidizado, possibilitando, assim, a igualdade das equações que representam estes dois estados. A equação de Ergun (1952) é a correlação empírica mais amplamente usada para descrever a queda de pressão através de um leito fixo.

$$\frac{\Delta P_L}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_o}{(\phi d_p)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U_o^2}{\phi d_p} \quad (2.5)$$

Onde  $\phi$  é a esfericidade da partícula,  $d_p$  é o diâmetro médio de Sauter das partículas,  $L$  é a altura do leito,  $\varepsilon$  é a porosidade do leito fixo,  $\phi$  é a esfericidade das partículas e  $U_o$  é a velocidade superficial do gás.

A equação de Ergun pode ser combinada com a que representa o equilíbrio da queda de pressão do leito e o peso das partículas  $W$  em uma dada seção transversal.

$$\frac{\Delta P_L}{L} = W = (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.6)$$

Onde  $\rho_s$  e  $\rho_g$  são as densidades absolutas das partículas e do gás, e  $g$  é a aceleração da gravidade.

Na condição de mínima fluidização obtém-se a Eq. 2.7 pela combinação das Eqs. 2.5 e 2.6.

$$(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_o}{(\phi d_p)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho U_o^2}{\phi d_p} \quad (2.7)$$

Logo, rearranjando a Eq.2.7 para a condição quando  $U_o = U_{mf}$ :

$$\underbrace{\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2}_{k_1} + \underbrace{\frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2}}_{k_2} \underbrace{\left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)}_{Re_{p,mf}} = \underbrace{\frac{d_p^3 \rho (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2}}_{Ar} \quad (2.8)$$

$Re_{p,mf}$  é o número de Reynolds da partícula calculado com a velocidade de mínima fluidização como mostra a Eq. 2.9.

$$Re_{p,mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \quad (2.9)$$

$Ar$  é o numero de Arquimedes, dado pela Eq. 2.10:

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad (2.10)$$

Assim a equação 2.8 pode ser escrita como:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{p,mf}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi^2} Re_{p,mf} = Ar \quad (2.11)$$

Quando  $\varepsilon_{mf}$  e/ou  $\varphi$  não são conhecidas, é possível estimar a velocidade de mínima fluidização de um leito fluidizado utilizando as constantes  $k_1$  e  $k_2$  obtidos à partir de aproximações baseadas em resultados empíricos.

$$k_1 Re_{p,mf}^2 + k_2 Re_{p,mf} = Ar \quad (2.12)$$

Onde:

$$k_1 = \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi} \quad (2.13)$$

$$k_2 = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi^2} \quad (2.14)$$

A resolução da Eq. 2.12, leva à Eq. 2.15, conforme apresentado em Kunii e Levenspiel (1991) e Yang (2003).

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad (2.15)$$

A tabela 2.1, apresentada em Yang (2003), lista valores de  $C_1$  e  $C_2$  obtidos empiricamente por diversos pesquisadores. Destaca-se que as correlações são válidas nas condições operacionais nas quais foram obtidas.

Tabela 2.1 - Coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  para o cálculo da  $U_{mf}$  através da Eq.2.15 (YANG, 2003).

Referência	$C_1$	$C_2$
Wen e Yu (1966)	33,7	0,0408
Richardson (1971)	25,7	0,0365
Saxena e Vogel (1977)	25,3	0,0571
Babu et al. (1978)	25,25	0,0651
Grace (1982)	27,2	0,0408
Chitester et al. (1984)	28,7	0,0494

A correlação de Wen e Yu (1966) foi obtida para uma grande variedade de materiais sólidos e tamanhos de partículas, no entanto, segundo Yang (2003) pode apresentar desvios de até 34% em relação ao valor experimental.

A correlação de Saxena e Vogel (1977) foi obtida para calcário sob altas pressão e temperatura. Babu *et al.* (1978) realizaram experimentos utilizando carvão como material sólido enquanto Grace (1982) trabalhou com partículas finas e Chitester *et al.* (1984) obtiveram sua correlação a partir de experimentos com materiais grossos sob alta pressão.

Na maioria dos estudos envolvendo leitos fluidizados, a velocidade de mínima fluidização é determinada experimentalmente através do levantamento da curva fluidodinâmica mostrada na Fig. 2.7, esse método permite encontrar a velocidade de mínima fluidização através da medida da queda de pressão no leito. Para este método, é aconselhável, primeiramente, fluidizar o leito de partículas e em seguida diminuir a velocidade superficial do gás até chegar à condição de leito fixo, determinando a queda de pressão ao longo do processo. A intersecção das retas obtidas para o regime de leito fixo com a reta traçada pelo ajuste dos pontos obtidos na região de leito fluidizado permite a obtenção de  $U_{mf}$ , conforme mostrado na Fig. 2.2 (ponto A).

A velocidade de mínima fluidização tem sido determinada através da análise das flutuações de pressão no leito. Esse método é comentado a seguir.

## 2.4.2 Método de medidas de flutuações de pressão

Puncochar *et al.* (1985) verificaram que o desvio padrão das flutuações de pressão é uma função linear da velocidade superficial do gás. Além disso, verificaram que a  $U_{mf}$  poderia ser obtida a partir da determinação da velocidade onde o desvio padrão das flutuações atingisse um valor nulo.

Para Hong *et al.* (1990), a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) é o parâmetro mais importante em um leito fluidizado podendo ser determinado a partir da relação entre a queda de pressão no leito e a velocidade superficial do gás. Entretanto, eles consideraram que é difícil a obtenção de um valor exato para  $U_{mf}$  utilizando esse método, além de não ser possível sua utilização direta em um leito fluidizado industrial. Os pesquisadores estudaram os efeitos da localização das tomadas de pressão para a medida das flutuações de pressão e trabalharam utilizando o método proposto por Puncochar *et al.* (1985) para a determinação da velocidade de mínima fluidização para vários tamanhos de partículas e de leitos fluidizados. Os autores concluíram que a localização das tomadas de pressão em posições acima do distribuidor de gás é um fator importante na determinação dessa velocidade. Recomendaram que a posição da tomada não devesse estar próxima ao distribuidor.

Em processos com leitos fluidizado envolvendo operação prolongada, é recomendável que a aquisição das flutuações de pressão seja realizada no plenum, pois neste local não se temo problema de entupimento da tomada de pressão, assim como não haverá erosão do transdutor por conta das partículas do leito (WILKINSON; 1995).

A metodologia desenvolvida por Puncochar *et al.* (1985) permite a avaliação da velocidade de mínima fluidização, cujo símbolo, neste trabalho, é indicado por  $U_{mf,\sigma}$  uma vez que é obtido a partir dos desvios padrão das flutuações de pressão no leito.

O método estabelece que o desvio padrão das flutuações de pressão ( $\sigma P$ ) é praticamente uma função linear da velocidade do gás ( $U_o$ ), conforme a Eq. 2.16.

$$\sigma P = A + BU_o \quad (2.16)$$

Os parâmetros A e B são obtidos por regressão linear. A velocidade de mínima fluidização é obtida quando  $\sigma P = 0$ , caracterizando o regime de leito fixo. Dessa forma, a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf,\sigma}$ ) pode ser obtida através da Eq. 2.17.

$$U_{mf,\sigma} = -\frac{A}{B} \quad (2.17)$$

Os autores recomendaram usar esse método para uma faixa de velocidade superficial do gás inferior a 2,5 vezes a velocidade de mínima fluidização e número de Reynolds da partícula ( $Re_p$ ) inferior a 30. A definição de  $Re_p$  é apresentada na Eq. 2.18.

$$Re_p = \frac{\rho_g U_o d_p}{\mu} \quad (2.18)$$

A figura 2.8 mostra a determinação de  $U_{mf,\sigma}$  através da aplicação da metodologia desenvolvida por Puncochar *et al.* (1985).

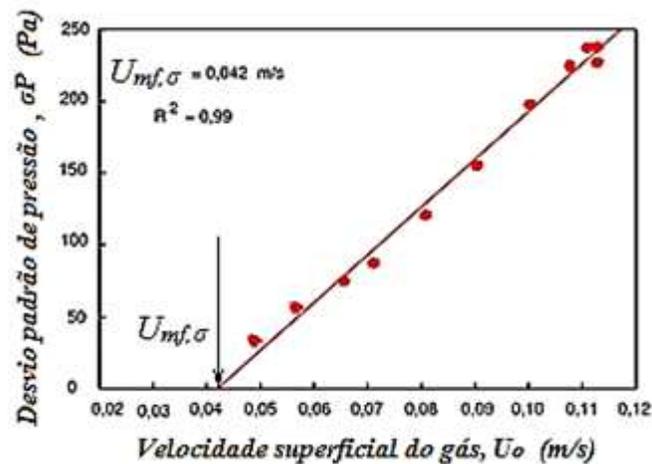


Figura 2.8 - Determinação de  $U_{mf,\sigma}$  através do método de Puncochar *et al.* (1985)

## 2.5. Leitos fluidizados contendo misturas

O fenômeno de fluidização envolvendo misturas binárias de partículas sólidas com diferença de tamanho e/ou de massa específica, foi estudado por diversos pesquisadores como Chen e Keairns (1975) e Formisani *et al.* (2001, 2008). Os autores mostraram a importância da definição da velocidade de mínima fluidização da mistura, com o objetivo de evitar conclusões errôneas sobre a influência das diversas variáveis que atuam sobre o comportamento do sistema. Os resultados obtidos por estes pesquisadores mostraram a existência de um intervalo entre a velocidade de início da fluidização ( $U_{fi}$ ) e a velocidade de fluidização completa da mistura ( $U_{fc}$ ). Em leitos de mistura contendo dois componentes, estas velocidades foram definidas por Chen e Keairns (1975) como será discutido a seguir.

A velocidade em que as partículas finas ou leves fluidizam foi definida como a velocidade do início da fluidização ( $U_{fi}$ ). Em velocidades do gás inferiores a  $U_{fi}$  a mistura encontra-se no regime de leito fixo.

A velocidade em que todas as partículas da mistura estão fluidizadas foi definida como a velocidade de fluidização completa ou total da mistura ( $U_{fc}$ ), a partir da qual os componentes encontram-se misturados e o fenômeno da segregação não está presente.

A maioria dos autores concorda em atribuir a ocorrência da estratificação de partículas durante a fluidização de um sistema binário à ação das bolhas que começam a fluir através do leito. Esta interpretação foi proposta, primeiramente, por Gibilaro e Rowe (1974) os quais salientaram que o material com tendência a flutuar no leito, chamado de “flotsam”, é arrastado pelas bolhas e acumula-se no topo do leito, enquanto o outro sólido, chamado de “jetsam”, tende a ir para o fundo do leito.

A revisão da literatura mostra que a ação das bolhas sobre o equilíbrio mistura-segregação ainda não está clara, e que mais de um pesquisador procurou relacionar o fenômeno da segregação com a intensidade de borbulhamento, medida pelo excesso de velocidade em relação à velocidade de mínima fluidização ( $U_o - U_{mf}$ ). Esse parâmetro é proporcional à vazão de bolhas visíveis no processo de fluidização de um único material sólido homogêneo (FORMISANI *et al.*, 2008).

Os estudos de segregação de partículas são realizados na faixa de velocidade do gás entre os regimes de leito fixo e o início do regime de leito turbulento (FORMISANI *et al.*, 2001). Os pesquisadores observaram que o fenômeno de segregação das partículas ocorre entre as velocidades  $U_{fi}$  e  $U_{fc}$ . Nesta faixa de velocidades, a mistura encontra-se parcialmente fluidizada, entretanto, o material mais leve ou de menor diâmetro, chamado de *flotsam*, consegue atingir o regime borbulhante, enquanto que o material com maior diâmetro ou maior massa específica, chamado de *jetsam*, apresenta uma fluidização incompleta. A Fig. 2.9 mostra a curva fluidodinâmica de um leito contendo mistura binária com a indicação da região onde o leito está parcialmente fluidizado.

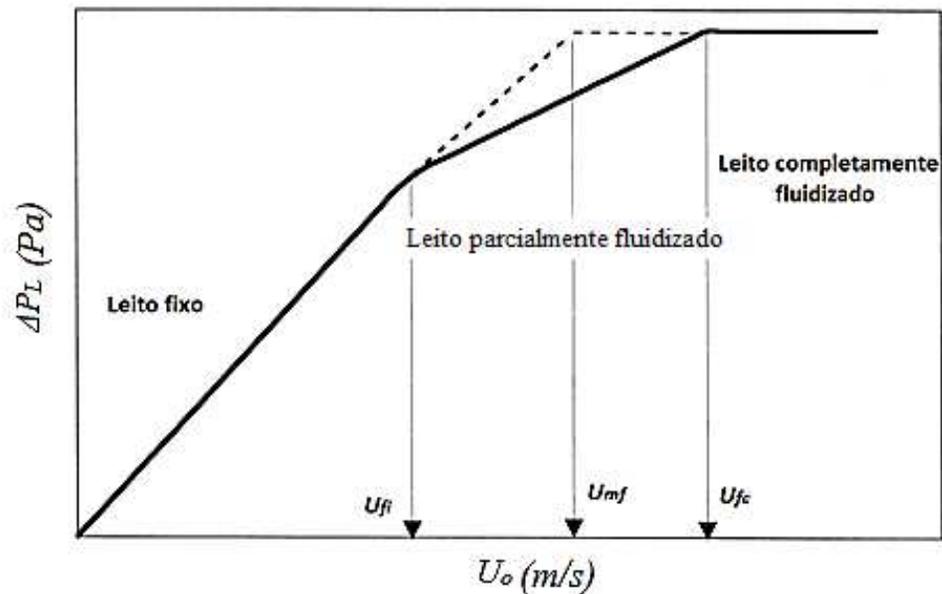


Figura 2.9 - Curva da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás para uma mistura binária e os diferentes estados de fluidização (GAUTHIER *et al.*, 1999).

A região com velocidade superior à velocidade de fluidização completa ( $U_{fc}$ ) é chamada de região de mistura completa, como é mostrado nas Figs. 2.9 e 2.10, onde os materiais estão sob o regime borbulhante e completamente misturados.

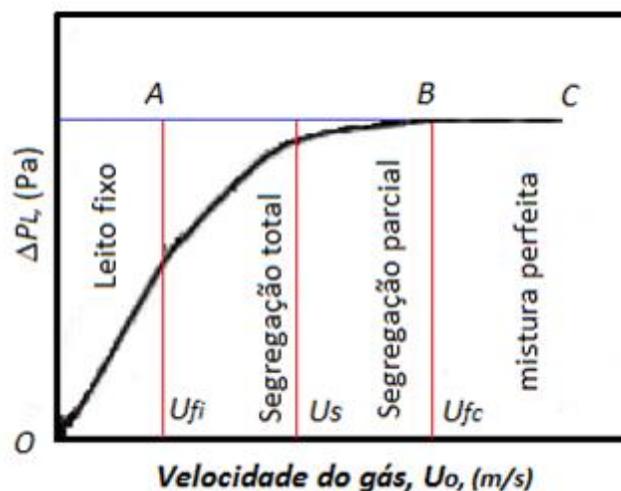


Figura 2.10 - Evolução da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás para uma mistura binária (GAROFANO; TRAZZI; TANNOUS, 2009).

Partindo-se de uma velocidade superficial do gás dentro da região de mistura completa, o ponto B, mostrado na Fig. 2.10, corresponde à chamada velocidade de fluidização completa e marca o limite entre as regiões de segregação parcial e de mistura completa.

Tannous, Hemati e Laguerie (1998) estudaram a fluidodinâmica de leitos contendo misturas polidispersas e, além das velocidades  $U_{fi}$  e  $U_{fc}$  mencionadas anteriormente, identificaram a velocidade em que surge uma zona parcialmente fluidizada no fundo do leito, composta pelas maiores partículas da mistura. Essa velocidade foi denominada velocidade de segregação ( $U_s$ ). A velocidade  $U_s$  delimita as regiões de segregação completa e de segregação parcial.

Outro trabalho envolvendo o estudo de misturas binárias de biomassa-areia foi realizado por Lourenço e Tannous (2012). Neste trabalho  $U_s$  corresponde à velocidade em que a areia concentra-se no fundo do leito enquanto a biomassa, em constante movimento, concentra-se no topo do leito.

Tanto em leitos fluidizados contendo apenas um material uniforme quanto em leitos contendo misturas binárias, quando a velocidade do gás excede a velocidade de mínimo borbulhamento, observa-se a presença de bolhas. O comportamento das bolhas tende a produzir campos de pressão local com propagação de ondas de pressão. Portanto, no caso em que os sinais de flutuações de pressão são adotados para o estudo das características fluidodinâmicas do leito, pode-se obter através da análise destes sinais, uma descrição quantitativa do regime do

escoamento (ZHANG, 2009). A evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás pode auxiliar na determinação das velocidades inerentes ao processo de fluidização de um sistema de leito composto por misturas binárias. Os trabalhos de Tannous, Ramos e Donida (2005); Tannous e Mizonov (2009); Garofano, Trazzi e Tannous (2009) e Lourenço e Tannous (2012) utilizaram a técnica da medida do desvio padrão das flutuações de pressão para identificar  $U_{fi}$ ,  $U_s$  e  $U_{fc}$  em misturas polidispersas e em misturas binárias. A Fig. 2.11 mostra a identificação dessas velocidades na curva de  $\sigma_P$  versus  $U_o$  onde  $U_s$  foi identificada pela variação brusca da inclinação da reta ajustada aos pontos experimentais.

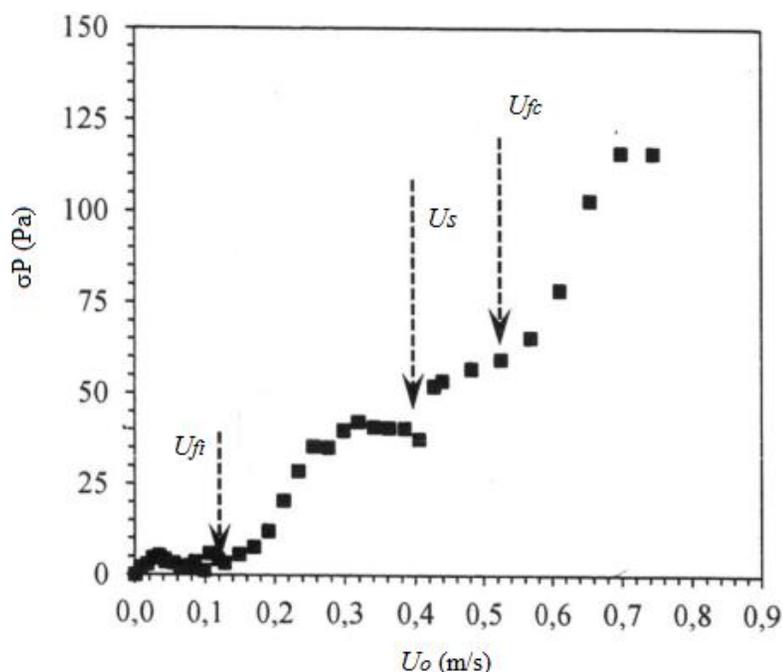


Figura 2.11 - Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás para misturas binárias contendo biomassa agroflorestais (LOURENÇO; TANNOUS, 2012).

Estudos realizados por Formisani *et al.* (2001) e Formisani *et al.* (2008) salientaram que a variabilidade de  $U_{mf}$  reflete o padrão de segregação e mistura que acompanha o processo de fluidização do leito. Assim, espera-se que variáveis que afetam a dinâmica da segregação e

mistura de um leito sejam as mesmas que afetem a velocidade de mínima fluidização. Para verificar esta observação, curvas fluidodinâmicas foram obtidas em leitos submetidos à segregação ou pela diferença de densidade ou pela diferença de tamanho das partículas. A Fig. 2.12 mostra a queda de pressão ( $\Delta P_L$ ) em função da velocidade superficial  $U_o$  obtidas para leitos que estavam inicialmente bem misturados [Fig. 2.12 (a)] e para leitos onde os componentes estavam inicialmente segregados [Fig. 2.12 (b)]. A análise foi feita por Formisani *et al.* (2008) com o objetivo de verificar a influência do estado inicial da mistura sobre a curva fluidodinâmica obtida experimentalmente .

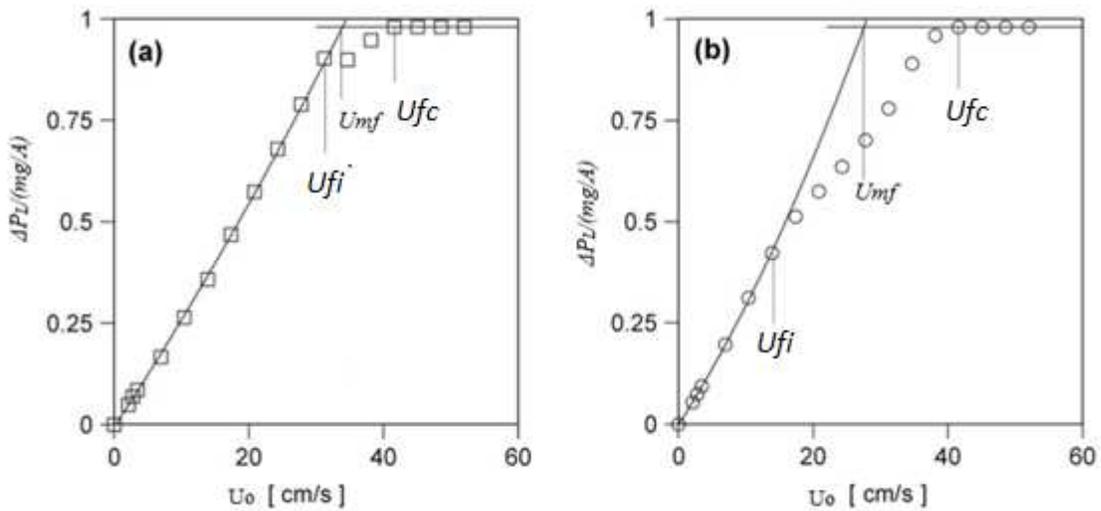


Figura 2.12 – Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás para uma mistura binária, (a) leito inicialmente bem misturado, (b) leito inicialmente segregado (FORMISANI *et al.*, 2001).

Os dois padrões da Fig. 2.13 servem para tornar claro que o comportamento de um sistema binário de partículas varia com a distribuição dos materiais presentes no início do processo de levantamento da curva fluidodinâmica, de modo que também o estado de mistura ou segregação, numa determinada velocidade de fluidização, depende do arranjo inicial dos dois sólidos.

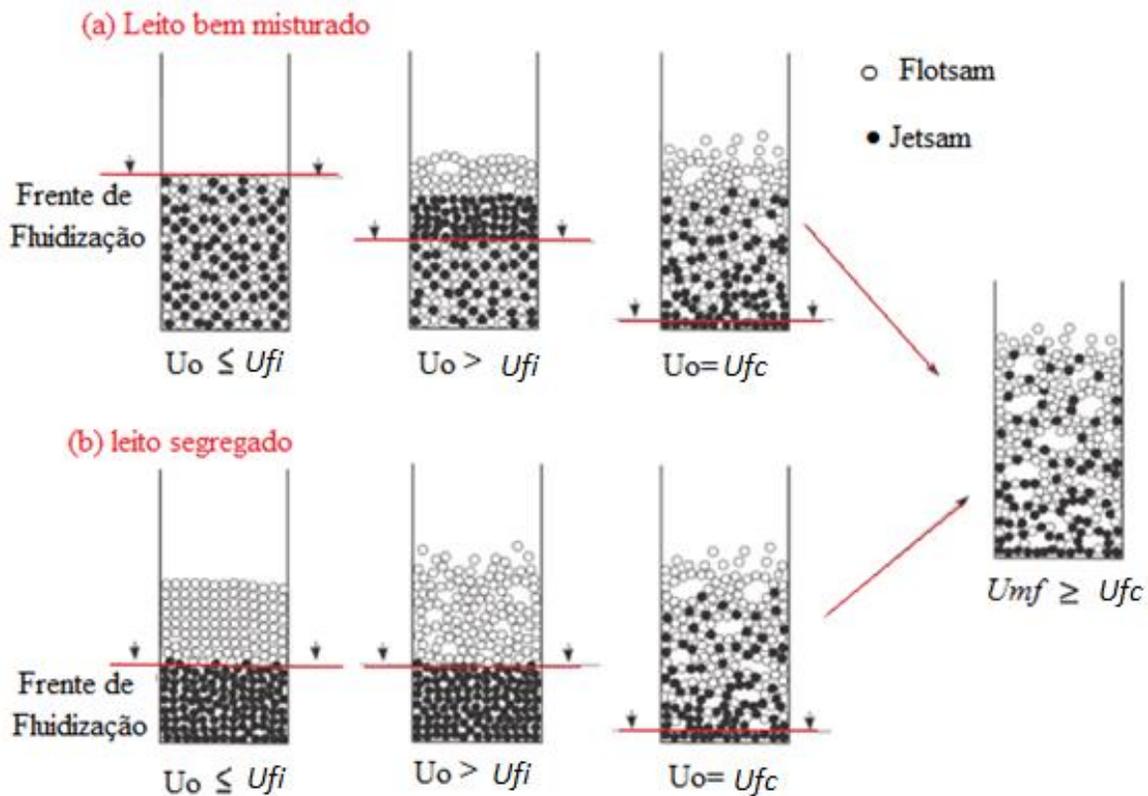


Figura 2.13 - Processo de fluidização num leito com mistura binária (FORMISANI *et al.*, 2008)

Pesquisadores como Chen e Keairns (1975) e Formisani *et al.* (2001) concluíram que em leitos constituídos por mais de um tipo de partícula não é válida a ideia de velocidade de mínima fluidização, sendo mais adequado o conceito de velocidade de fluidização inicial e de velocidade de fluidização completa ( $U_{fi}$  e  $U_{fc}$ , respectivamente).

- **Velocidade de mínima fluidização em misturas binárias**

Diferentes equações têm sido reportadas na literatura para determinar a velocidade de mínima fluidização em misturas binárias. A maioria das correlações para  $U_{mf}$  assumem que o leito encontra-se bem misturado, ou seja, a condição homogênea é observada. Fatores como arraste de finos e formação de canais preferenciais também afetam o comportamento da curva fluidodinâmica.

As correlações apresentadas a seguir para o cálculo de  $U_{mf}$  de misturas foram calculadas, de forma geral, considerando a mistura composta por um material equivalente cujas propriedades levam em consideração as propriedades e frações de cada componente na mistura. A massa específica e o diâmetro médio das partículas do material equivalente são estimados a partir das características dos componentes individuais e de suas frações percentuais em massa ( $x$ ), ou em volume ( $\alpha$ ), na mistura.

Os termos  $x_f$  e  $\rho_f$  são o teor em massa e a massa específica do componente com tendência a flutuar (*flotsam*), respectivamente. O termo  $x_j$  e  $\rho_j$  refere-se ao material com tendência a afundar (*jetsam*). Estes termos foram definidos e utilizados por Gibilaro e Rowe (1974).

O teor em massa do componente com tendência a flutuar na mistura ( $x_f$ ) é definido através da Eq. 2.19.

$$x_f = \frac{\text{massa do material flotsam}}{\text{massa da mistura}} = 1 - x_j \quad (2.19)$$

Os teores dos componentes *flotsam* e *jetsam*, em volume ( $\alpha_f$  e  $\alpha_j$ ), são calculados a partir das Eqs. 2.20 e 2.21, conhecidas as massas do *flotsam* ( $m_f$ ) e a massa do *jetsam* ( $m_j$ ), e as massa específicas respectivas ( $\rho_f$  e  $\rho_j$ ),  $v_f$  é o volume empacotado livremente pelo material flotsam, altura do leito empacotado livremente ( $L$ ) e área transversal da coluna ( $A$ ).

$$\alpha_f = \frac{v_f}{v_L} = \frac{m_f/\rho_f}{LA} \quad (2.20)$$

$$\alpha_j = \frac{v_j}{v_L} = \frac{m_j/\rho_j}{LA} \quad (2.21)$$

Verifica-se que muitas correlações propostas para estimar a  $U_{mf}$  de misturas baseiam-se nas propriedades dos componentes individuais, como a proposta por Otero e Corella (1971), Eq. 2.22, ou em grupos adimensionais contendo o diâmetro e massa específica efetiva ( $d_e$  e  $\rho_e$ ) da mistura como parâmetros.

$$U_{mf} = x_f U_{mf.f} + x_j U_{mf.j} \quad (2.22)$$

O número de Reynolds ( $Re_{mf}$ ) e o número de Arquimedes ( $Ar$ ) são calculados a partir das Eqs. 2.23 e 2.24.

$$Re_{mf} = \frac{\rho_e U_{mf} d_e}{\mu} \quad (2.23)$$

$$Ar = \frac{d_e^3 \rho_g (\rho_e - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.24)$$

Várias correlações seguem o formato originalmente proposto por Wen e Yu (1966) mostrada na Eq. 2.25.

$$Re_{mf} = (19,9^2 + 0,03196 \cdot Ar)^{0,5} - 19,9 \quad (2.25)$$

Para a utilização da Eq. 2.25, o diâmetro e a massa específica efetiva, presentes nos números de Reynolds e de Arquimedes, são estimados aplicando-se as Eqs. 2.26 e 2.27.

$$d_e = d_f \cdot d_j \left[ \frac{x_f \rho_j + x_j \rho_f}{x_f \rho_j d_j + x_j \rho_f d_f} \right] \quad (2.26)$$

$$\frac{1}{\rho_e} = \frac{x_f}{\rho_f} + \frac{x_j}{\rho_j} \quad (2.27)$$

Rasul e Rudolph (1999) propõem as Eqs. 2.28 a 2.30, para o cálculo do diâmetro efetivo, densidade efetiva e porosidade do leito.

$$d_e = \frac{d_f d_j (\alpha_f + \alpha_j)}{\alpha_f d_j + \alpha_j d_f} \quad (2.28)$$

$$\rho_e = \varepsilon \rho_g + \alpha_f \rho_f + \alpha_j \rho_j \quad (2.29)$$

$$\varepsilon = 1 - \alpha_j - \alpha_f \quad (2.30)$$

O grande número de correlações empíricas apresentadas na literatura para prever a velocidade de mínima fluidização para misturas binárias e a grande diferença entre os resultados preditos por diferentes correlações mostram a importância de pesquisas experimentais nessa área e a necessidade de mais estudos envolvendo a fluidização de misturas de partículas sólidas.

A revisão de literatura sobre medidas de pressão em leito fluidizado mostrou que muitos trabalhos já foram realizados visando utilizar os sinais de pressão provenientes do leito para estudar a fluidodinâmica de leitos fluidizados. Foram estudadas as influências de parâmetros como: massa específica, tamanho e forma das partículas, velocidade superficial do gás, geometria do leito, localização das tomadas de pressão e método de medida das flutuações de pressão sobre as medidas de flutuações. Entretanto, verifica-se carência de trabalhos na literatura abordando o fenômeno da segregação em misturas binárias através da análise das flutuações de pressão.

Neste capítulo procurou-se relacionar os principais trabalhos que estudaram temas envolvendo misturas binárias e o fenômeno da segregação, os quais serviram de base para o direcionamento desta pesquisa.

### 3. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E DO SISTEMA EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve os materiais, o sistema experimental, e a instrumentação utilizados nesta pesquisa.

#### 3.1. Materiais particulados e misturas binárias

A escolha dos materiais para a composição das misturas a serem estudadas foi feita de acordo com os seguintes critérios:

- Partículas esféricas (visando eliminar a influência da esfericidade sobre o processo de segregação).
- Materiais com os diâmetros médios similares e diferentes massas específicas das partícula.
- Materiais com diferentes diâmetros médios e massas específicas das partículas.
- Disponibilidade ou facilidade de obtenção dos materiais.

Com base nestes critérios, optou-se por utilizar dois tipos de sólidos particulados: microesferas de vidro designados esferas de vidro fino (*VF*) e esfera de vidro grosso (*VG*) com mesma massa específica da partícula e diferentes diâmetros médios, e microesferas de plástico (*PL*) com diâmetro médio semelhante ao do vidro grosso.

Dois diâmetros médios de Sauter de partícula distintos foram escolhidos para as microesferas de vidro (462 e 959  $\mu\text{m}$ ), respectivamente para o vidro fino (*VF*) e para o vidro grosso (*VG*). Para as microesferas de plástico (*PL*), o diâmetro de 971  $\mu\text{m}$  foi utilizado, valor próximo ao da partícula de 959  $\mu\text{m}$  de vidro grosso.

Três misturas binárias foram estudadas, sendo que em todas elas, a mistura foi preparada de modo a conter 5% (em massa) do material com tendência a flutuar. Portanto, as misturas testadas foram compostas por:

- (i) Mistura *VF-VG*: 5% de *VF* e 95 % de *VG*, designada por (*VF-VG*);
- (ii) Mistura *PL-VG*: 5% de *PL* e 95 % de *VG*, designada por (*PL-VG*);
- (iii) Mistura *PL-VF*: 5% de *PL* e 95 % de *VF*, designada por (*PL-VF*).

A justificativa para a escolha de 5% do material com tendência a flutuar está no fato de que essa é uma concentração usual em processos envolvendo combustão, gaseificação e pirólise de combustíveis sólidos. Nesses reatores, o material inerte representa aproximadamente 95% do material do leito (BASU, 2006, OLASAR *et al.*, 2008, AMUTIO *et al.*, 2012).

Análises preliminares mostraram que a granulometria escolhida para cada material permite a operação do sistema em diferentes regimes de fluidização. Fotografias dos materiais utilizados são apresentadas na Fig. 3.1.



Figura 3.1- Fotografias das microesferas de vidro fino, vidro grosso e plástico.

A caracterização de cada material foi realizada no laboratório de Sistemas Fluidotérmicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, visando à determinação do diâmetro médio de Sauter e da massa específica de cada material.

Para a determinação experimental do diâmetro médio de cada material sólido ( $d_p$ ), foi utilizada a técnica de peneiramento com peneiras padronizadas tipo Tyler, com razão de  $\sqrt{2}$  entre a abertura de duas peneiras consecutivas. O diâmetro médio de Sauter das partículas foi calculado através da Eq. 3.1.

$$\bar{d}_p = \left( \sum_{i=1}^k \frac{x_i}{d_{pi}} \right)^{-1} \tag{3.1}$$

Onde  $x_i$  é a fração mássica das partículas com diâmetro  $d_{pi}$  retidas entre duas peneiras consecutivas de abertura  $d_i$  e  $d_{i+1}$ .

$$d_{pi} = \left( \frac{d_i + d_{i+1}}{2} \right) \quad (3.2)$$

Onde  $i$  varia de 1 a  $k$  intervalos relativos ao número de peneiras utilizadas. Foram realizadas três análises granulométricas para cada material.

A massa específica das partículas, também chamada de massa específica aparente da partículas foi medida em picnômetro de vidro. O método é baseado na determinação do volume de líquido deslocado pela adição de uma massa conhecida de partículas sólidas em recipiente com volume conhecido. Neste procedimento foi utilizada água destilada como líquido de deslocamento. Para o cálculo da massa específica da partícula, foram realizados três testes para cada um dos materiais testados (vidro fino, vidro grosso e plástico).

A esfericidade das partículas estudadas foi admitida igual à unidade uma vez que se tratava de partículas esféricas.

A partir do diâmetro médio e da massa específica dos materiais, foi possível verificar a classificação de cada material segundo Geldart (1973). O procedimento experimental e os resultados obtidos nas análises de caracterização dos materiais estão apresentados no Apêndice A

Os resultados obtidos na caracterização das partículas estão apresentados na Tab. 3.1, assim como a classificação de Geldart e as massas específicas ( $\rho_b$ ) e porosidades ( $\varepsilon_m$ ) dos leitos empacotados naturalmente.

A massa específica do leito ou “*bulk density*” ( $\rho_b$ ), foi determinada considerando que as partículas são alimentadas de forma natural dentro de um recipiente, sem compactação adicional do material (leito fixo empacotado naturalmente ou, em inglês, *loosely*) como arazão entre a massa das partículas e o volume que ocupam no leito, incluindo os espaços interpartículas, conforme Eq. (3.3).

$$\rho_b = \frac{M_L}{\left( \frac{\pi D_L^2}{4} \right) L} \quad (3.3)$$

Onde  $M_L$  é a massa total das partículas no leito;  $D_L$  e  $L$  são o diâmetro da coluna e a altura do leito empacotado naturalmente, respectivamente.

A porosidade do leito ( $\varepsilon_m$ ) representa a fração volumétrica de vazios no leito (ou fração livre de sólidos). Através da razão entre  $\rho_b$  e  $\rho_p$  é possível determinar a fração do leito que está sendo ocupada pelas partículas sólidas, que corresponde a  $(1-\varepsilon_m)$ . Dessa forma, a fração de vazios é determinada por diferença, conforme a Eq. (3.4).

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (3.4)$$

Tabela 3.1 - Características físicas dos materiais particulados.

Partículas	$\bar{\rho}_p$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\bar{d}_p$ (μm)	$\rho_b$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\varepsilon_m$ (-)	Classificação segundo Geldart (1973)
Vidro Fino (VF)	<b>2628±1</b>	<b>462±1</b>	1591	0,394	B
Vidro Grosso (VG)	<b>2492±1</b>	<b>959±1</b>	1587	0,363	D
Plástico (PL)	<b>1016±1</b>	<b>971±1</b>	625	0,384	B

Conforme indicado no diagrama de Geldart da Fig. 3.2, as microesferas de vidro fino e de plástico pertencem ao grupo B de Geldart enquanto as microesferas de vidro grosso pertencem ao grupo D.

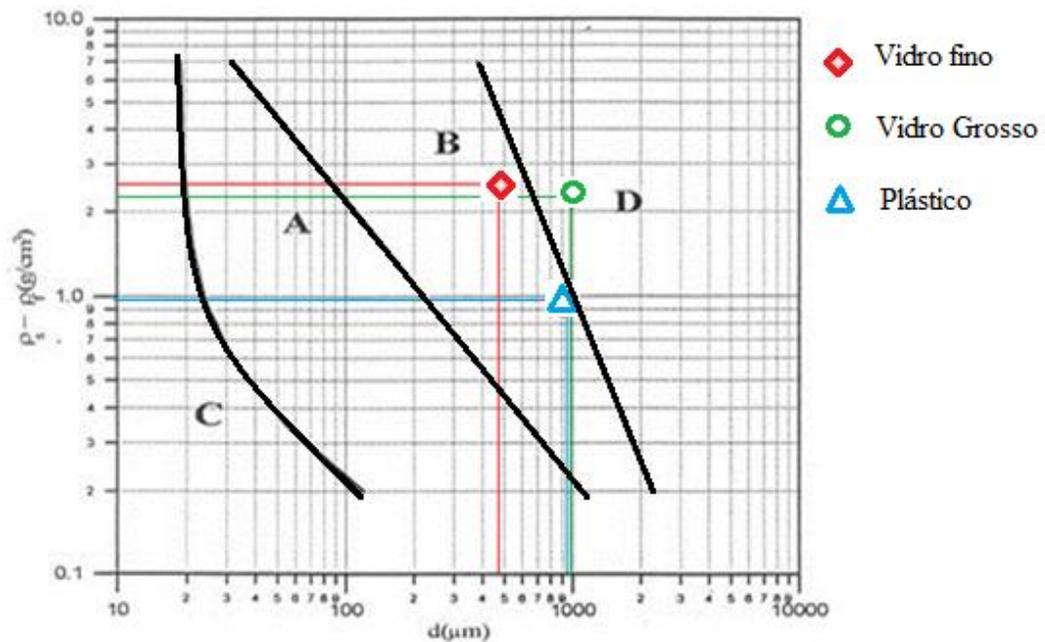


Figura 3.2 – Classificação das partículas segundo a classificação de Geldart (1973) para as microesferas de vidro fino, vidro grosso e plástico.

### 3.2. Sistema experimental

O sistema experimental utilizado na realização dos testes está localizado no Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental (ProTEA) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) na UNICAMP. O diagrama esquemático do sistema experimental e uma fotografia da coluna principal são apresentados na Fig. 3.3.

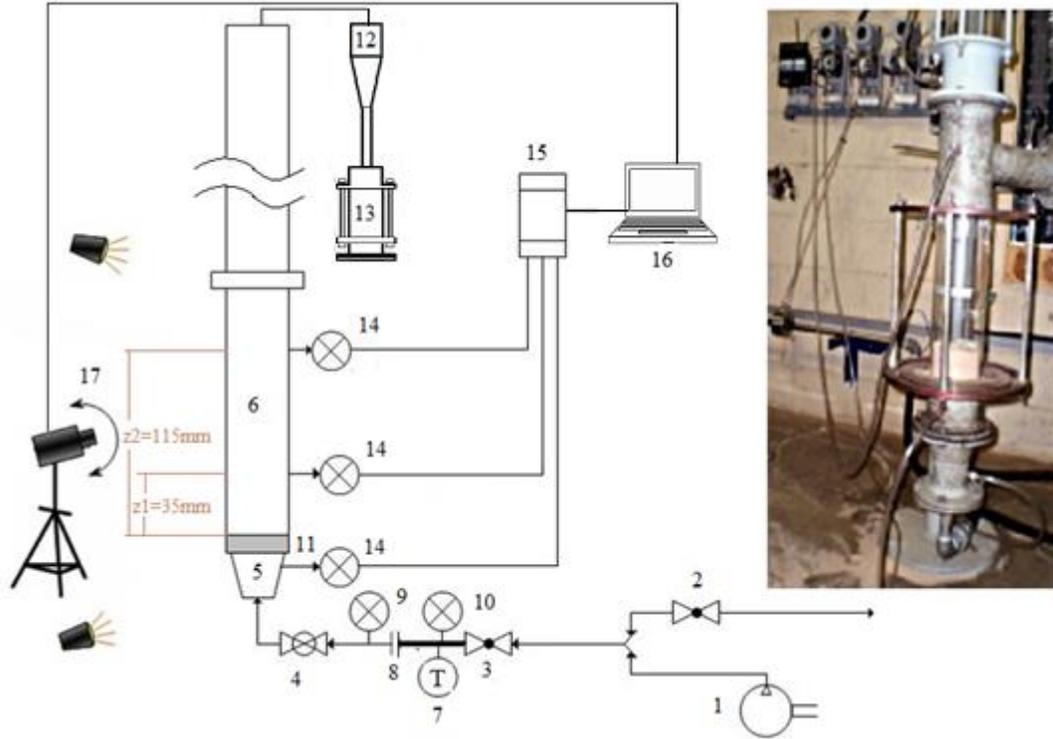


Figura 3.3 - Diagrama esquemático do sistema experimental: (1) Compressor Roots, (2) Válvula *by-pass*, (3) Válvula globo, (4) Válvula de esfera, (5) *Plenum*, (6) Coluna, (7) Termopar tipo J, (8) Placa de orifício (medidor de vazão), (9) e (10) Transdutores de pressão diferencial, (11) Placa distribuidora (12) Ciclone, (13) Coletor de sólidos (14) Transdutor de pressão diferencial para adquirir sinais de flutuações de pressão, (15) Sistema de aquisição de dados, (16) Computador, (17) Sistema de aquisição de imagens.

Ar proveniente de um compressor tipo *roots* (1), cujo ajuste grosseiro da vazão é controlado pelo *bypass* (2), segue pela linha de suprimento até a válvula globo (3) de ajuste final da vazão, passando pelo medidor de temperatura (7) e pela região do medidor de placa de orifício (8) com os transdutores de pressão diferencial (9 e 10). Em seguida o ar passa pela válvula de esfera (4) usada para estancar o escoamento quando necessário, passando pela região do *plenum* (5) abaixo da placa distribuidora (11). Finalmente o ar adentra pela coluna (6) passando pelo leito de partículas e atinge, no topo, o separador ciclônico (12) tipo Lapple com diâmetro de 0,12 m que coleta as partículas e as armazena em (13). Os elementos identificados pelo número (14) são

os transdutores de pressão diferencial os quais apresentam um dos lados aberto para a atmosfera. Um desses transdutores é da marca Smar (modelo LD301-D2) e está instalado 0,035 m acima da placa distribuidora para medida de  $P_{z1}$ . O outro é da marca Rosemount (modelo 3051) e está instalado a 0,115 m acima da placa distribuidora para medida de  $P_{z2}$ . Além desses dois transdutores, existe outro, também da marca Smar (modelo LD301-D2) instalado no *plenum* para medida da pressão identificada como  $P_{plenum}$ . Todos eles são conectados ao sistema de aquisição de dados (15) ligado ao microcomputador (16).

Na Figura 3.4 é possível verificar as principais dimensões e as seções de vidro e acrílico utilizados na construção do sistema experimental. A coluna principal (6) foi construída intercalando seções de vidro (borossilicato), acrílico e aço carbono o que permite a visualização do escoamento em grande parte do circuito. O diâmetro interno da coluna principal é de 0,10 m e sua altura total é de 2,5 m. A espessura da parede de 0,005 m.

As diferentes seções do leito são unidas por meio de flanges metálicas de 0,1 m de altura. A base do leito está equipada com um sistema de flanges que permite a troca do distribuidor de ar e a limpeza do *plenum*. Nesta pesquisa, foi utilizado um distribuidor do tipo placa porosa construído em resina plástica, doada pela empresa EG Filtros situada em Limeira, SP. A Fig. 3.5 apresenta a montagem da placa porosa sobre o flange da coluna principal onde a coluna de vidro está apoiada.

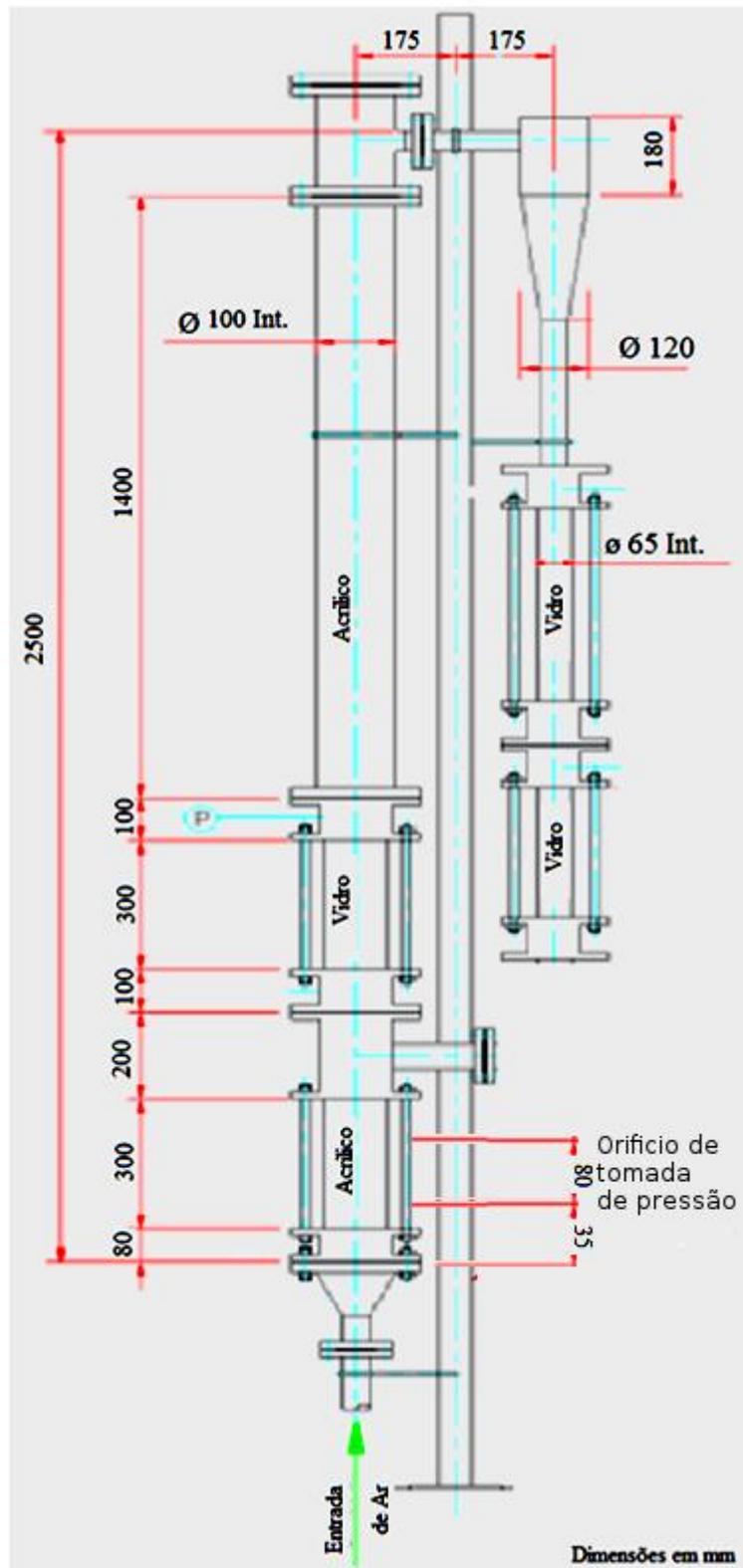


Figura 3.4 - Diagrama esquemático do leito fluidizado (CÁRDENAS-FONSECA, 2009)



Figura 3.5 – Distribuidor de gás tipo placa poroso apoiado sobre a base do tubo do vidro

Em testes preliminares foi calculada a curva e a equação característica de queda de pressão pela placa porosa. Os testes foram feitos sem material particulado na coluna do leito. A queda de pressão através da placa foi medida em função da velocidade do ar. A partir desses dados foi calculada a função mais representativa do comportamento da curva, conforme mostrado na Fig. 3.6.

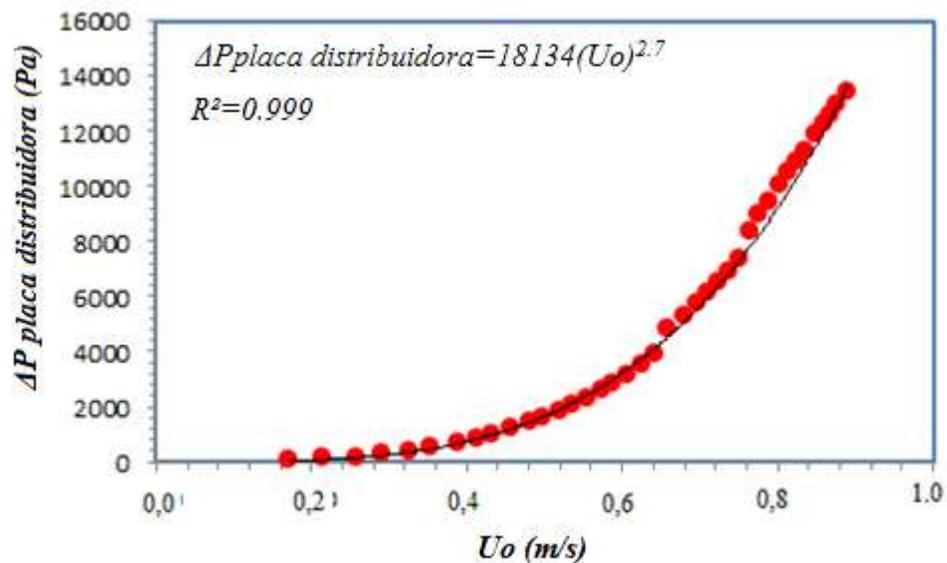


Figura 3.6 Curva característica da queda de pressão na placa distribuidora de tipo poroso.

Três testes foram feitos encontrando-se a Eq. 3.5 como representativa da queda de pressão da placa distribuidora utilizada neste trabalho.

$$\Delta P_{distribuidor} = 18134U_o^{2,7} \quad (3.5)$$

### 3.2.1. Instrumentação

Baseando-se nas pesquisas feitas por Cárdenas-Fonseca(2009), Rueda-Ordóñez (2011) e Parise (2008), optou-se pela utilização de transdutores Smar LD 301- D2 e Rosemount 3051 que possuem, como avaliado, características adequadas para esta pesquisa.

Como descrito no item 2.3.2, Rueda-Ordóñez (2011), em sua análise das características dinâmicas do sensor SMAR LD301-D2 concluiu que esse tipo de medidor pode ser utilizado para medir flutuações de pressão de até 14 Hz com faixa de desvio da FRF de  $\pm 2\%$ , como discutido no item 2.3.3 da revisão da literatura. O tempo de resposta desse medidor, determinado através de análise dos sinais no tempo, foi cerca de 0,15 s. Como a frequência das flutuações de pressão foram inferiores a 10 Hz, valor máximo normalmente encontrado em sistemas fluidizados gás-sólido, o autor concluiu que é confiável a utilização desse sensor para medidas e análise de flutuações de pressão em tais sistemas. Esse transdutor foi utilizado para medir as flutuações de pressão no *plenum*, da mesma forma que na pesquisa de Cárdenas-Fonseca (2009), com uma faixa de medição de 0 a 50 kPa e tempo de resposta de 100 ms e exatidão de  $\pm 0,04\%$  do fundo de escala, conforme dados fornecidos pelo fabricante. Para a utilização deste transdutor, é necessária uma mangueira que conecta a tomada de pressão com o transdutor, além de filtros de tela fina, para evitar entupimentos da tomada de pressão.

O comprimento da mangueira plástica adotado nesta pesquisa foi de 0,2 m e o diâmetro interno da mangueira foi de 0,005 m. O sinal de saída do transdutor é em corrente de 4 a 20 mA, sendo convertido a voltagem e em seguida enviado ao sistema de aquisição de dados. A Fig. 3.7 mostra o transdutor Smart LD 301-D2 utilizado.



Figura 3.7 - Transdutor de pressão SMAR modelo LD301-D2

A tensão de alimentação para esse transdutor é fornecida por uma fonte de alimentação 24 VDC conforme ilustrado na Fig. 3.8 que apresenta o esquema de conexões deste sensor. As linhas entre os terminais do resistor foram conectadas à entrada do sistema de aquisição de dados apresentado no item 3.2.2.

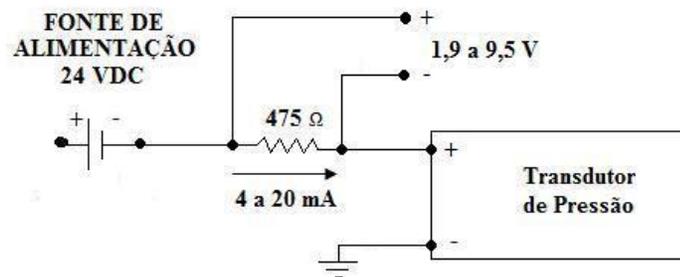


Figura 3.8 - Diagrama de conexão do transdutor de pressão SMAR LD301 – D2

A Fig. 3.9 apresenta o transdutor conectado à coluna principal do sistema experimental, na região abaixo da placa distribuidora (*plenum*), onde podem ser observadas as conexões para a medição neste local. O transdutor foi instalado o mais próximo possível da tomada de forma que a mangueira que conecta a tomada com o transdutor esteja reta e apresente comprimento mínimo e constante em todos os testes.

Este transdutor será utilizado para medir as flutuações de pressão através das quais foram determinadas as velocidades de mínima fluidização para cada material isolado, além de ser um ponto de aquisição de dados, para comparar com as medidas que foram adquiridas na parede do leito.



Figura 3.9 – Transdutor de pressão Smar LD-301 D2 conectado ao *plenum* do sistema experimental.

Nesta pesquisa, também foi usado o transdutor Rosemount 3051 com tempo de resposta de 100 ms e exatidão de  $\pm 0,10\%$  do fundo de escala segundo o manual do fabricante.

Seguindo a recomendação do fabricante, avaliou-se a faixa de trabalho do transdutor Rosemount de referência 3051 (Fig. 3.10) e conectou-se uma resistência em série entre a fonte de alimentação (VC) e o transdutor (Fig. 3.11). Pela resistência  $R$  de 470 ohms, passa uma corrente que fornece VC, essa corrente varia segundo o zero e *span* configurados no transdutor. A corrente de saída no zero é de 4 mA, e o valor máximo medido pelo transdutor (24.500 Pa) corresponde a 20 mA. A corrente faz que a resistência tenha uma tensão em volts dependendo da pressão exercida no transdutor, a qual é a variável detectada pela placa de aquisição de dados. A Fig. 3.12 mostra a fotografia do transdutor de pressão Rosemount 3051. Este transdutor, além de um transdutor Smar LD1- D2, estará instalado na parede do leito para medir as flutuações de pressão que acontecem no processo de fluidização, para posterior comparação com as medidas do *plenum*. Além disso, os transdutores instalados acima da placa distribuidora visam adquirir dados de flutuações de pressão na parte superior e inferior do leito com o objetivo de verificar alterações relacionadas ao fenômeno da segregação.

O processo de verificação de funcionamento dos transdutores é apresentado no Apêndice F.

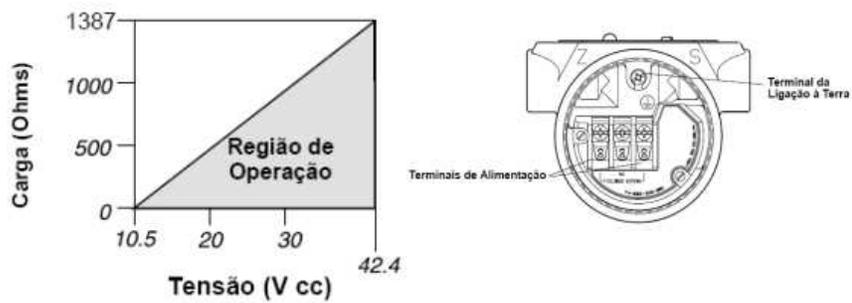


Figura 3.10 - Vista da faixa de trabalho e dos terminais de alimentação do transdutor Rosemount

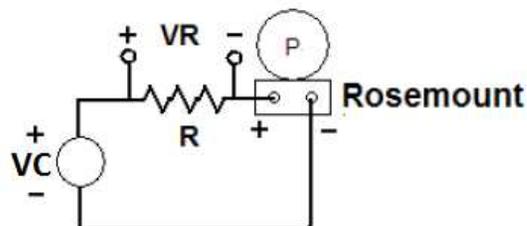


Figura 3.11 - Circuito de alimentação do transdutor Rosemount 3051



Figura 3.12 - Fotografia do transdutor de pressão Rosemount 3051.

Os três transdutores utilizados neste trabalho foram presos em uma coluna situada ao lado do leito, como mostrado na Fig. 3.13. Eles foram ligados às tomadas de pressão na parede do tubo as quais foram distribuídas na altura do leito para medir os sinais de flutuações de pressão.



Figura 3.13 – Fotografia da coluna de manômetros ao lado do sistema experimental

Antes do início de cada teste, foi necessário verificar se as tomadas de pressão e os filtros das tomadas não estavam obstruídos visando garantir a qualidade da medida.

No desenvolvimento dos experimentos, foram medidas as condições internas do laboratório, sendo estas: pressão atmosférica, temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido. A pressão foi medida através de um barômetro de Torricelli, mostrado na Fig. 3.14 juntamente com os termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido. Essas medidas permitiram a obtenção das propriedades do ar no local do experimento.

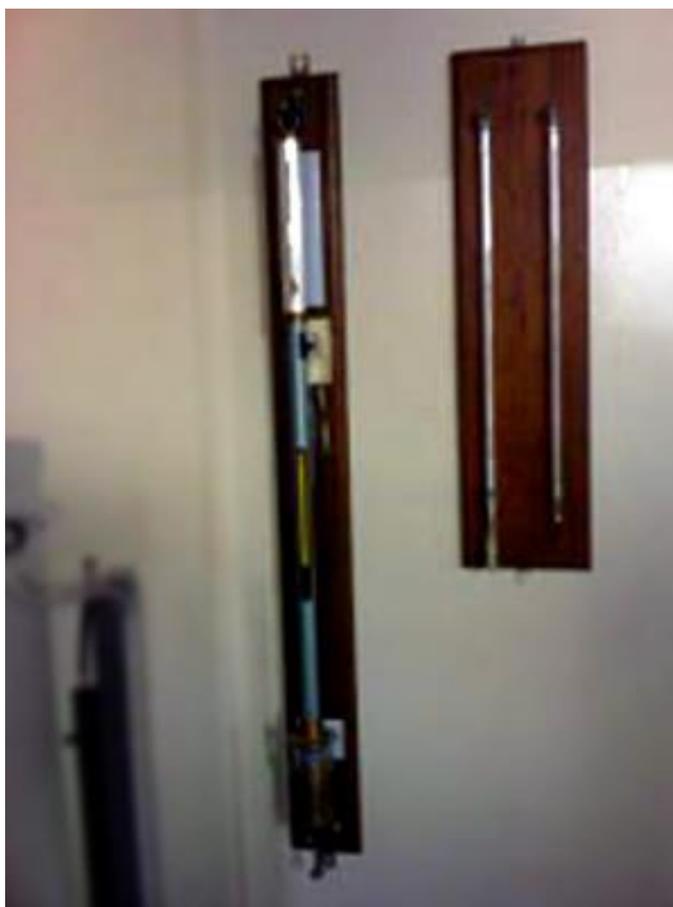


Figura 3.14 - Instrumentação para medida das condições internas do laboratório (barômetro de Torricelli, termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido)

A vazão de gás foi determinada utilizando um medidor de placa de orifício, item (8) na Fig. 3.3, utilizando o procedimento apresentado no Apêndice D. A placa foi construída seguindo a norma ASME MFC-14M-2003.

A temperatura do ar que entra na coluna foi medida com o termopar instalado na tubulação após a placa de orifício. Essa temperatura foi utilizada no cálculo da vazão de ar.

Para o cálculo da pressão diferencial da placa de orifício ( $\Delta P_{or}$ ) e da pressão manométrica ( $P_{mont}$ ) foram utilizados dois transdutores de pressão Smar LD-3-1 D2, indicados por (9) e (10) na Fig. 3.3. Esses dados foram utilizados para o cálculo da vazão de ar que atravessa a coluna principal do sistema experimental.

### 3.2.2. Sistema de aquisição de dados e imagens

O sistema de aquisição de dados (Fig. 3.18) é composto por três partes: placa de aquisição de dados da *National Instruments (NI)* da série *NI USB – 6255*; computador, e o software *Matlab 7.0* para aquisição e análise de dados. A função desse sistema é, basicamente, adquirir o sinal de voltagem de saída dos transdutores de pressão, converter os dados em um formato digital e salvar o sinal em um arquivo.

A placa de aquisição de dados possui as seguintes características:

- Resolução: 16 Bits
- Frequência máxima de amostragem: 1,25 MS/s
- Faixa de voltagem máxima: -10 V, +10V
- Faixa de voltagem mínima: -100 mV, +100 Mv

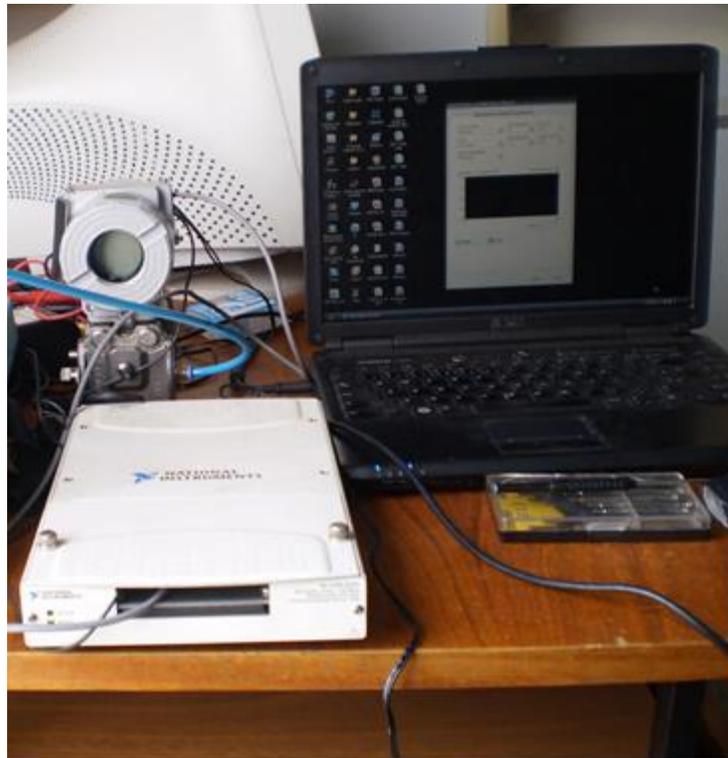


Figura 3.15- Sistema de aquisição de sinais de flutuações de pressão.

O programa desenvolvido para a coleta dos dados de flutuações de pressão está mostrado no Apêndice E.

A aquisição de imagens foi feita com uma câmera de marca OLYMPUS SP-800UZ. As fotografias foram adquiridas para cada velocidade do gás testada, cujo objetivo foi o de relacioná-las com as curvas geradas para a queda de pressão no leito e para o desvio padrão dos sinais de flutuações de pressão. As fotos foram tratadas com auxílio do software GIMP, onde foi feito retoque às cores para diferenciar os dois materiais mais facilmente. A Fig. 3.19 apresenta, como exemplo, uma imagem adquirida em teste realizado com a mistura de vidro fino e vidro grosso (VF-VG).

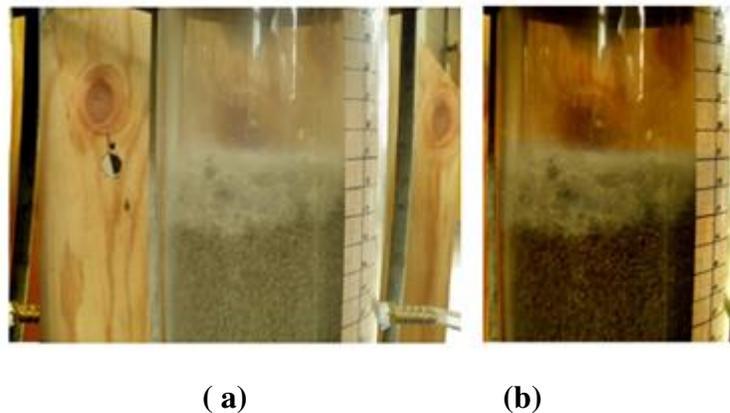


Figura 3.16 - Imagem adquirida com a câmera OLYMPUS SP-800UZ:  
(a) Imagem sem tratamento, (b) Imagem tratada com GIMP

A câmera tinha como especificação técnica 14 megapixels, zoom ótico de 30x, velocidade de obturador de 1/2000 s. Foi situada junto à coluna principal do sistema experimental na região do leito de partículas. A iluminação foi fornecida por uma lâmpada com dois tubos fluorescentes de 32 W, de referência FO32/850, colocada acima e atrás da câmera.

## 4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste item, são apresentados os planejamentos e os procedimentos experimentais utilizados durante a pesquisa. Primeiramente, são apresentados os planejamentos para a realização de cada teste, tanto com materiais isolados quanto com misturas binárias. Em seguida, são apresentados os procedimentos experimentais de cada teste.

### 4.1. Planejamento experimental dos testes

Numa primeira etapa, foram realizados testes com cada material isolado, ou seja, apenas microesferas de vidro fino (VF), de vidro grosso (VG) ou de plástico (PL) estavam presentes no leito. Foram realizadas três repetições de cada teste no sistema de leito fluidizado (designadas pelos subscritos 1, 2 e 3, ou seja,  $VF_1$ ,  $VF_2$ ,  $VF_3$ ,  $VG_1$ ,  $VG_2$ ,  $VG_3$  e  $PL_1$ ,  $PL_2$ ,  $PL_3$ ). Cada teste foi realizado em uma das cerca de 40 diferentes velocidades superficiais do gás ( $U_o$ ), partindo-se da maior, no regime borbulhante, para a menor velocidade, na qual o leito estava em regime de leito fixo.

Em seguida, foram realizados testes com as misturas binárias especificadas no item 3.1, ou seja, misturas contendo microesferas de vidro fino e vidro grosso (VF-VG), microesferas de plástico e vidro grosso (PL-VG) e microesferas de plástico e vidro fino (PL-VF).

Os testes envolveram a coleta de amostras de dados de pressão, simultaneamente, em três transdutores:

- (i) Transdutor diferencial localizado no *plenum*, cuja medida de pressão é simbolizada por  $P_{plenum}$ ;
- (ii) Transdutor diferencial localizado a uma altura  $z_1$ , localizada a uma altura de 35 mm acima da placa distribuidora, cuja medida de pressão é simbolizada por  $P_{z1}$ .
- (iii) Transdutor diferencial localizado a uma altura  $z_2$ , localizada a uma altura de 115 mm acima da placa distribuidora, cuja medida de pressão é simbolizada por  $P_{z2}$ .

Os sinais de pressão dos três transdutores também foram adquiridos para cerca de 40 diferentes velocidades superficiais do gás ( $U_o$ ). Em cada valor de  $U_o$  ensaiado, os sinais de pressão de cada transdutor foram coletados durante 50 s, a uma taxa de 200 Hz, resultando na coleta de amostras contendo 10.000 pontos de pressão por transdutor. Esses parâmetros de aquisição de dados foram utilizados por pesquisadores como Wilkinson (1995). Rowe *et al.* (1972) verificaram que, partindo de um leito segregado, todas as misturas binárias estudadas atingiram o equilíbrio fluidodinâmico em aproximadamente 25 s. Neste trabalho foi adotado um tempo de 60s antes do início da aquisição de dados, para assegurar-se que o equilíbrio fluidodinâmico já estivesse estabelecido no momento da coleta de dados.

A tabela 4.1 mostra a faixa de  $U_o$  adotada para cada tipo de material (da maior velocidade para a menor velocidade testada, seguindo a mesma ordem adotada nos testes), bem como o número total de amostras de pressão para cada material e para cada transdutor de pressão, considerando as três repetições realizadas para cada teste.

Tabela 4.1 - Características dos testes realizados com cada tipo de material testado.

Material	Faixa de $U_o$ (m/s)	Total de amostras coletadas para transdutor do <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ )	Total de amostras coletadas para transdutor instalado em $z_1 = 35$ mm ( $P_{z1}$ )	Total de amostras coletadas para transdutor instalado em $z_2 = 115$ mm ( $P_{z2}$ )
<i>VF</i>	0,41 a 0,09	~105 (=35X3)	~105 (=35X3)	~105 (=35X3)
<i>VG</i>	0,89 a 0,10	~120 (=35X3)	~120 (=35X3)	~120 (=35X3)
<i>PL</i>	0,41 a 0,20	~105 (=35X3)	~105 (=35X3)	~105 (=35X3)

Da mesma forma que para os materiais isolados, para cada mistura, foram realizados três repetições (designadas pelos subscritos *1*, *2* e *3*).

A tabela 4.2 mostra a faixa de  $U_o$  adotada para cada mistura binária testada (da maior velocidade para a menor velocidade testada, seguindo a mesma ordem adotada nos testes), bem

como o número total de amostras de pressão para cada material e para cada transdutor de pressão, considerando as três repetições realizadas para cada teste.

Tabela 4.2- Características dos testes realizados com cada tipo de mistura testada.

Mistura	Faixa de $U_o$ ensaiada (m/s)	Total de amostras coletadas para transdutor do <i>plenum</i> ( $P_{plenum}$ )	Total de amostras coletadas para transdutor instalado em $z_1 = 35$ mm ( $P_{z1}$ )	Total de amostras coletadas para transdutor instalado em $z_2 = 115$ mm ( $P_{z2}$ )
<i>VF-VG</i>	0,9 a 0,03	~120 (=40X3)	~120 (=40X3)	~120 (=40X3)
<i>PL-VG</i>	0,9 a 0,07	~120 (=40X3)	~120 (=40X3)	~120 (=40X3)
<i>PL-VF</i>	0,41 a 0,06	~155 (=40X3)	~155 (=40X3)	~155 (=40X3)

A tabela 4.3 apresenta a fração em massa para cada componente das misturas testadas, assim como a massa de material presente no leito.

Para a construção das curvas de desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás foram selecionadas velocidades entre aproximadamente 1,2 e 2,5 vezes  $U_{mf}$ . Dessa forma procurou-se assegurar que fossem mostrados os dados coletados desde uma condição muito próxima à  $U_{mf}$  até uma condição onde o leito estivesse em regime borbulhante completamente misturado.

Tabela 4.3 – Composição das misturas binárias estudadas.

Mistura Binária	Composição		Massa do material no leito (kg)
	5 % (em massa)	95 % (em massa)	
<i>VF-VG</i>	VF	VG	1,87
<i>PL-VG</i>	PL	VG	1,74

<i>PL-VF</i>	PL	VF	1,74
--------------	----	----	------

Para a aquisição dos sinais de flutuações de pressão foi adotado o seguinte procedimento experimental que consta basicamente de quatro etapas:

- Partida do sistema experimental;
- Estabelecimento do regime de operação;
- Aquisição de sinais de pressão;
- Aquisição de imagens;
- Parada de operação do sistema experimental.

Salienta-se que, antes do início de cada teste, certificou-se de que não havia vazamentos de gás no sistema e que três repetições de cada teste planejado foram realizadas.

Após adquiridos os sinais de flutuações de pressão, foram feitas as análises no domínio do tempo e no domínio da frequência conforme apresentado no Capítulo 5.

- **Partida do sistema experimental**

Com base no diagrama da Fig. 3.3, os passos para a inicialização dos testes são descritos a seguir:

Passo 1: Ligar todos os instrumentos de medição (7, 9, 10 e 14), placa de aquisição e computador (15 e 16) e sistema de aquisição de imagens.(17).

Passo 2: Montar e verificar alguns elementos do sistema experimental como: placa de orifício (8), placa distribuidora porosa (11), tomadas de pressão (14) livres de entupimentos, conexões elétricas dos transdutores ao sistema de aquisição de dados, ligação da placa de aquisição de dados ao computador;

Passo 3: Selecionar o material que vai ser usado no teste, o qual tem que ser conhecidas algumas propriedades como o diâmetro médio de Sauter cada material, massa específica da partícula e massa específica e porosidade do leito empacotado naturalmente. Nos testes com misturas existia a etapa adicional de preparação das misturas (apêndice G). Salienta-se novamente que a altura do leito foi mantida constante, e igual a 150 mm, em todos os testes. Tanto para os testes com materiais isolados como para os testes com as misturas.

Passo 4: Introduzir uma massa de material particulado, previamente identificado, na coluna principal do leito fluidizado. Os materiais do leito são introduzidos pela parte superior da bancada. No caso das misturas, primeiro foi carregado o material com tendência a flutuar (*flotsam*) e em seguida foi carregado o material com tendência a afundar (*jetsam*). A Fig. 4.1 mostra uma fotografia dessa etapa, onde é possível ver as partículas de vidro grosso (mais escuras) sobre as partículas de plástico (mais claras).



Figura 4.1 – Leito carregado com mistura (*PL-VG*) antes de iniciar o teste.

Passo 5: Já ligado o computador e placa de aquisição de dados (ver item 3.2), abrir o programa para realizar a aquisição de dados, comprovar seu correto funcionamento coletando uma série de dados sem ligar o compressor;

Passo 6: Verificar o correto funcionamento dos transdutores de pressão (14), realizando a comprovação de seu zero, com ajuda da ferramenta de verificação de corrida (*run test*) do software da placa de aquisição *National Instruments NI USB 6255*.

Passo 7: Fechar a válvula à montante do leito (4), partir o compressor *roots* (Fig.3.3(1)), ajustar a válvula de by-pass (2) e verificar o correto funcionamento do compressor de ar. A válvula do *bypass* iniciará fechada, e com a válvula à montante completamente aberta procede-se a abertura da válvula by-pass.

Passo 8: Após ter carregado o leito, injetar ar na coluna até o leito chegar a uma condição operacional de leito borbulhante. No caso de testes com misturas, assegurar que ocorre a mistura completa entre os componentes.

Passo 9: Reduzir gradativamente a vazão de ar, adquirindo dados de pressão a cada valor de vazão selecionado, até que a condição de leito fixo seja novamente atingida.

O início do processo de redução da vazão de ar foi feito para os testes com partículas de vidro fino e de plástico quando o leito estava a uma velocidade superficial do gás calculada em 0,42 m/s; para o vidro grosso o leito foi fluidizado até uma velocidade superficial do gás calculada em 0,90 m/s.

O início da redução da vazão de ar foi feito para a mistura de (*PL-VF*) quando o leito estava fluidizado a uma velocidade superficial do gás calculada em 0,42 m/s; isto tendo como guia o comportamento de cada material isolado. Para as misturas (*VF-VG*) e (*PL-VG*) o leito foi fluidizado até uma velocidade superficial do gás calculada em 0,91 m/s.

Para todas as misturas, (*VF-VG*), (*PL-VG*) e (*PL-VF*), a diminuição da vazão de gás foi controlada pela diminuição da pressão da queda de pressão através da placa de orifício. Foi adotada uma redução gradativa de 50 mmH<sub>2</sub>O, para todos os testes.

- **Estabelecimento do regime de fluidização**

Durante os testes preliminares, foram estabelecidos os regimes de fluidização a serem estudados no trabalho (leito fixo e leito borbulhante), sendo isto feito para cada material isolado e para cada mistura.

Com base no diagrama da Fig. 3.3, os passos seguidos foram:

Passo 1: Regular a vazão de gás por meio da válvula *bypass* (2) que é para o ajuste grosseiro, e da válvula globo do equipamento (4) que é para o ajuste final, até atingir os valores de velocidade superficial do gás estudados neste trabalho;

Passo 2: Verificar, visualmente, se o regime desejado foi atingido e manter constante a vazão de gás, determinando-se a velocidade superficial do gás. Aguardar 60s para o início da aquisição de dados para garantir o equilíbrio dinâmico do leito e o regime permanente

Passo 3: Acompanhar, visualmente, o processo de fluidização e monitorar a medição dos transdutores de pressão.

- **Aquisição dos sinais de flutuações de pressão**

Os sinais de flutuações de pressão provenientes dos transdutores de pressão foram adquiridos conforme o procedimento a seguir:

Passo 1: Selecionar o local no computador para salvar os arquivos do teste.

Passo 2: Verificar a taxa de aquisição e número de amostras (200 Hz e 10000, respectivamente) para a aquisição de sinais (ver item 4.1).

Passo 3: Iniciar a aquisição e realizar o acompanhamento.

- **Aquisição de imagens**

A aquisição de imagens foi feita com uma câmara de marca OLYMPUS SP-800UZ como já descrito no Capítulo 3. As fotografias foram adquiridas para cada velocidade do gás testada, enquanto a aquisição das medidas de pressão era realizada.

- **Parada de operação do sistema experimental**

Os passos de parada do sistema foram os seguintes:

Passo 1: Fechar a válvula *by-pass*, e a válvula globo;

Passo 2: Desligar o compressor, junto com os instrumentos de medição e os dispositivos eletrônicos utilizados;

Passo 3: Retirar todo o material particulado do sistema experimental.

Os procedimentos descritos acima foram utilizados em todos os testes, independentemente se foram com materiais isolados ou com misturas.

## 5. REDUÇÃO DE DADOS

Neste capítulo são, apresentados os métodos e técnicas utilizados para redução dos dados a partir das medidas experimentais obtidas através dos procedimentos descritos no Capítulo 4. As metodologias apresentadas neste capítulo referem-se a:

- Análises dos sinais de pressão no domínio do tempo;
- Análises de sinais de pressão no domínio da frequência;
- Determinação da velocidade de mínima fluidização pelo método da queda de pressão e pelo método do desvio padrão das flutuações de pressão;
- Determinação das velocidades inerentes ao fenômeno de segregação de partículas em leitos fluidizados gás-sólido contendo misturas binárias.

### 5.1. Redução de dados para as análises dos sinais de pressão no domínio do tempo

Foi realizada uma análise no domínio do tempo para determinação de algumas características do sinal como: desvio padrão, pressão média e amplitude das flutuações em função da velocidade superficial do gás. Portanto, as etapas de redução de dados se referem à determinação destes parâmetros a partir dos sinais adquiridos e das estratégias utilizadas nas análises. Os resultados destas análises são apresentados no Capítulo 6.

#### 5.1.1 Redução de dados das análises para os materiais isolados

Foram construídos gráficos dos sinais para cada material presente no leito e para cada transdutor conectado ao *plenum* e à coluna principal do reator. Para esses gráficos, apresentados nos capítulos 6 e 7, foram selecionados os sinais obtidos no primeiro teste realizado para cada material, ou seja,  $VF_1$ ,  $VG_1$  e  $PL_1$ , em seis diferentes velocidades superficiais do gás. O objetivo destas análises foi apresentar o comportamento dos sinais e discutir sobre suas características no domínio do tempo.

As figuras 5.1 e 5.2 representam sinais adquiridos pelo transdutor localizado no *plenum* e constituem-se em exemplos dos sinais de flutuações de pressão adquiridos. Nessas figuras, os sinais foram provenientes dos testes com microesferas de vidro grosso, para os regimes de leito fixo ( $U_o = 0,22$  m/s) e de leito borbulhante ( $U_o = 0,75$  m/s).

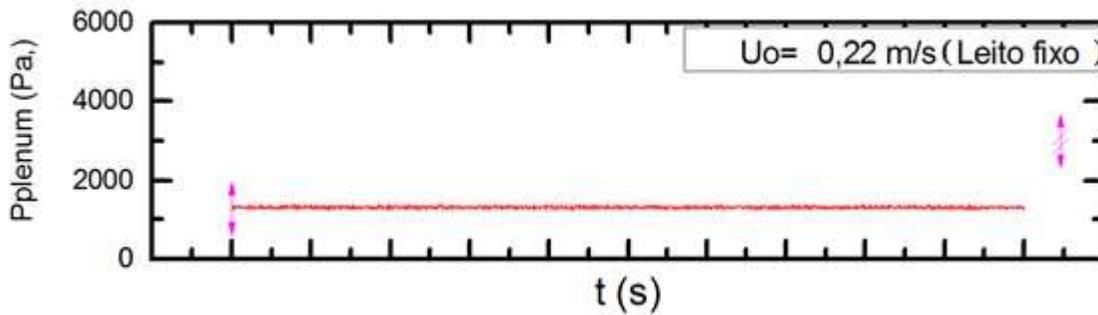


Figura 5.1 - Comportamento dos sinais de pressão no *plenum* ao longo do tempo para o regime de leito fixo (Material VG, teste  $VG_1$ ).

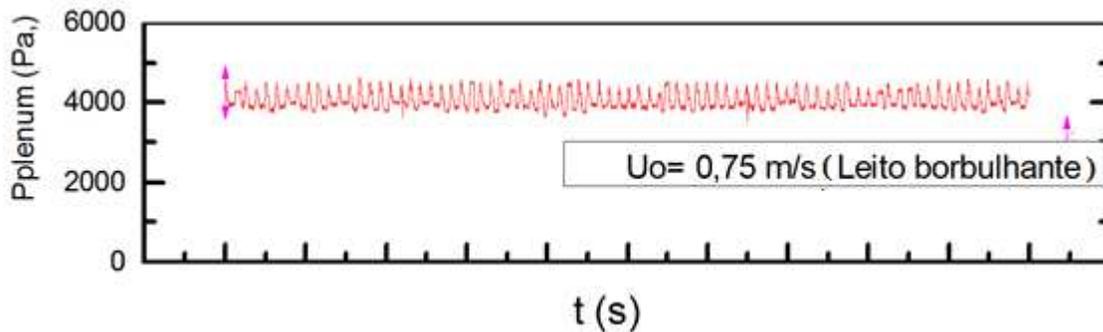


Figura 5.2 – Comportamento dos sinais de pressão no *plenum* ao longo do tempo para o regime de leito borbulhante (Material VG, teste  $VG_1$ ).

As séries de tempo dos sinais amostrados são convertidas a um formato digital e salvas em arquivo no computador, estando prontas para serem analisadas. A análise dos sinais foi feita utilizando o software Matlab 7.0.1 e o software Origin 8.0.

Numa primeira etapa, efetuou-se o deslocamento do sinal em torno da posição onde o valor médio é nulo. Esse procedimento é efetuado extraindo-se o valor médio ( $\bar{P}$ ) de cada sinal, como mostrado na Eq. 5.1.

A metodologia utilizada na análise consistiu inicialmente numa coleta de  $N$  pontos de pressão manométrica no *plenum* e na coluna nas alturas de  $z_1$  e  $z_2$ , acima da placa distribuidora. Um exemplo desse sinal pode ser visualizado na Fig. 5.3.

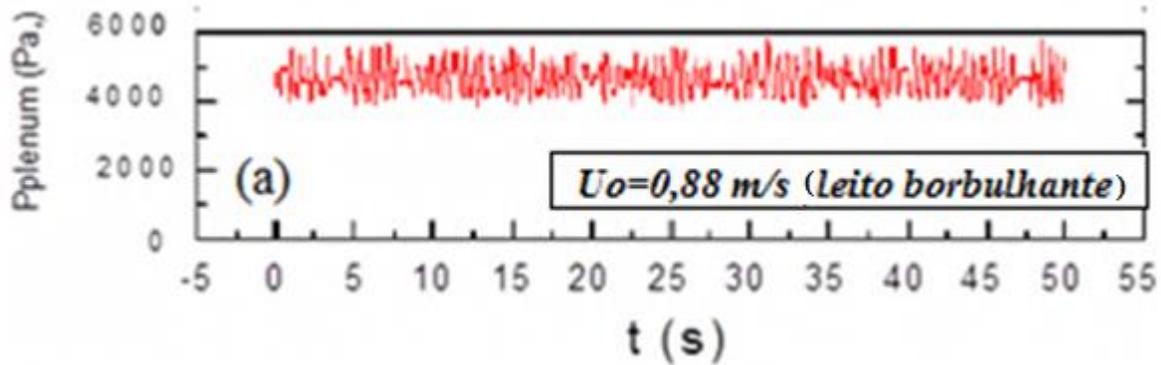


Figura 5.3 – Sinal de pressão manométrica no *plenum* ( $P_{plenum}$ ).

Tal procedimento corresponde a um “deslocamento” do tipo “centralização na média” (*mean centering*) que consiste em subtrair a média de um vetor ( $\bar{P}$ ) a cada elemento desse vetor, conforme Eq. 5.1. Esse procedimento também foi utilizado por Lopes (2004) e Parise (2007), resultando no sinal mostrado na Fig. 5.4.

$$PN_k = P_k - \bar{P} \quad (5.1)$$

Onde:

$PN_k$  = Pressão deslocada do sinal  $k$  (Pa);

$P_k$  = pressão do leito medida pelo sinal  $k$  (Pa);

$\bar{P}$  = valor médio da pressão para os  $N$  pontos de pressão coletados (Pa), Eq. 5.2.

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_k \quad (5.2)$$

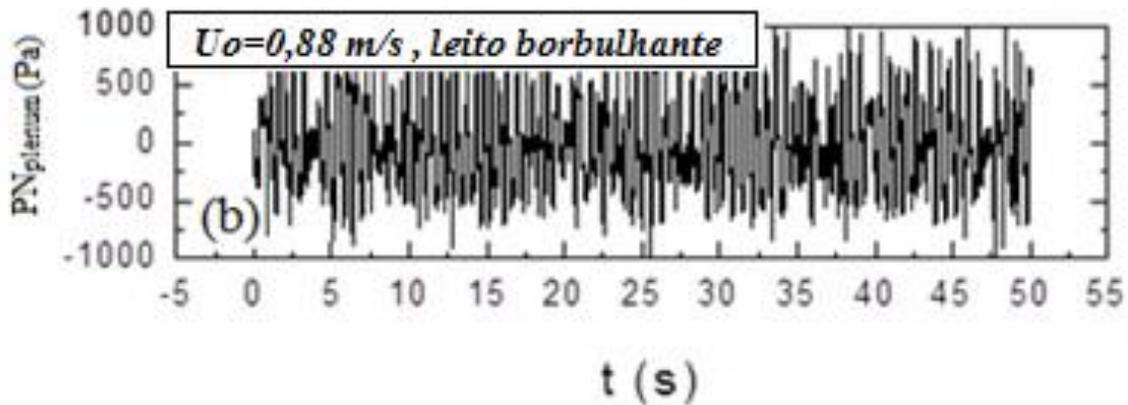


Figura 5.4 - Pressão deslocada no domínio do tempo

### 5.1.2 Análises para as misturas binárias

Para as análises no domínio do tempo, foram construídos os gráficos dos sinais para cada mistura e para cada transdutor instalado em posições diferentes entre o *plenum* e o *riser*, como descrito no item 3.2. A partir dos dados coletados ao longo do processo de fluidização para as misturas contendo vidro fino e vidro grosso (*VF-VG*), *plástico e vidro grosso (PL-VG)* e *plástico e vidro fino (PL-VF)*, foram escolhidas quatorze velocidades superficiais diferentes, que geraram diferentes comportamentos fluidodinâmicos do leito particulado.

O objetivo destas análises é apresentar o comportamento dos sinais adquiridos ao longo do tempo e discutir sobre suas características como a amplitude das flutuações de pressão.

A análise no domínio do tempo realizada para cada material isolado foi utilizada para verificar a alteração do comportamento dos sinais em relação aos obtidos para as misturas binárias, procurando identificar características do fenômeno da segregação no processo de fluidização.

Da mesma forma, o estudo no domínio do tempo foi realizado a partir do mesmo procedimento matemático e de processamento de sinais utilizado para os materiais isolados.

## 5.2. Análises dos sinais de pressão no domínio da frequência para materiais isolados e misturas binárias

No domínio da frequência, as características analisadas foram a amplitude das componentes dominantes e frequências correspondentes, para cada espectro de amplitudes analisado.

A análise espectral é uma ferramenta muito utilizada para caracterizar o conteúdo de frequência de um sinal. Ela foi realizada a partir da aplicação da chamada transformada de Fourier.

Neste trabalho, é utilizada uma metodologia de distribuição espectral para identificar o comportamento dos sinais num processo de fluidização de sólidos com fluido gasoso. Tal metodologia é descrita a seguir.

Como já discutido, para as análises dos sinais no domínio do tempo, inicialmente, foram coletados  $N$  pontos de pressão manométrica no *plenum* e na coluna do leito a duas alturas diferentes, fixadas acima da placa distribuidora e denominadas como  $z_1$  e  $z_2$ . Após a realização da coleta do sinal de pressão no leito, extraiu-se do mesmo o seu valor médio com a finalidade de se eliminar, nos espectros de amplitude a serem determinados, a componente de frequência com valor zero que, em geral, é muito superior às demais do espectro. Tal procedimento corresponde a um “deslocamento” do tipo “centralização na média” (*mean centering*), já explicado no item de análises no domínio do tempo para materiais isolados.

O passo seguinte consiste na aplicação da Transformada de Fourier no sinal de pressão tendo em vista a construção dos espectros de amplitude, como o mostrado na Fig. 5.5.

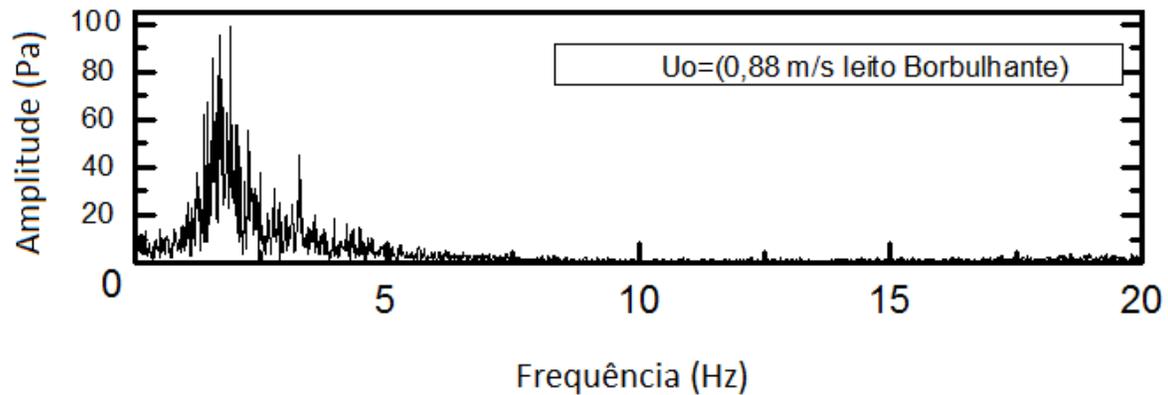


Figura 5.5 – Espectro de amplitude do sinal de flutuação de pressão adquirido pelo transdutor no *plenum* (material: VG,  $U_o = 0,88$  m/s).

Nesta seção, são apresentados os procedimentos adotados para a redução de dados aplicada às análises dos sinais de flutuação de pressão no domínio da frequência, os quais foram adquiridos durante os experimentos realizados com diferentes materiais e com os transdutores instalados em diferentes posições:  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$ ,  $P_{z2}$ .

Na determinação do espectro de amplitudes, foi necessário eliminar a componente de frequência igual a 60 Hz correspondente ao ruído proveniente da rede elétrica. Esse procedimento foi adotado pelo fato desta componente apresentar-se como um pico isolado desassociado da fluidodinâmica do leito. Aos sinais, foi aplicado um processo de filtragem com a ferramenta *FFT filter do software Origin 8.0*. Esta é uma ferramenta utilizada para sinais onde o ruído aparece como pico localizado. Através da aplicação de *FFT filter* pode-se atenuar componentes de frequências mais altas. Nesta fase, foram testados todos os filtros digitais disponíveis no software Origin 8.0, e os melhores resultados foram obtidos quando utilizado o filtro digital de resposta infinita ao impulso (IIR), do tipo passa-baixas. Esse filtro, com frequência de corte em 20 Hz, eliminava a frequência de 60 Hz proveniente da rede elétrica. Além disso, a frequência de 20 Hz foi escolhida por considerar que os fenômenos associados à fluidização acontecem entre 10 e 20 Hz como comentado no capítulo 2, item 2.3.1.

O software Origin 8.0 permite aplicar uma filtragem passa-baixas e, portanto, permite que sejam atenuadas componentes associadas a ruídos de uma frequência mais alta que a frequência de corte ( $F_{cutoff}$ ), dada por:

$$F_{cutoff} = \frac{1}{N\Delta t} \quad (5.7)$$

Onde  $N$  é o número de dados a serem considerados pelo usuário e  $\Delta t$  é o tempo entre dados consecutivos. Maiores valores de  $N$  resultam em baixas frequências de corte, assim, um maior grau de suavização, a função utilizada para recortar os componentes de altas frequências é uma parábola com um máximo de 1 na frequência zero, e caindo até zero na frequência de corte definida anteriormente. Na Fig.5.6 é apresentado o exemplo da ferramenta *FFT Filter Smoothing* o software Origin 8, que é uma ferramenta adicional como técnica de processamento de sinais usada para remover ruídos. Ela é utilizada quando o sinal apresenta ruídos com frequências altas. O filtro elimina as altas frequências deixando o sinal que se deseja estudar. Essa ferramenta foi utilizada como complemento ao processo de filtragem feito com a ferramenta *FFT Filter*.

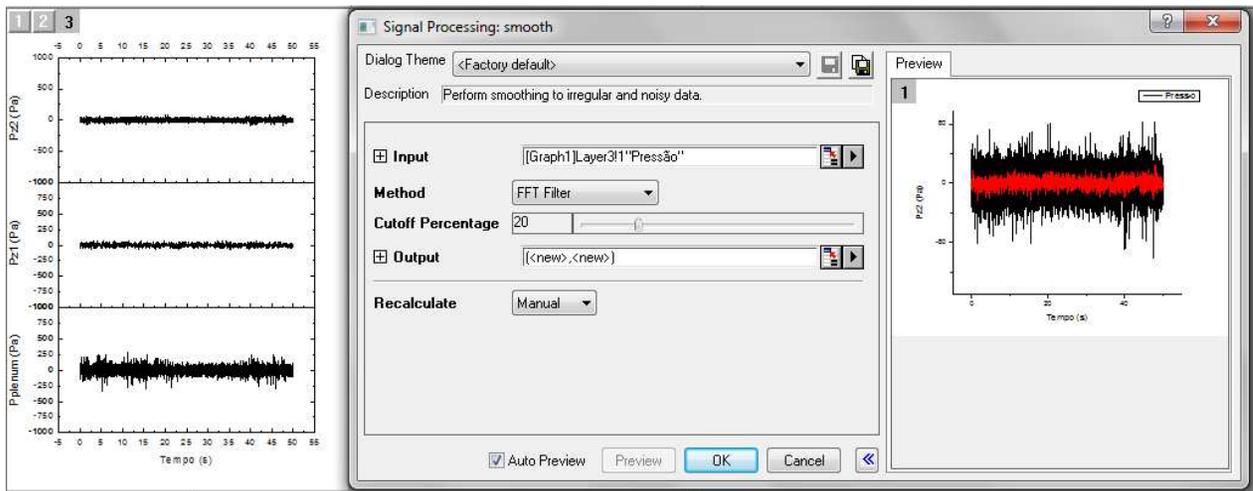


Figura 5.6- Tela do software Origin 8.0 para o processo de filtragem com a ferramenta *FFT smooth* (OriginLab, 2013).

Como descrito anteriormente, aos sinais de pressão, numa primeira etapa, foi aplicado um processo chamado de “centralização na média”, já descrito anteriormente. Em seguida, numa segunda etapa, foi realizada uma filtragem com a ferramenta *FFT smooth* trabalhando com uma frequência de corte de 20 Hz já que, como descrito no item 2.3.1, segundo Johnson *et al.*, (2000)

e Sasic *et al.* (2007), em leitos fluidizados, as componentes dos sinais de pressão relacionados á fluidodinâmica estão abaixo de 20 Hz.

Na figura 5.7 pode-se observar o resultado no espaço do tempo do processo de filtragem do sinal. A Fig. 5.7 (a) mostra o sinal antes da filtragem, enquanto a Fig. 5.7(c) mostra o sinal após o processo de filtragem. A Fig. 5.7(b) mostra a comparação entre os dois sinais.

Na figura 5.8 pode-se observar a tela da interface de processamento de sinais do software Origin 8 com a indicação do tipo de filtro e da frequência de corte.

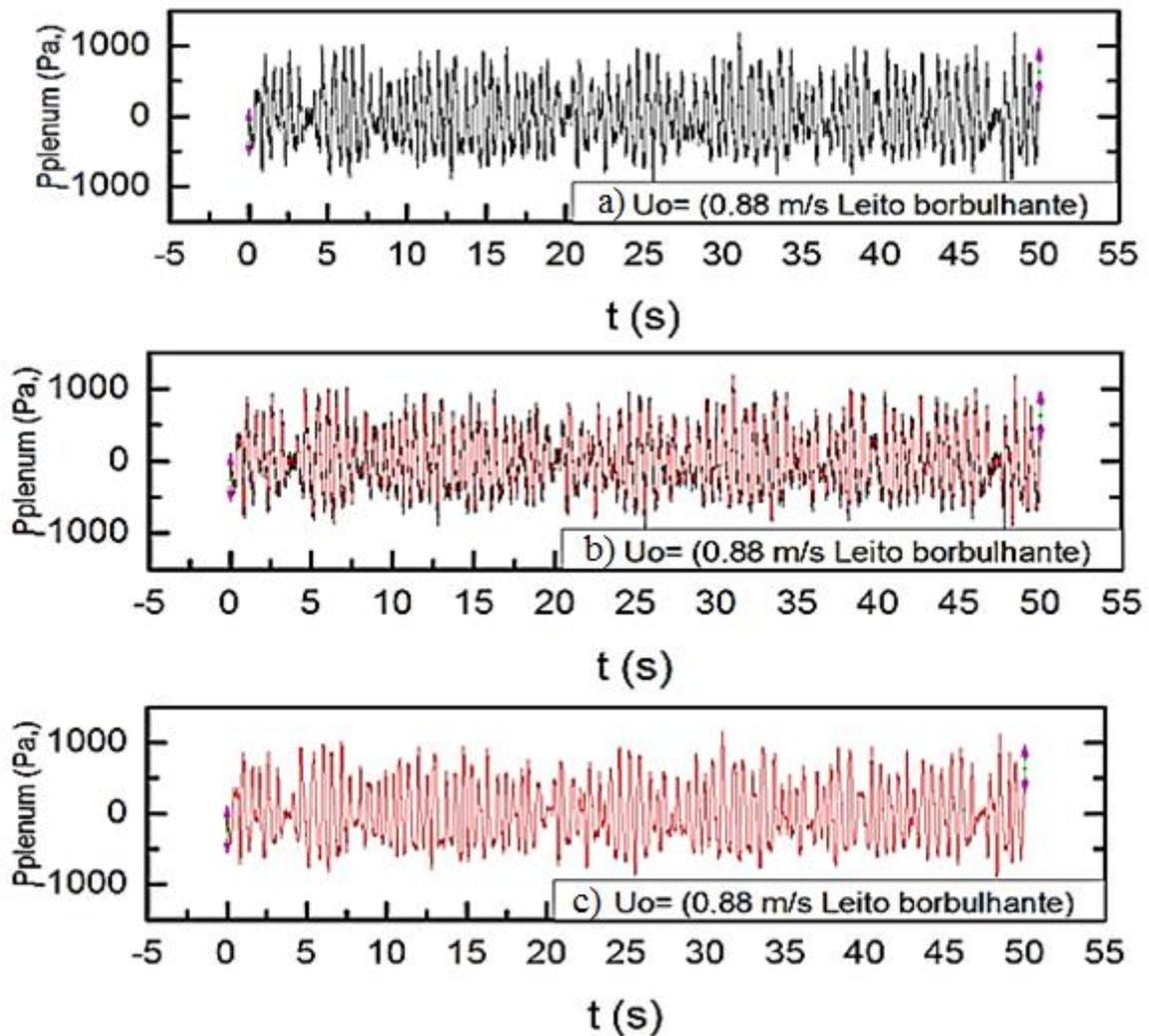


Figura 5.7 - Resultado do processo de filtragem do sinal aplicando a ferramenta FFT *smooth* com frequência de corte de 20 Hz. (a) sinal antes da filtragem, (b) comparação entre os sinais antes e após filtragem, (c) sinal filtrado.

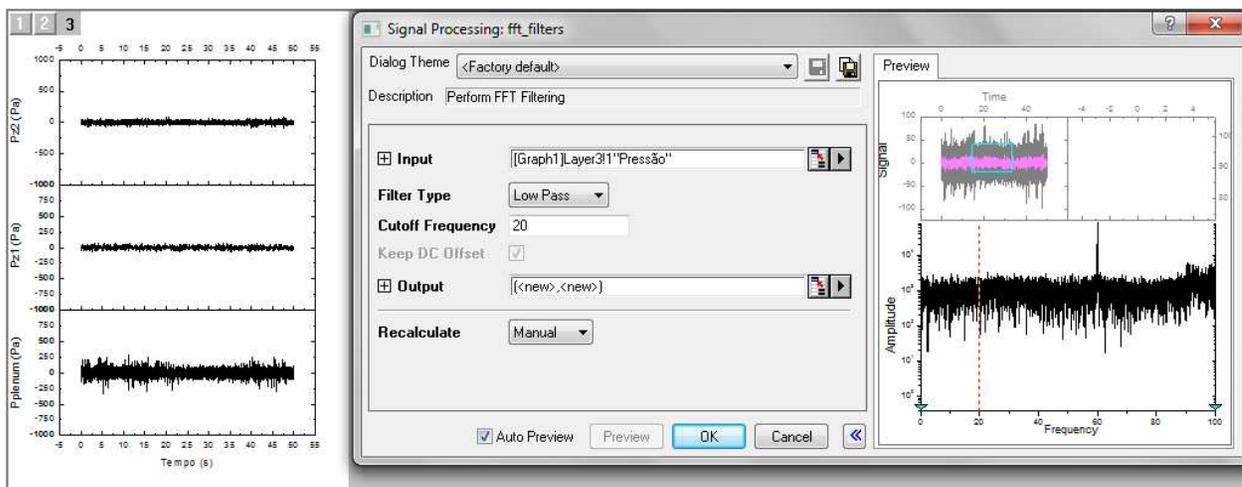


Figura 5.8 - Tela do software Origin 8.0 para uso da ferramenta FFT *Filter*(OriginLab, 2013).

Na figura 5.9 é apresentado o resultado do processo de filtragem pelos espectros de amplitude dos sinais. A Fig. 5.9 (a) mostra o espectro do sinal antes da filtragem. A Fig. 5.9 (c) mostra o espectro do sinal depois da filtragem já com a componente em 60 Hz atenuada. Na Fig. 5.9 (b) pode-se comparar os dois espectros, onde se verifica que pequena alteração ocorreu na região de interesse dos sinais do leito fluidizado abaixo de 20 Hz. Finalmente, a Fig. 5.9 (d) mostra o espectro do sinal filtrado de 0 a 20 Hz com três componentes dominantes em evidência.

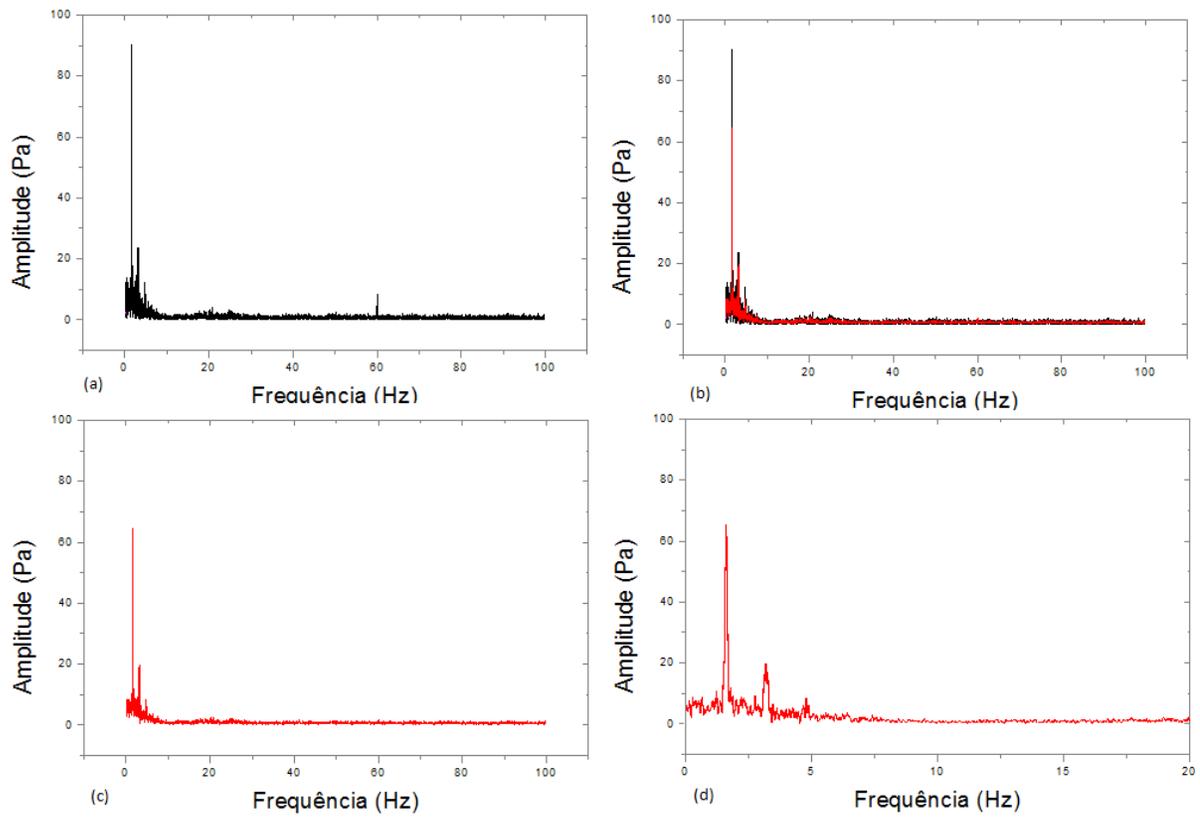


Figura 5.9 - Resultado do processo de filtragem do sinal através da ferramenta *FFT filter smoothing* com frequência de corte de 20 Hz: (a) espectro do sinal sem filtrar, (b) comparação entre o espectro filtrado e o espectro sem filtragem (c) espectro de amplitudes do sinal filtrado, (d) espectro do sinal filtrado na faixa de 0 a 20 Hz.

### 5.3. Determinação da velocidade de mínima fluidização pelo método da queda de pressão e pelo método do desvio padrão das flutuações de pressão

A partir dos dados de queda de pressão ( $\Delta P_L$ ) no leito contendo partículas de cada material isolado e do desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* ( $\sigma P_{plenum}$ ) em função da velocidade superficial do gás ( $U_o$ ) foram construídos gráficos de  $\Delta P_L$  vs  $U_o$  e de  $\sigma P_{plenum}$  vs  $U_o$ . O intuito desse procedimento foi comparar os resultados de velocidade mínima de fluidização obtidos pelos dois métodos para cada material isolado e obter experimentalmente o valor da velocidade de mínima fluidização de cada material estudado. Foi construída cada curva de queda de pressão junto ao gráfico do desvio padrão com dados adquiridos no *plenum* ( $P_{plenum}$ ), visando à comparação entre os dois métodos de determinação da velocidade de mínima fluidização.

A seguir, são apresentados os dois métodos utilizados nesta pesquisa para determinar a velocidade de mínima fluidização.

- Levantamento da curva fluidodinâmica a partir das medidas de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás.
- Análise das flutuações de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás.

A comparação entre os valores médios de  $U_{mf}$  e  $U_{mf,\sigma}$  foi feita calculando-se o desvio percentual entre os valores conforme Eq. 5.8.

$$\Delta \bar{U}_{mf}(\%) = \left| \frac{\bar{U}_{mf} - \bar{U}_{mf,\sigma}}{\bar{U}_{mf}} \right| \cdot 100 \quad (5.8)$$

#### 5.3.1. Método tradicional a partir da curva fluidodinâmica

Nesse método, foi empregada a metodologia descrita no Capítulo 4 com o propósito de estimar a velocidade de mínima fluidização do material estudado.

Para cada teste, a queda de pressão ( $\Delta P_L$ ) foi determinada para várias velocidades superficiais do gás ( $U_o$ ). Os dados de  $\Delta P_L$  foram obtidos a partir do valor relativo entre as

medidas de  $P_{plenum}$  e da queda de pressão na placa distribuidora ( $\Delta P_{distribuidor}$ ), Eq. 5.9. Nessa equação, o valor da pressão no plenum corresponde à média do sinal de pressão adquirida para cada velocidade superficial do gás testada.

$$\Delta P_L = P_{plenum} - \Delta P_{distribuidor} \quad (5.9)$$

A queda de pressão no distribuidor foi obtida experimentalmente sendo calculada através da equação mostrada no capítulo 3:

$$\Delta P_{distribuidor} = 18134(U_o)^{2,7} \quad (3.3)$$

A partir da vazão volumétrica de ar  $\dot{V}$  fornecida pela placa de orifício (apêndice D), a velocidade superficial do gás foi calculada,

$$U_o = \frac{(4V)}{\pi D_L^2} \quad (D.8)$$

Onde  $D_L$  é o diâmetro interno da coluna do leito

A velocidade de mínima fluidização,  $U_{mf}$ , foi determinada pela intersecção das retas correspondentes ao regime de leito fixo e de leito fluidizado. As retas foram obtidas pelo método de regressão linear de dois conjuntos de pontos selecionados nas faixas correspondentes ao leito fixo e ao leito fluidizado.

Este método foi utilizado tanto para os materiais isolados como para as misturas binárias. Conforme salientado anteriormente, nesta análise foram utilizados os dados adquiridos no *plenum* ( $P_{plenum}$ )

### 5.3.2. Método que analisa o desvio padrão das flutuações de pressão

A determinação da velocidade de mínima fluidização através das flutuações de pressão está baseada no método proposto por Puncochar *et al.* (1985), apresentado no item 2.4.

Após a coleta dos sinais de flutuações de pressão, com os três transdutores, nas posições do plenum  $z_1$  e  $z_2$ , é feito o procedimento descrito no item 5.1 para obtenção de  $PN_k$ .

O desvio padrão ( $\sigma P$ ) foi calculado por:

$$\sigma P = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (PN_k - \overline{PN})^2} \quad (5.10)$$

Onde:

$$\overline{PN} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N PN_k \quad (5.11)$$

Depois de ter calculado o desvio padrão para cada sinal adquirido nos testes, é aplicado o método proposto por Puncochar *et al.* (1985) para a determinação da velocidade de mínima fluidização, descrito no capítulo 2 de revisão de literatura.

Este método foi utilizado tanto para os materiais isolados como para as misturas binárias.

### 5.4. Determinação das velocidades inerentes ao fenômeno de segregação de partículas em leitos fluidizados gás-sólido contendo misturas binárias

Para a determinação da velocidade do início da fluidização ( $U_{fi}$ ), assim como a velocidade de fluidização completa ( $U_{fc}$ ) e a velocidade de segregação ( $U_s$ ), foram adquiridos sinais de flutuação de pressão seguindo o mesmo procedimento adotado para os materiais isolados, como descrito no item 4.2.3.

Também foi analisada a variação da curva do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás. O desvio padrão dos sinais de pressão ( $\sigma P$ ) foi calculado

seguindo a metodologia utilizada para os materiais isolados, ou seja,  $\sigma P$  foi calculado visando relacionar o comportamento dos sinais adquiridos com o regime de contato gás-sólido e com a qualidade da fluidização.

A figura 5.10 mostra a influência da velocidade superficial do gás na queda de pressão do leito ( $\Delta P_L$ ) e no desvio padrão das flutuações de pressão medidas com o transdutor na posição do plenum ( $\sigma P_{plenum}$ ) em relação ao teste preliminar feito para a mistura de plástico e vidro grosso (PL-VG).

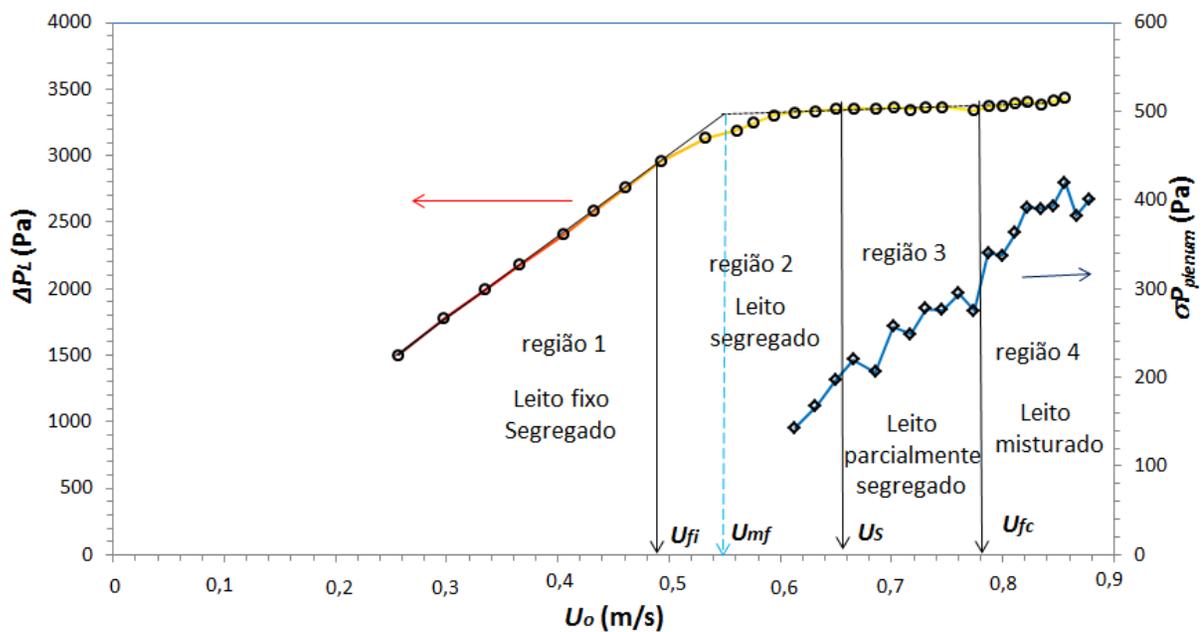


Figura 5.10 - Curvas da queda de pressão e desvio padrão medido no plenum em função da velocidade superficial do gás, mistura (PL-VG).

A curva do desvio padrão ( $\sigma P_{plenum}$ ) mostrada na Fig. 5.10 apresenta a velocidade de fluidização completa ( $U_{fc}$ ) e a velocidade do gás onde acontece a segregação completa ( $U_s$ ). Essas velocidades foram identificadas pelo súbito incremento de  $\sigma P$  com a redução progressiva da velocidade do gás. No gráfico são identificadas pelas maiores deflexões ou picos observados.

As velocidades  $U_{fi}$  e  $U_{mf}$  foram identificadas a partir da curva de queda de pressão do leito ( $\Delta P_L$ ) com a velocidade superficial do gás  $U_o$ .

A velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) foi determinada, seguindo a mesma metodologia que foi utilizada nos materiais homogêneos.

A velocidade de fluidização inicial ( $U_{fi}$ ) foi identificada pelo ponto onde os sinais de pressão adquiridos no regime de leito fixo desviam-se da linha reta característica desta região.

A definição destas velocidades foi apresentada na revisão de literatura (item 2.5).

A partir do conhecimento destas três velocidades, foi possível realizar um mapeamento na curva fluidodinâmica e determinar quatro regiões, além disso, para as análises no domínio do tempo e no domínio da frequência foram adotados 14 sinais de pressão obtidos em diferentes valores de  $U_o$ , onde se procurou apresentar o fenômeno da segregação e cada região característica do leito conforme Fig.5.10, a saber:

- Região 1, leito fixo segregado;
- Velocidade inicial da fluidização,  $U_{fi}$ , delimitação entre as regiões 1 e 2;
- Região 2, leito borbulhante segregado;
- Velocidade de segregação completa,  $U_s$ , delimitação entre as regiões 2 e 3;
- Região 3, leito borbulhante parcialmente segregado;
- Velocidade de fluidização completa,  $U_{fc}$ , delimitação entre as regiões 3 e 4;
- Região 4, leito borbulhante, misturado.

O desvio porcentual para as velocidades do gás inerentes ao fenômeno da segregação foi calculado pela Eq. 5.12.

$$\Delta U_i(\%) = \left| \frac{U_i - \bar{U}_i}{\bar{U}_i} \right| \cdot 100 \quad (5.12)$$

Onde  $U_i$  é a velocidade do gás ( $U_{mf}$ ,  $U_{mf,\sigma}$ ,  $U_{fi}$ ,  $U_s$  e  $U_{fc}$ ) e  $\bar{U}_i$  é o valor médio da velocidade do gás ( $\bar{U}_{mf}$ ,  $\bar{U}_{mf,\sigma}$ ,  $\bar{U}_{fi}$ ,  $\bar{U}_s$  e  $\bar{U}_{fc}$ ) considerando as três repetições realizadas.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES: VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO E ANÁLISES NO DOMÍNIO DO TEMPO

Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes às análises nos sinais de flutuação de pressão no espaço do tempo tanto dos experimentos com materiais isolados quanto com misturas binárias.

Os seguintes aspectos são discutidos.

- Determinação da velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ;  $U_{mf,\sigma}$ ), para materiais isolados.
- Análises da velocidade superficial do gás e regiões de fluidização inerentes ao fenômeno da segregação para cada uma das misturas estudadas.
- Comportamento dos sinais de flutuações de pressão no domínio do tempo para cada uma das mistura estudada.

### 6.1. Determinação da velocidade de mínima fluidização para materiais isolados

Neste item, são apresentados os resultados obtidos para a velocidade de mínima fluidização para os três materiais isolados utilizados na pesquisa (vidro fino, vidro grosso e plástico). Nas Fig. 6.1 a 6.6 são indicados os valores da velocidade de mínima fluidização pelo método tradicional da curva fluidodinâmica apresentado no item 5.3.1, simbolizada por  $U_{mf}$  e também pelo método do desvio padrão das flutuações de pressão descrito no item 5.3.2, simbolizada por  $U_{mf,\sigma}$ . Além disso, são apresentadas expressões das retas ajustadas a partir dos pontos de desvio padrão, bem como os valores dos coeficientes de correlação.

A escala escolhida para o eixo da ordenada mostrado nas figuras correspondentes ao material *VF* e *PL* nas posições  $z_1$  e  $z_2$ , representa cercada metade da escala utilizada para as figuras relativas ao material *VG*. Esse procedimento foi adotado visando uma melhor qualidade do gráfico e melhor visualização dos resultados.

### 6.1.1. Microesferas de vidro fino

A figura 6.1 apresenta a curva fluidodinâmica da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás para o teste  $(VF)_1$ . Adicionalmente, são apresentadas as correspondentes curvas do desvio padrão da pressão para os dados obtidos no *plenum* (Fig. 6.1) e na coluna do leito na posição  $z_1$  e  $z_2$  (Fig. 6.2).

Os resultados das repetições [testes  $(VF)_2$  e  $(VF)_3$ ] são apresentados no apêndice C, item C.1.

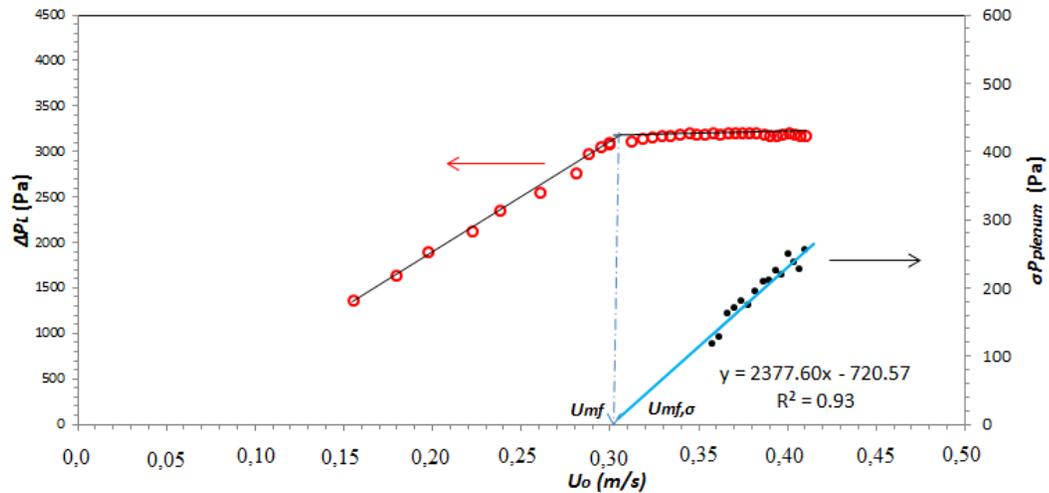


Figura 6.1 - Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* em função da  $U_o$  com vidro fino  $(VF)_1$ .

A análise das velocidades de mínima fluidização ( $U_{mf}$  e  $U_{mf,\sigma}$ ) e a comparação entre elas para o vidro fino e para os outros materiais isolados ( $VG$  e  $PL$ ) serão discutidas no item 6.1.4.

A figura 6.2 apresenta as curvas do desvio padrão da pressão para os dados obtidos através dos transdutores instalados em  $z_1$  e  $z_2$  acima da placa distribuidora, visando a verificação da influência da localização da tomada de pressão.

A tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos para a velocidade de mínima fluidização das partículas de vidro fino. Os traços indicados nesta tabela indicam experimentos não realizados.

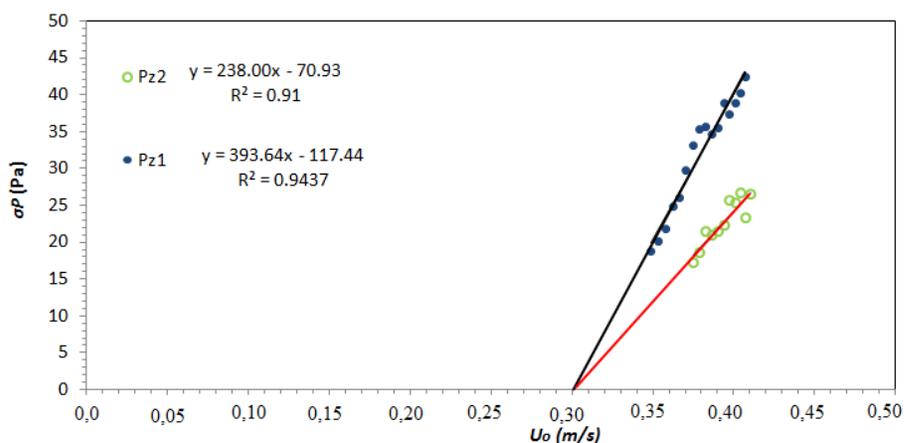


Figura 6.2 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás com vidro fino ( $VF_1$ ).

Tabela 6.1– Resultados na determinação da velocidade de mínima fluidização para o vidro fino

Materia 1	Transdutor	$U_{mf}$ (m/s)	$\bar{U}_{mf}$ (m/s)	$U_{mf,\sigma}$ (m/s)	$\bar{U}_{mf,\sigma}$ (m/s)	$\Delta U_{mf,\sigma}$ para cada transdutor $\left  \frac{U_{mf,\sigma} - \bar{U}_{mf,\sigma}}{\bar{U}_{mf,\sigma}} \right  \cdot 100$ (%)	$\Delta \bar{U}_{mf}$ $\left  \frac{\bar{U}_{mf,\sigma} - \bar{U}_{mf}}{\bar{U}_{mf}} \right  \cdot 100$ (%)
Vidro fino VF	VF1, Pplenu m	0,30	<b>0,30±0,0 1</b>	0,30	<b>0,30±0,01</b>	0,0	0,0
	VF2, Pplenu m	0,30		0,30		0,0	
	VF3, Pplenu m	0,31		0,30		3,2	
	VF1, PZ1	-	-	0,30	<b>0,29±0,01</b>	3,4	3,3
	VF2, PZ1	-	-	0,29		0,0	
	VF3, PZ1	-	-	0,29		0,0	
	VF1, PZ2	-	-	0,30	<b>0,30±0,01</b>	0,0	0,0
	VF2, PZ2	-	-	0,29		1,5	
	VF3, PZ2	-	-	0,29		1,5	
				<b>Valor médio</b>	<b>0,30±0,0 1</b>		

Na tabela 6.1 são apresentados os resultados de  $U_{mf,\sigma}$  obtidos em cada teste realizado e o desvio observado entre as medidas ( $\Delta U_{mf,\sigma}$ ). Também são incluídos o desvio porcentual entre os valores médios de  $U_{mf}$ , obtidos pelo método tradicional, e os valores obtidos através das medidas de flutuações de pressão a partir dos transdutores instalados no *plenum*, em  $z_1$  e em  $z_2$  ( $\Delta U_{mf}$ ).

Os resultados indicaram uma boa concordância entre os valores obtidos, com desvios máximos de 3,4%.

Nesta tabela é possível verificar que o máximo desvio observado, considerando os valores médios, foi de 3,3%, para o transdutor localizado em  $z_1$ . Os resultados mostram que a medida da velocidade de mínima fluidização pode ser feita por qualquer um dos métodos adotados, com afastamento máximo inferior a 5% entre os métodos.

### 6.1.2. Microesferas de vidro grosso

Da mesma forma, as Figs. 6.3 e 6.4 apresentam os gráficos utilizados para a determinação da velocidade de mínima fluidização para o vidro grosso [teste (VG)<sub>1</sub>]. Os resultados das repetições [testes (VG)<sub>2</sub> e (VG)<sub>3</sub>] são apresentados no apêndice C, item C.1.

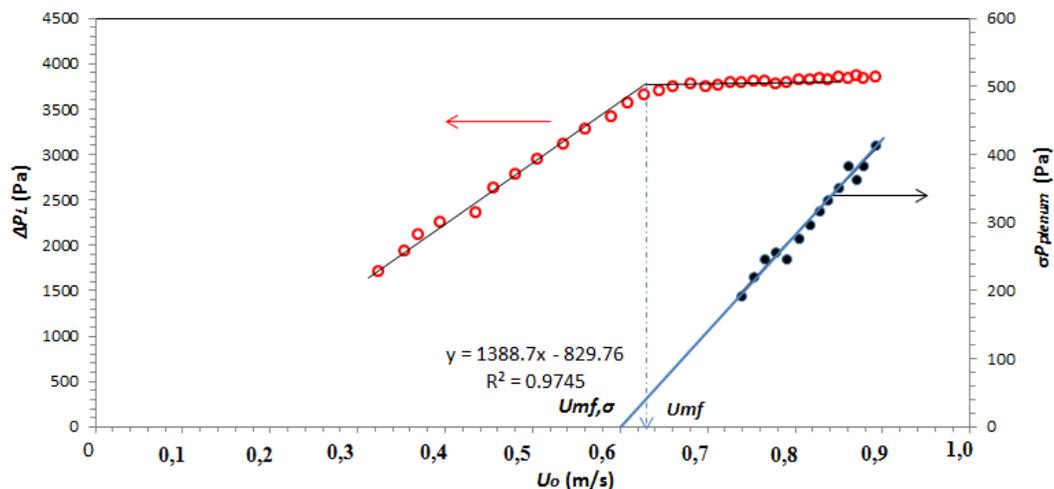


Figura 6.3 - Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  com vidro grosso (VG)<sub>1</sub>.

Na Figura 6.3 pode-se ver que os dois métodos estudados atingem a mesma velocidade de mínima fluidização. O valor de  $U_{mf}$  obtido para as partículas de  $VG$  é muito diferente do obtido para as partículas de  $VF$ . Essa discussão será apresentada no item 6.1.4.

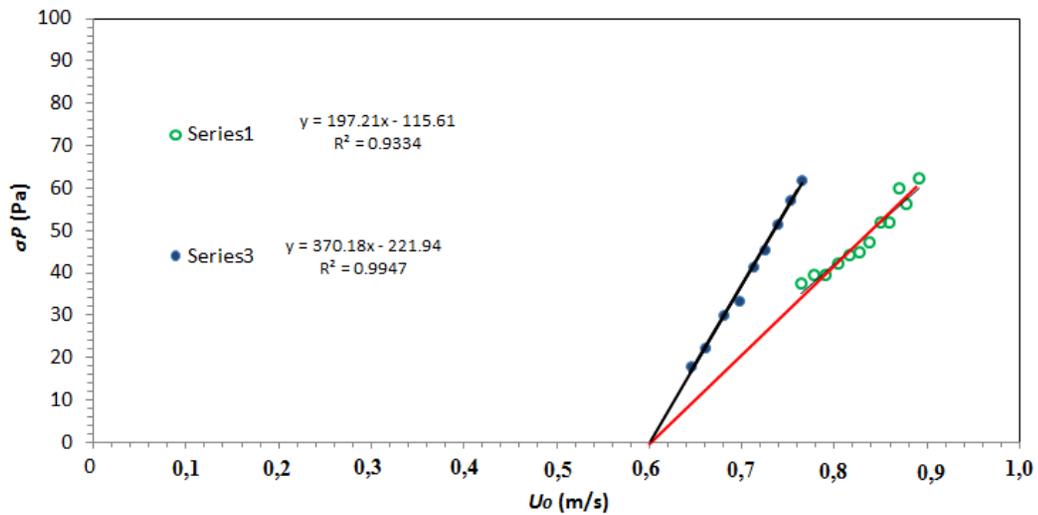


Figura 6.4 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás com vidro grosso ( $VG_1$ )

Na Tabela 6.2 são apresentados os valores e resultados da velocidade de mínima fluidização calculados para o vidro grosso.

Tabela 6.2– Resultados na determinação da velocidade de mínima fluidização para o vidro grosso

Material	Transdutor	$U_{mf}$ (m/s)	$\bar{U}_{mf}$ (m/s)	$U_{mf,\sigma}$ (m/s)	$\bar{U}_{mf,\sigma}$ (m/s)	$\Delta U_{mf,\sigma}$ para cada transdutor $\left  \frac{U_{mf,\sigma} - \bar{U}_{mf,\sigma}}{\bar{U}_{mf,\sigma}} \right  \cdot 100$ (%)	$\Delta \bar{U}_{mf}$ $\left  \frac{\bar{U}_{mf,\sigma} - \bar{U}_{mf}}{\bar{U}_{mf}} \right  \cdot 100$ (%)
Vidro grosso VG	VG1, Pplenum	0,64	<b>0,63±0,05</b>	0,62	<b>0,60±0,01</b>	3,1	4,8
	VG2, Pplenum	0,62		0,60		3,1	
	VG3, Pplenum	0,62		0,59		4,8	
	VG1, Pz1	-	-	0,60	<b>0,59±0,01</b>	1,7	6,3
	VG2, Pz1	-	-	0,58		1,7	
	VG3, Pz1	-	-	0,58		1,7	
	VG1, Pz2	-	-	0,60	<b>0,58±0,01</b>	3,4	7,9
	VG2, Pz2	-	-	0,56		3,4	
	VG3, Pz2	-	-	0,57		1,7	
					<b>Valor médio</b>	<b>0,59±0,01</b>	

Na tabela 6.2 são apresentados os resultados de  $U_{mf,\sigma}$  obtidos em cada teste realizado e o desvio observado entre as medidas ( $\Delta U_{mf,\sigma}$ ), da mesma forma que na Tab. 6.1.

Os resultados indicaram uma boa concordância entre os valores obtidos, com desvios máximos de 4,8%.

Nesta tabela é possível verificar que o máximo desvio observado, considerando os valores médios, foi de 7,9%, o qual foi obtido para o transdutor localizado em  $z_2$ , e o menor desvio (4,8%) ocorreu para as medidas realizadas no *plenum*. Os resultados para este material mostram que a medida da velocidade de mínima fluidização pode ser feita por qualquer um dos métodos adotados, com afastamento máximo inferior a 10% entre os métodos.

### 6.1.3. Microesferas de plástico

Nas figuras 6.5 e 6.6 são apresentados os gráficos utilizados para a determinação da velocidade de mínima fluidização para o plástico. Os resultados obtidos nas repetições [teste  $(PL)_2$  e  $(PL)_3$ ] são apresentados no apêndice C item C.1.

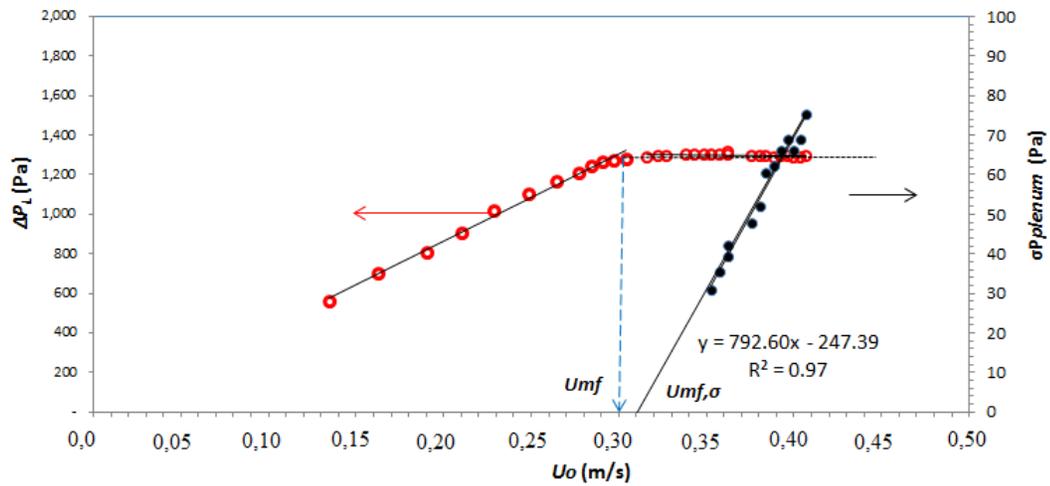


Figura 6.5 – Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  com o plástico ( $PL_1$ ).

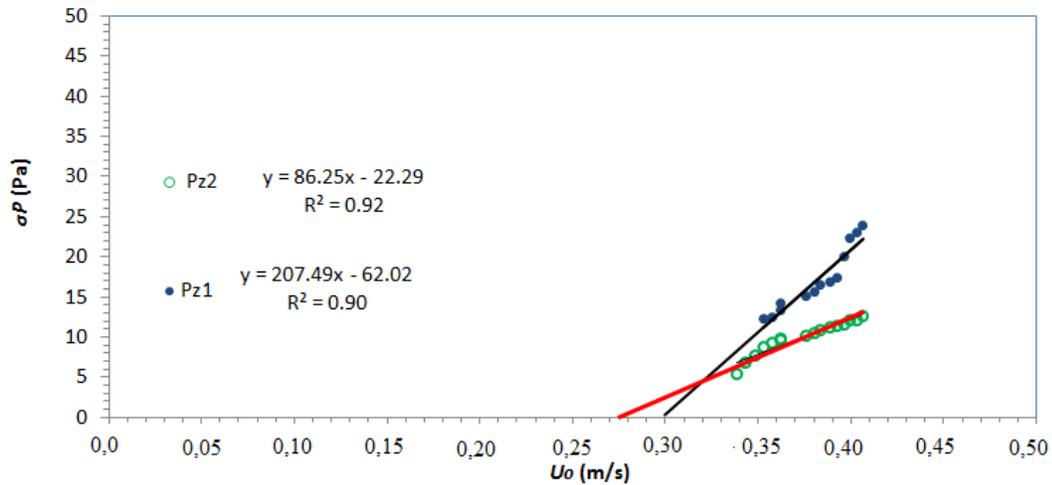


Figura 6.6 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás com o plástico ( $PL_1$ )

Este material apresentou maior dispersão de pontos para os dados correspondentes às tomadas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$ , apresentando maiores desvios entre os resultados obtidos a partir de  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ . Esse resultado será discutido no item 6.1.4.

Na Tabela 6.3 são apresentados os valores e resultados da velocidade de mínima fluidização calculados para o vidro grosso.

Tabela 6.3– Resultados na determinação da velocidade de mínima fluidização para o plástico

Materia 1	Transdutor	$U_{mf}$ (m/s)	$\bar{U}_{mf}$ (m/s)	$U_{mf,\sigma}$ (m/s)	$\bar{U}_{mf,\sigma}$ (m/s)	$\Delta U_{mf,\sigma}$ para cada transdutor $\left  \frac{U_{mf,\sigma} - \bar{U}_{mf,\sigma}}{\bar{U}_{mf,\sigma}} \right  \cdot 100$ (%)	$\Delta \bar{U}_{mf}$ $\left  \frac{\bar{U}_{mf,\sigma} - \bar{U}_{mf}}{\bar{U}_{mf}} \right  \cdot 100$ (%)
Plástico PL	PL1, Pplenum	0,30	<b>0,29±0,0 1</b>	0,31	<b>0,30±0,01</b>	3,3	3,4
	PL2, Pplenum	0,29		0,30		0,0	
	PL3, Pplenum	0,30		0,30		0,0	
	PL1, PZ1	-	-	0,30	<b>0,29±0,01</b>	3,4	0,0
	PL2, PZ1	-	-	0,28		3,4	
	PL3, PZ1	-	-	0,30		3,4	
	PL1, PZ2	-	-	0,28	<b>0,28±0,01</b>	0,0	3,4
	PL2, PZ2	-	-	0,27		3,5	
	PL3, PZ2	-	-	0,30		7,1	
				<b>Valor médio</b>	<b>0,59±0,0 1</b>		

Na tabela 6.3 os resultados são apresentados da mesma forma como nas Tab. 6.1 e 6.2

Os resultados indicaram uma boa repetitividade entre os valores obtidos, com desvios máximos de 7,1%.

Nesta tabela é possível verificar que o máximo desvio obtido, considerando os valores médios, foi de 3,4%, o que indica que a medida da velocidade de mínima fluidização pode ser feita por qualquer um dos métodos adotados, com afastamento inferior a 5% entre os métodos.

#### 6.1.4. Análise geral da velocidade de mínima fluidização para os materiais isolados

Na Tabela 6.4, são apresentados, para os três materiais estudados, os resultados médios obtidos na determinação da velocidade de mínima fluidização a partir dos dois métodos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 6.4 - Resultados da determinação da velocidade de mínima fluidização e desvio porcentual para os materiais isolados

<b>Material</b>	$\bar{U}_{mf}$ (m/s)	$\bar{U}_{mf,\sigma}$ (m/s)	$\left  \frac{\bar{U}_{mf} - \bar{U}_{mf,\sigma}}{\bar{U}_{mf,\sigma}} \right  \cdot 100$ (%)
<i>Vidro fino (VF)</i>	0,30	0,30	0,0
<i>Vidro grosso (VG)</i>	0,61	0,59	5,2
<i>Plástico (PL)</i>	0,29	0,29	0,0

Verifica-se que os desvios obtidos entre os dois métodos para os três materiais estiveram entre 0 e 5,2%, indicando que ambos os métodos podem ser utilizados para a determinação da velocidade de mínima fluidização dos materiais.

Os resultados obtidos permitiram verificar o funcionamento dos transdutores de pressão nas diferentes posições e estimar os parâmetros para aquisição de dados (taxa de amostragem e número de amostras) adequados para o estudo do fenômeno da segregação. A comparação entre  $U_{mf}$  e  $U_{mf,\sigma}$  foi feita com o desvio porcentual dado pela Eq. 5.8 mostrada no capítulo 5 de redução de dados.

## **6.2. Mistura de microesferas de vidro fino e vidro grosso (VF-VG)**

Neste item, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com a mistura contendo 5% (em massa) de partículas de vidro fino (diâmetro médio de 462  $\mu\text{m}$ ) e 95% de partículas de vidro grosso (diâmetro médio de 959  $\mu\text{m}$ ). A metodologia adotada permitiu a identificação de regiões com comportamentos fluidodinâmicos diferentes, bem como a determinação das velocidades inerentes ao fenômeno de segregação. Também o comportamento das flutuações de pressão para a mistura VF-VG é apresentado e discutido.

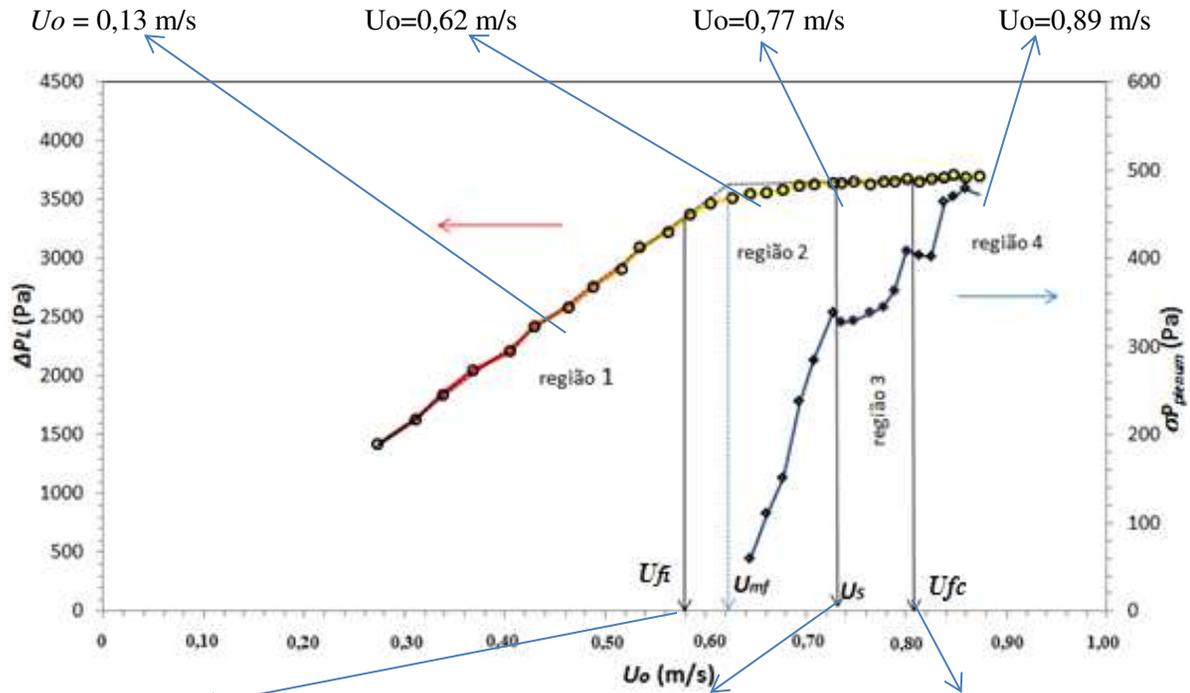
### **6.2.1. Determinação das regiões de fluidização e das velocidades superficiais do gás de transição inerentes ao fenômeno de segregação para a mistura (VF-VG)**

As figuras 6.7 e 6.8 apresentam a queda de pressão do leito e a Fig. 6.9 mostra a curva do desvio padrão da pressão medida no *plenum* em função de  $U_o$ . Esses resultados foram obtidos para o primeiro teste envolvendo a mistura (VF-VG)<sub>1</sub>. Nas Figs. 6.8 e 6.9 são apresentadas as curvas obtidas para cada componente da mistura, identificados por (VF)<sub>1</sub> e (VG)<sub>1</sub>, visando uma comparação entre o comportamento da mistura e seus componentes isolados.

Na figura 6.7 também estão apresentadas as fotos correspondentes a cada estado de fluidização analisados para os sinais no domínio do tempo.



Leito fixo segregado Leito segregado leito parcialmente segregado Leito misturado.



Delimitação entre regiões 1 e 2  $U_o = 0,59$  m/s  
 Delimitação entre regiões 2 e 3  $U_o = 0,73$  m/s  
 Delimitação entre regiões 3 e 4  $U_o = 0,80$  m/s

Figura 6.7– Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* em função da velocidade superficial do gás com a mistura  $(VF-VG)_I$ .

Na figura 6.7 é possível verificar as etapas do fenômeno da segregação onde se observa nas regiões 1 e 2, a presença de vidro fino no topo do leito (cor clara), enquanto que nas regiões 3 e 4 os materiais estão parcialmente (região 3) ou totalmente (região 4) misturados.

Na figura 6.8, obtida a partir das medidas realizadas com o transdutor no plenum, pode-se verificar que o comportamento da mistura é influenciado pelos seus componentes. Os valores da curva da mistura ficam entre os valores das curvas dos materiais isolados. A velocidade de mínima fluidização obtida apresenta um valor muito próximo da  $U_{mf}$  do vidro grosso, sendo a  $U_{mf}$  da mistura levemente inferior.

Na Fig. 6.9 são apresentadas as curvas do desvio padrão para o transdutor no *plenum*, em função da  $U_o$ , tanto para a mistura como para os materiais isolados. Verifica-se que a curva correspondente à mistura situa-se entre as curvas correspondentes aos dois materiais que a compõem, como seria esperado. A aplicação da metodologia descrita no capítulo 5 (item 5.4) na curva levantada para a mistura permitiu identificar as velocidades de segregação ( $U_S$ ) e de fluidização completa ( $U_{fc}$ )

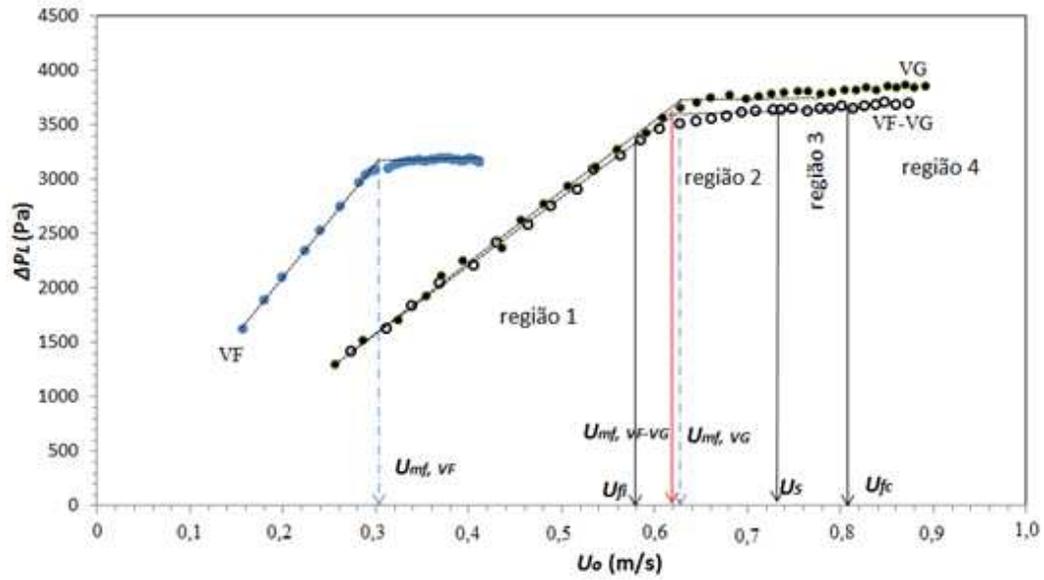


Figura 6.8– Queda de pressão em função da velocidade superficial do gás medido no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) com os materiais  $(VF)_I$ ,  $(VG)_I$  e mistura  $(VF-VG)_I$

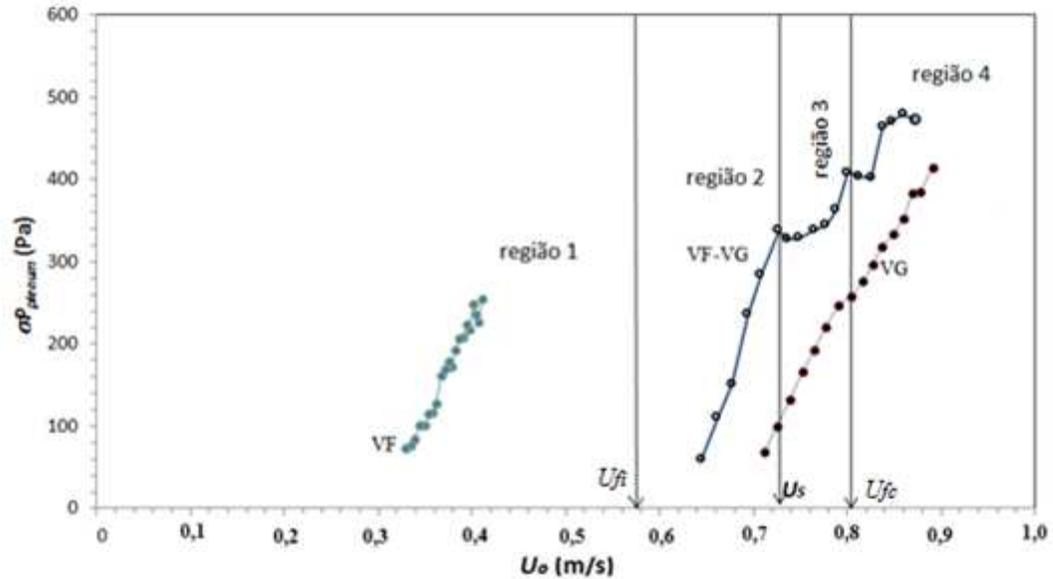


Figura 6.9 - Desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) em função da velocidade superficial do gás com os materiais  $(VF)_I$ ,  $(VG)_I$  e mistura  $(VF-VG)_I$

As figuras 6.10 e 6.11 apresentam os resultados obtidos em  $z_1$  e em  $z_2$  para a queda de pressão do leito e para o desvio padrão das flutuações de pressão, em função de  $U_o$ , para o primeiro teste envolvendo a mistura identificada como  $(VF-VG)_1$ . Os resultados obtidos nos ensaios 2 e 3 estão apresentados no apêndice C (item C.2).

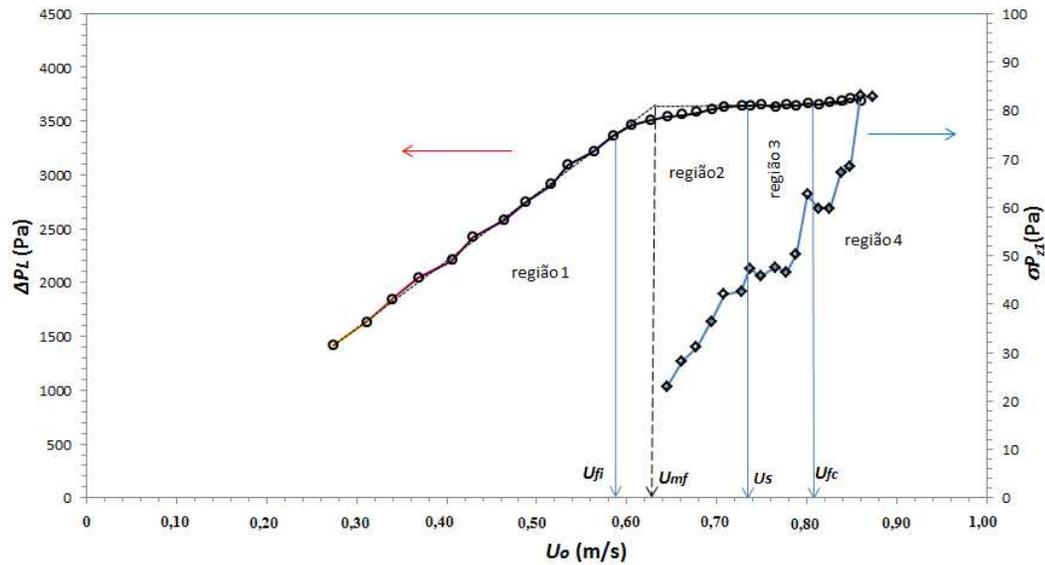


Figura 6.10 - Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  em função da velocidade superficial do gás com a mistura  $(VF-VG)$ .

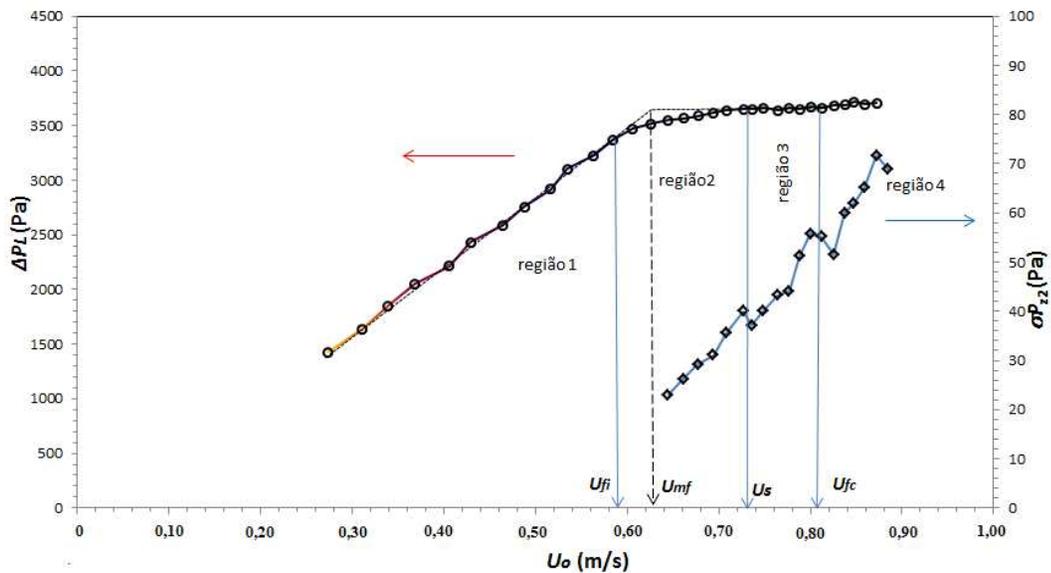


Figura 6.11 - Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão em  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás com a mistura  $(VF-VG)$ .

As figuras 6.10 e 6.11 mostram que também nas posições  $z_1$  e  $z_2$  é possível identificar as velocidades inerentes ao fenômeno de fluidização e de segregação, conforme já identificado para a tomada no *plenum*.

A discussão dos resultados gerais obtidos partir dos sinais de pressão coletados para a mistura *VF-VG* está apresentada no item 6.5 junto com os resultados das misturas *PL-VG* e *PL-VF*.

A partir dos dados do primeiro ensaio de cada material e da mistura, foram construídos gráficos do desvio padrão dos sinais obtidos em  $z_1$  e  $z_2$  versus a velocidade superficial do gás. O intuito foi comparar as flutuações de pressão a partir do desvio padrão dos sinais de pressão adquiridos pelos dois transdutores instalados na parede do riser, que estão em contato direto com o material do leito (Figs. 6.12 e 6.13).

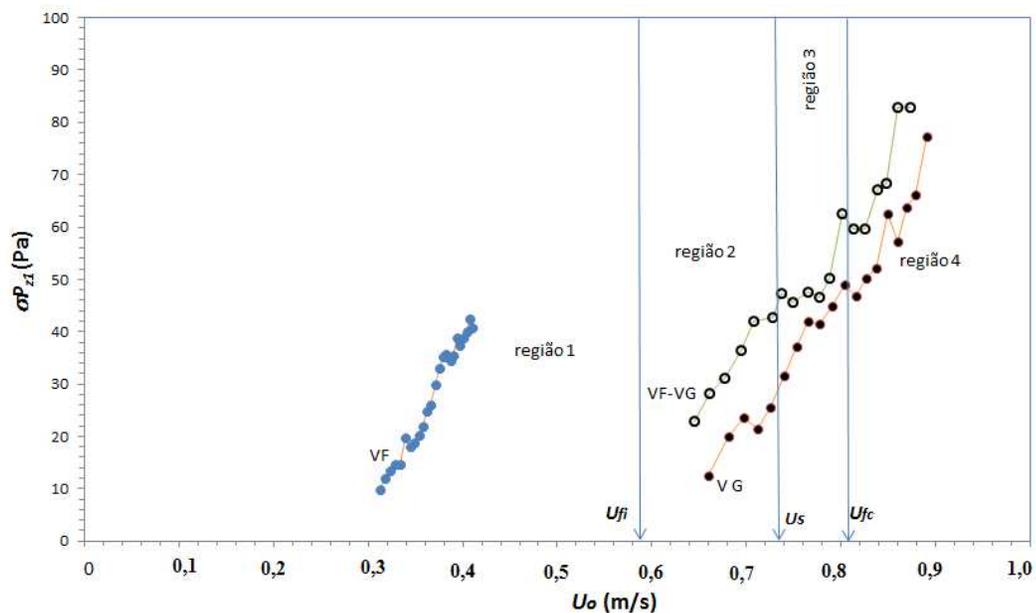


Figura 6.12 - Desvio padrão das medidas de pressão medidos em  $z_1$  em função da velocidade superficial do gás com os materiais  $[(VF)_1, (VG)_1$  e mistura  $(VF-VG)_1]$

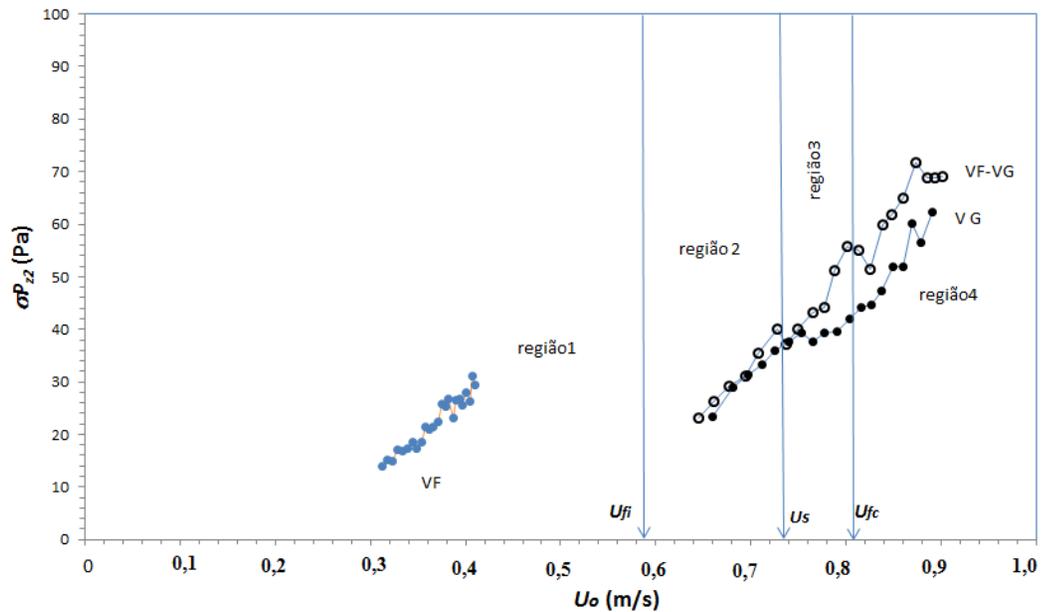


Figura 6.13 - Desvio padrão das medidas de pressão medidos em  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás com os materiais [(VF)<sub>1</sub>, (VG)<sub>1</sub> e mistura (VF-VG)<sub>1</sub>]

- **Análises da velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf,\sigma}$ ) para mistura binária (VF-VG)<sub>1</sub>**

As figuras 6.14 a 6.16 apresentam resultados obtidos para a mistura de vidro fino e vidro grosso (VF-VG) em seu primeiro teste. Nestes gráficos são apresentadas comparações entre a velocidade de mínima fluidização pelo método da queda de pressão e pelo método do desvio padrão das flutuações de pressão.

Para esta análise foi utilizada a metodologia proposta por Puncochar et al. (1986), entretanto, em função do fenômeno de segregação, procurou-se obter  $U_{mf,\sigma}$  a partir dos dados levantados em diferentes regiões (regiões 2, 3 e 4, o que significa utilizar todos os dados levantados, região 2 onde o leito estava segregado e regiões 3 e 4 onde o leito estava parcialmente segregado ou misturado). A análise foi realizada para o transdutor do plenum onde as curvas apresentavam maiores desvios de inclinação em comparação aos transdutores localizados em  $z_1$  e em  $z_2$ .

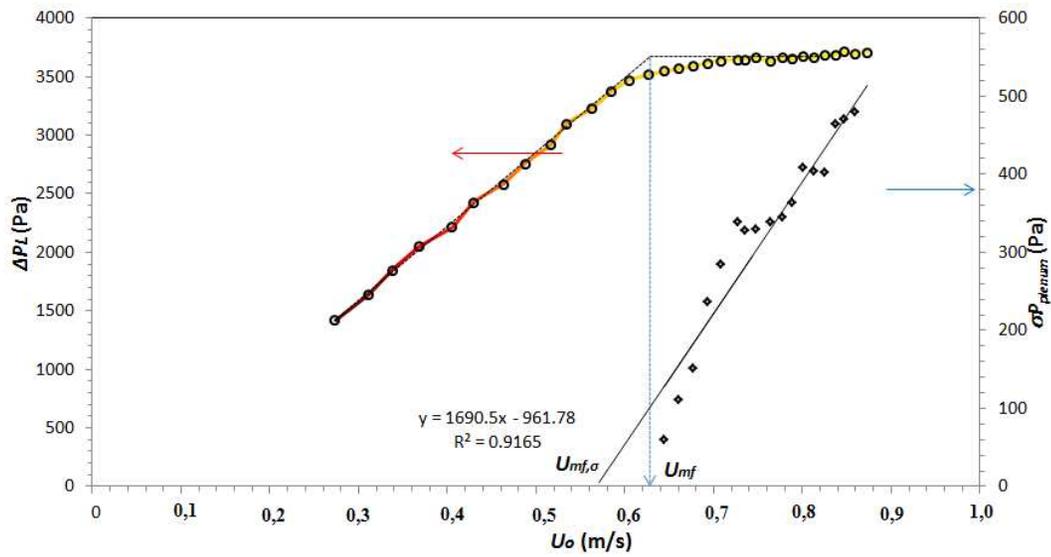


Figura 6.14 - Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* em função da  $U_o$  para a mistura  $(VF-VG)_1$  ( $U_{mf,\sigma}$  obtido levando-se em conta todos os dados levantados, ou seja, regiões 2, 3 e 4).

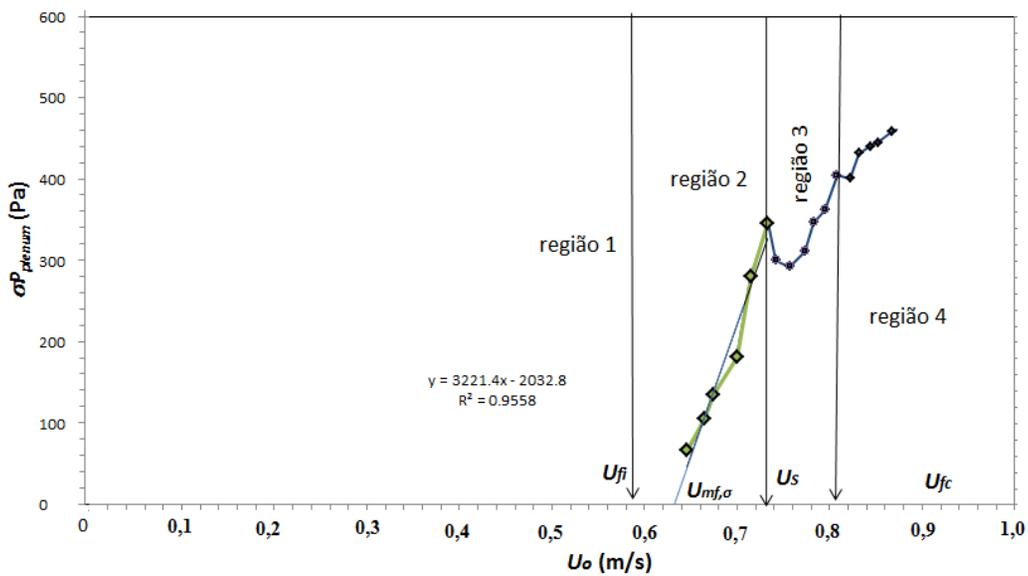


Figura 6.15 - Desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  para a mistura  $(VF-VG)_1$  ( $U_{mf,\sigma}$  obtido levando-se em conta apenas os dados levantados na região 2).

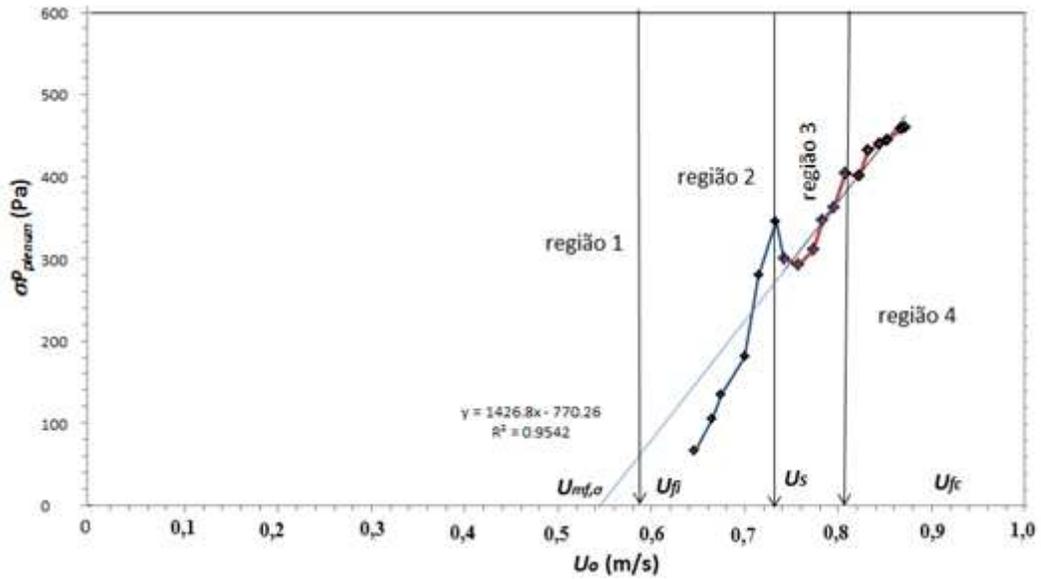


Figura 6.16 - Desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  com a mistura  $(VF-VG)_I$ , ( $U_{mf,\sigma}$  obtido levando-se em conta apenas os dados levantados nas regiões 3 e 4).

As Figuras 6.17 e 6.18 mostram as curvas levantadas a partir dos sinais medidos nos transdutores situados em  $z_1$  e  $z_2$ .

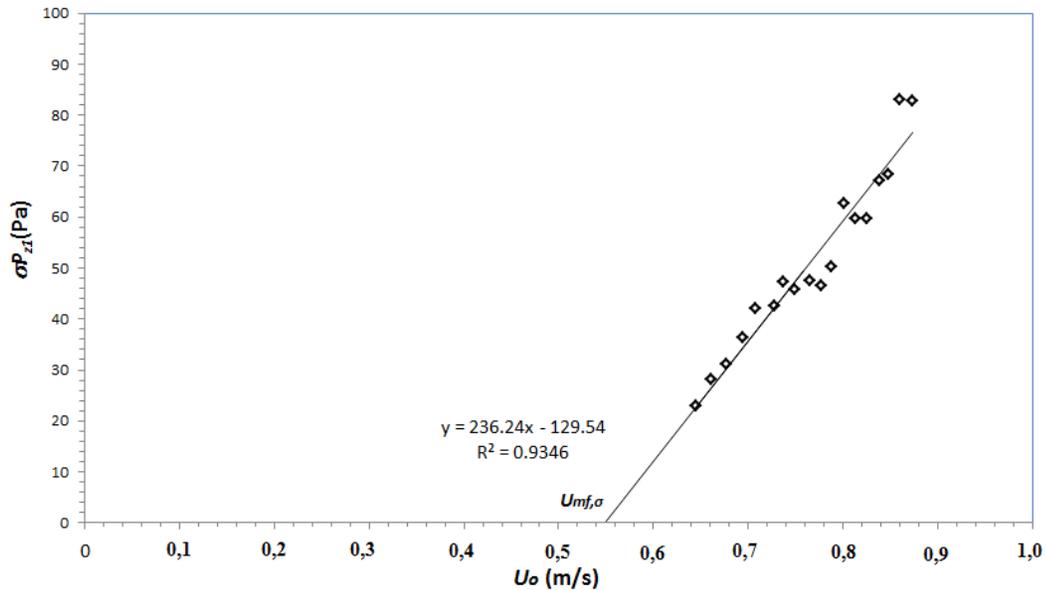


Figura 6.17 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $P_{z_1}$  como função da  $U_o$  com a mistura  $(VF-VG)_I$

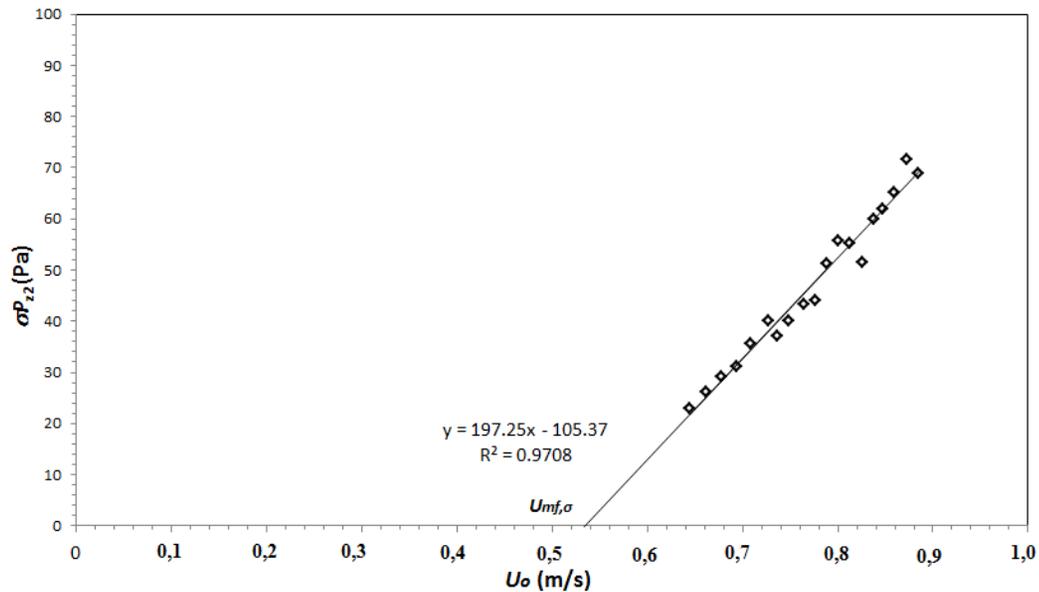


Figura 6.18 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $P_{z2}$  como função da  $U_o$  com a mistura  $(VF-VG)_I$

Na tabela 6.5 são apresentados os resultados obtidos para a velocidade de mínima fluidização da mistura  $(VF-VG)_I$ , tanto pelo método tradicional ( $U_{mf}$ ) como por três variações do método baseado na medida do desvio padrão das medidas de pressão ( $U_{mf,\sigma}$ ) para o transdutor do plenum, além dos resultados obtidos a partir das medidas obtidas pelos transdutores localizados em  $z_1$  e em  $z_2$ . Nela pode-se observar que, utilizando diferentes pontos da curva do desvio padrão, os resultados de  $U_{mf,\sigma}$  diferem consideravelmente. Assim, mostra-se o resultado obtido a partir de todos os pontos de desvio padrão das medidas de pressão no plenum levantados nos ensaios (regiões 2, 3 e 4), além dos resultados que consideram apenas os pontos na região 2 e da região 3 e 4. O resultado obtido considerando apenas os dados da região 2 forneceu a melhor aproximação, com um desvio de 1,6% em relação ao obtido pelo método tradicional. Esse resultado indica ser essa a região que deve ser levada em consideração para a determinação da velocidade de mínima fluidização a partir das medidas de flutuações de pressão em misturas com tendência à segregação. Os resultados obtidos a partir dos transdutores localizados acima da placa distribuidora apresentaram desvios entre 12,9 e 14,5% em relação ao obtido pelo método tradicional.

Tabela 6.5 - Resultados para a determinação da  $U_{mf,\sigma}$  para a mistura (VF-VG)<sub>1</sub>

Mistura	Transdutor	$U_{mf}$ (m/s)	$U_{mf,\sigma}$ (m/s)	$\Delta U_{mf,\sigma}$ (%)
VF-VG	<i>Pplenum,</i> <i>regiões 2, 3 e 4</i>	0,62	0,57	8,77
	<i>Pplenum,</i> <i>região 2</i>		0,63	1,59
	<i>Pplenum,</i> <i>regiões 3 e 4</i>		0,55	12,72
	<i>Pz1</i>	-	0,55	12,72
	<i>Pz2</i>	-	0,53	16,98

Na tabela 6.6 são apresentadas as velocidades inerentes ao fenômeno de segregação para a mistura (VF-VG) bem como o desvio porcentual calculado com a Eq. 5.12 para cada velocidade ( $U_{fi}$ ,  $U_s$ , e  $U_{fc}$ ).

Tabela 6.6– Resultados na determinação das velocidades inerentes ao fenômeno da segregação para a mistura binária (VF-VG)

Material	Teste	Transdutor	$U_{fi}$ (m/s)	$U_s$ (m/s)	$U_{fc}$ (m/s)	$U_{mf}$ (m/s) (plenum)	$\Delta \bar{U}_{mf}$ (%)	$\Delta \bar{U}_{fi}$ (%)	$\Delta \bar{U}_s$ (%)	$\Delta \bar{U}_{fc}$ (%)
VF-VG	1	<i>Pz1</i>	0,58	0,73	0,80	0,62	0,0	1,7	0,0	0,0
		<i>Pz2</i>	0,59	0,73	0,80			0,0	0,0	0,0
		<i>Pplenum</i>	0,59	0,74	0,81			0,0	1,4	1,3
	2	<i>Pz1</i>	0,59	0,71	0,80	0,62	0,0	0,0	2,7	0,0
		<i>Pz2</i>	0,59	0,73	0,81			0,0	0,0	1,3
		<i>Pplenum</i>	0,58	0,72	0,80			1,7	1,4	0,0
	3	<i>Pz1</i>	0,58	0,72	0,81	0,63	1,6	1,7	1,4	1,3
		<i>Pz2</i>	0,59	0,73	0,81			0,0	0,0	1,3
		<i>Pplenum</i>	0,58	0,73	0,80			1,7	0,0	0,0
<b>Valor médio</b>			<b>0,59</b>	<b>0,73</b>	<b>0,80</b>	<b>0,62</b>				

A tabela 6.6 mostra que houve concordância dos valores obtidos, nos três ensaios realizados, para as velocidades do gás correspondentes a  $U_{fi}$ ,  $U_s$ ,  $U_{fc}$  e  $U_{mf}$ . O desvio entre cada

resultado de  $U_{mf}$  determinado pelo sensor localizado no plenum e o valor médio de  $U_{mf}$  obtido considerando as três repetições apresentou um valor máximo de 1,6%. Para os valores correspondentes às velocidades inerentes ao fenômeno da mistura o máximo desvio obtido foi de 2,7%.

### 6.2.2. Comportamento das flutuações de pressão no domínio do tempo para a mistura (VF-VG)

As figuras 6.19 a 6.33 ilustram o sinal de pressão no leito adquirido no *plenum* e nas posições  $z_1$  e  $z_2$  para a mistura (VF-VG)<sub>1</sub>. Além do valor da velocidade superficial do gás,  $U_o$ , na legenda de cada gráfico, também é indicado o regime de contato gás sólido. É apresentada uma comparação com os sinais de pressão dos materiais isolados visando uma comparação entre eles com o intuito de identificar o fenômeno de segregação.

É importante lembrar que os testes com as misturas foram realizados da condição de leito misturado [Fig. 6.19(n)] até a condição de leito fixo [Fig. 6.19(a)]. No entanto, preferiu-se apresentar os resultados de menor para a maior velocidade do gás, ou seja, em ordem crescente de  $U_o$ .

Nas figuras referentes aos sinais adquiridos no *plenum*, a escala do eixo vertical foi mantida a fim de permitir comparações entre elas, desde o regime de leito fixo até o leito borbulhante. Os dados coletados mostram o aumento considerável da amplitude dos sinais de flutuação de pressão registrados pelo transdutor desde cerca de 50 Pa ( $U_o=0,13$  m/s) até cerca de 2000 Pa ( $U_o=0,89$  m/s).

Os gráficos correspondentes aos transdutores localizados em  $z_1$  e  $z_2$ , para todos os materiais isolados (VF, VG) e para a mistura (VF-VG), foram construídos com a escala do eixo vertical igual à metade da escala usada para as medidas de  $P_{plenum}$  com o intuito de melhorar a qualidade da imagem e a visibilidade do sinal. Assim, a escala em que é apresentada está na faixa de 0 a 3000 Pa no eixo vertical da pressão.

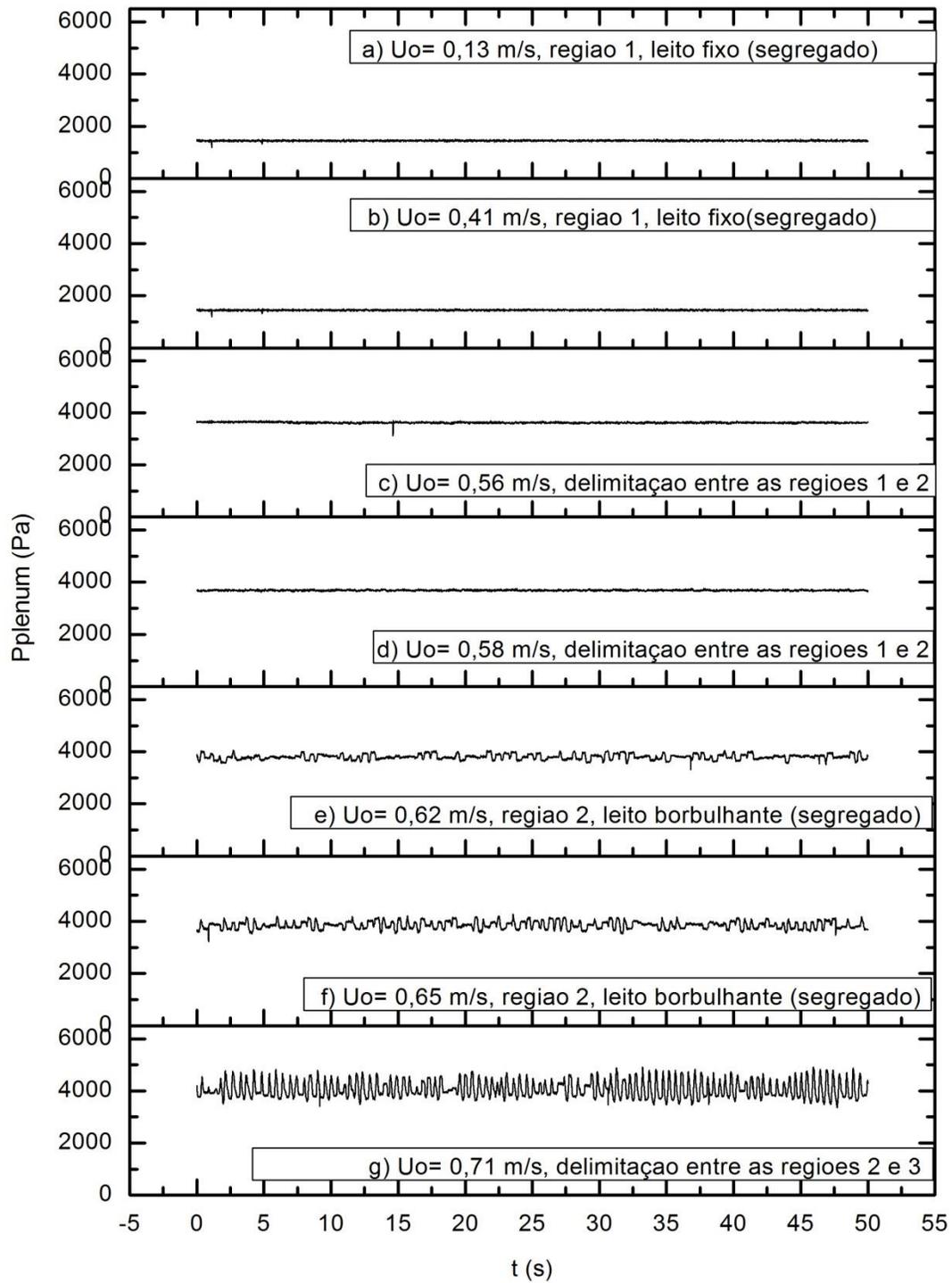


Figura 6.19 - Sinais de pressão no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) com a mistura  $(VF-VG)_I$

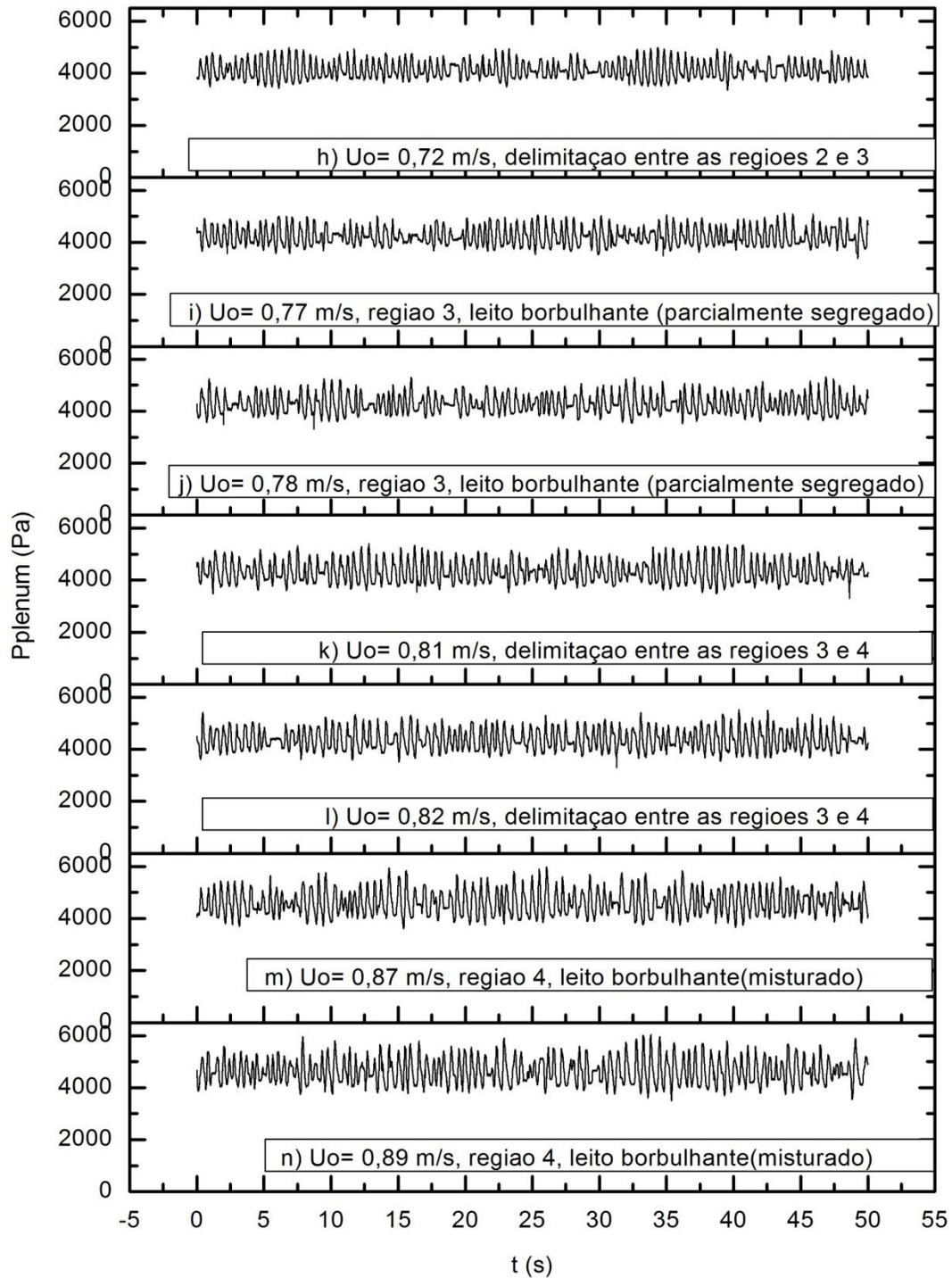


Figura 6.19 (cont.) - Sinais de pressão no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) com a mistura  $(VF-VG)_I$

Na figura 6.19, pode-se observar as flutuações de pressão ao longo do tempo e com o aumento da velocidade do gás. É importante ressaltar que os testes foram realizados partindo-se da maior para a menor velocidade superficial do gás. Sob o regime de leito fixo até o início da região 2 ( $U_o = 0,13$  a  $0,58$  m/s) não foi percebida a ocorrência de flutuações de pressão significativas como pode ser observado nas Figs. 6.19(a) a (d). Nessa faixa de velocidade do gás, os materiais que compõem a mistura estão segregados com o vidro fino no topo do leito e vidro grosso no fundo,.

Entretanto, para os sinais nas Figs.6.19c) e (d), o leito já se encontra na região transição do regime de leito fixo para regime de leito borbulhante, onde se pôde observar o surgimento das flutuações de pressão, a partir do início da fluidização do vidro fino pelo aumento nas vibrações de suas partículas e pelas pequenas bolhas que aparecem no topo do leito. Nesta condição, o vidro grosso permanece em regime de leito fixo no fundo do leito e o sinal de pressão apresenta amplitude da ordem de 100 Pa. A partir de  $U_o = 0,56$  m/s, valores cada vez mais altos da velocidade superficial do gás tendem a provocar aumento da amplitude dos sinais de flutuação de pressão.

A fim de permitir comparação dos sinais das misturas com aqueles obtidos com materiais isolados, a Fig. 6.20 apresenta sinais de flutuação de pressão para o vidro fino (*VF*), vidro grosso (*VG*) e para a mistura vidro fino e vidro grosso (*VF-VG*) na mesma velocidade superficial do gás  $U_o = 0,41$  m/s, obtidos com o transdutor instalado no *plenum*. Nesta condição, o leito contendo apenas vidro fino apresenta um comportamento característico de regime borbulhante, enquanto que o leito contendo apenas vidro grosso (*VG*) e o leito contendo a mistura (*VF-VG*) apresentam regime de leito fixo como pode ser verificado pela amplitude dos sinais. Portanto, o vidro fino atinge, com uma velocidade de 0,41 m/s, o regime de leito borbulhante [Fig. 6.20 (a)] enquanto que o leito de vidro grosso se encontra sob o regime de leito fixo, Fig. 6.20b). Para a mistura [Fig. 6.20(c)], não se percebe a ocorrência de borbulhamento nessa velocidade do gás, mesmo na camada de vidro fino sobre o vidro grosso.

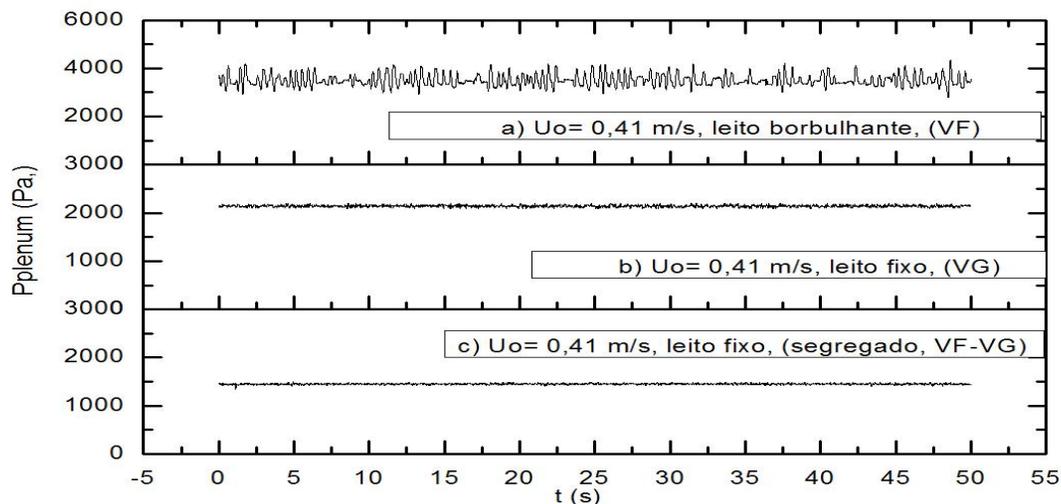


Figura 6.20 - Sinais de pressão no *plenum* com o vidro fino (VF), vidro grosso (VG) e com a mistura:  $U_o = 0,41$  m/s

Na figura 6.21 são apresentados os sinais obtidos para  $U_o = 0,62$  m/s na qual a comparação só é possível entre os sinais do (VG) e os sinais da mistura (VF-VG). O material VF não foi estudado nesta velocidade nem em velocidades maiores pelo fato de estar já em regime turbulento e o estudo da segregação de partículas na mistura foi feito para a condição de regime borbulhante, assim a comparação com os materiais isolados foi sob este regime.

Nos sinais obtidos para o vidro grosso, pôde-se observar uma fluidização borbulhante diferente à observada para o vidro fino. O borbulhamento foi mais ordenado com bolhas bem definidas, comportamento descrito por Felipe (2004) caracterizado pela regularidade na subida das bolhas, as quais não apresentaram diâmetros superiores à metade do diâmetro da coluna, a velocidade do gás foi o dobro da utilizada no regime borbulhante para o leito contendo vidro fino. Como resultado flutuações de pressão foram observadas, com valores de amplitude maiores que os sinais relativos ao vidro fino na máxima velocidade em que este foi estudado.

Nos sinais correspondentes à região 2 da Fig. 6.21, as partículas estão se movimentando num regime de leito parcialmente fluidizado como é discutido no trabalho de Gauthier *et al.* (1999). Nesta situação, o vidro fino encontra-se no topo do leito onde se observa a passagem das bolhas pequenas. O vidro grosso, que se encontra no fundo do leito, tem uma movimentação característica de um leito borbulhante com pequenas bolhas que sobem ao topo do leito, mas não

conseguem promover grandes movimentações nas partículas de *VG*. A pressão média do sinal não tem uma variação significativa com a registrada para a transição entre os regimes de leito fixo e regime borbulhante do material *VG* isolado, mantendo-se na faixa de 3600 a 3900 Pa. Porém, o sinal se apresenta com uma faixa de amplitude ao redor de 300 Pa, isto devido ao aumento na quantidade de bolhas que atravessam o leito, como visto na Fig. 6.21(b). Nesta velocidade superficial, pode-se observar a característica principal do sinal de regime de leito borbulhante: intensas e irregulares flutuações de pressão.

Na figura 6.21a pressão média observada é levemente maior para a mistura com 3800 Pa do que para o vidro grosso (3600 Pa), mas a amplitude do sinal para a mistura oscila em 500 Pa, Fig. 6.21(b), enquanto que para o vidro grosso essa flutuação é de apenas 50 Pa. O comportamento observado para as misturas indica a presença de diferentes tamanhos das bolhas ascendendo pela coluna do leito.

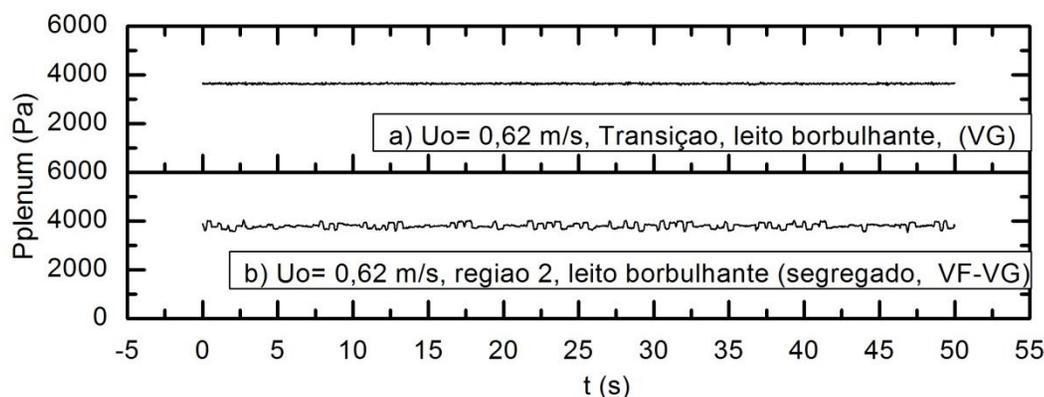


Figura 6.21- Sinais de pressão no *plenum* com vidro grosso (VG) e com a mistura (VF-VG):  $U_o = 0,62$  m/s

Na região 3 da Fig. 6.22 quando o leito encontra-se parcialmente segregado, a pressão média do sinal aumenta e a faixa da variação da amplitude do sinal é da ordem de 1200 Pa. Nesta região, ainda se observa o vidro fino no topo do leito, porém partículas de vidro grosso já estão sendo elevadas para o topo pelas bolhas de ar. Portanto, nesta região, o topo do leito já possui uma pequena porcentagem de partículas de vidro grosso.

Na figura 6.22, o sinal de pressão para o vidro grosso apresenta um comportamento de um material em regime borbulhante com bolhas maiores, sendo que ocorrem flutuações mais intensas

e regulares em comparação com os sinais da mistura. Nos testes, foram observadas bolhas de maior tamanho e em maior quantidade para a mistura do que para o vidro grosso, sendo que os sinais deste apresentam amplitudes menores (~1000 Pa) do que para a mistura (~1500 Pa).

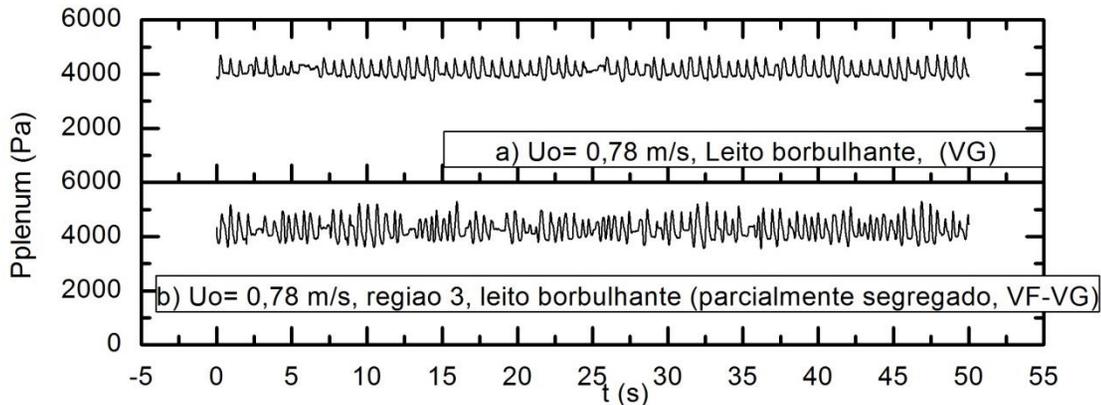


Figura 6.22 - Sinais de pressão no *plenum* com o vidro grosso (VG) e com a mistura (VF- VG):

$$U_o = 0,78 \text{ m/s}$$

Na região 4 da Fig. 6.23 de leito misturado, não se identifica uma camada de nenhum dos dois materiais, pois eles encontram-se misturados. O vidro fino se movimenta por todo o leito dentro da massa de vidro grosso. As bolhas aumentam e tem-se um comportamento semelhante ao observado nos testes do vidro grosso em regime borbulhante. A variação da amplitude do sinal é de 2000 Pa, sendo que foram observadas bolhas maiores dos que as na região 3

Na Fig. 6.23 (a), os sinais de pressão para o vidro grosso e para a mistura apresentam um comportamento de leito borbulhante, com bolhas regulares em tamanho e em quantidade. A amplitude do sinal da mistura é maior que para o sinal do (VG), isto devido à interação do vidro fino na mistura. É importante salientar que o leito de vidro grosso e da mistura tinham massas muito parecidas; para o vidro grosso foi de 1,88 kg, e para a mistura foi de 1,87 kg. Não é possível nesta pesquisa afirmar alguma influencia gerada pela diferença de massa entre os leitos.

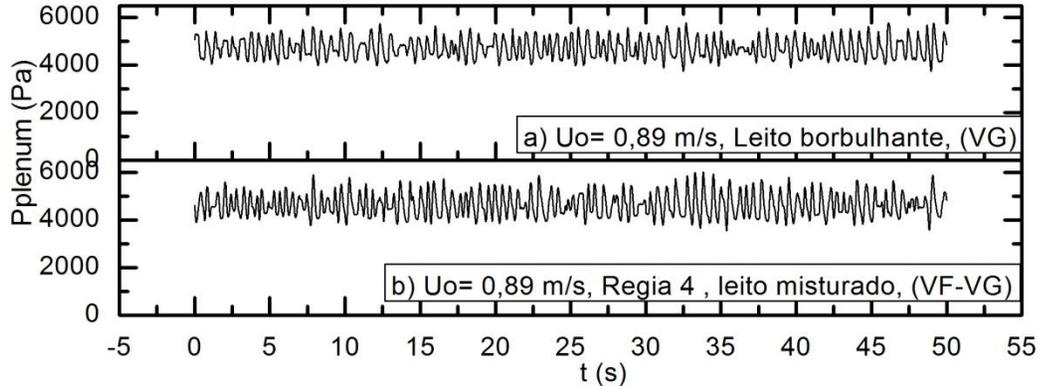


Figura 6.23 - Sinais de pressão no *plenum* com o vidro grosso (VG) e com a mistura (VF-VG):  $U_o = 0,89 \text{ m/s}$

Na Figura 6.24, são apresentados os sinais para a mistura na posição  $z_1$ , onde se pode observar as flutuações da pressão ao longo do tempo com o aumento da velocidade do gás. Comparando-se com os gráficos da Fig. 6.19, verifica-se que as amplitudes dos sinais são menores que as adquiridas com o transdutor do *plenum*, devido à queda de pressão pela placa distribuidora.

Da mesma forma como discutido para os sinais no *plenum*, no regime de leito fixo, Fig. 6.24 (a) e (b), não é percebida a ocorrência de uma flutuação de pressão, sendo que a faixa de pressão média para o regime de leito fixo foi de 900 a 1400 Pa, que é cerca de 30 % menor que o observado no *plenum*, que foi de 1900 Pa.

Nos sinais próximos à transição entre a região 1 e a região 2, Fig. 6.24(c) e 6.24(d), pode-se constatar que o valor da pressão média é de aproximadamente 1800 Pa. Nesta condição, só foi possível ao vidro fino iniciar a fluidização com um aumento nas vibrações das partículas e pequenas bolhas que atravessam o leito até o topo. O transdutor colocado em  $z_1$  registra o efeito do escoamento de ar, sendo que as flutuações registradas por este transdutor correspondem ao comportamento do vidro grosso que está ainda regime de leito fixo no fundo do leito. O sinal de pressão nesta delimitação apresenta variações na amplitude de cerca de 50 Pa.

Nos sinais correspondentes à região de leito segregado até a região onde o leito está misturado, não se observa uma variação significativa na pressão média, registrando uma variação de 100 Pa em relação à pressão média dos sinais da [Fig. 6.24(a) e (b)] correspondentes à região 1 de leito fixo segregado.

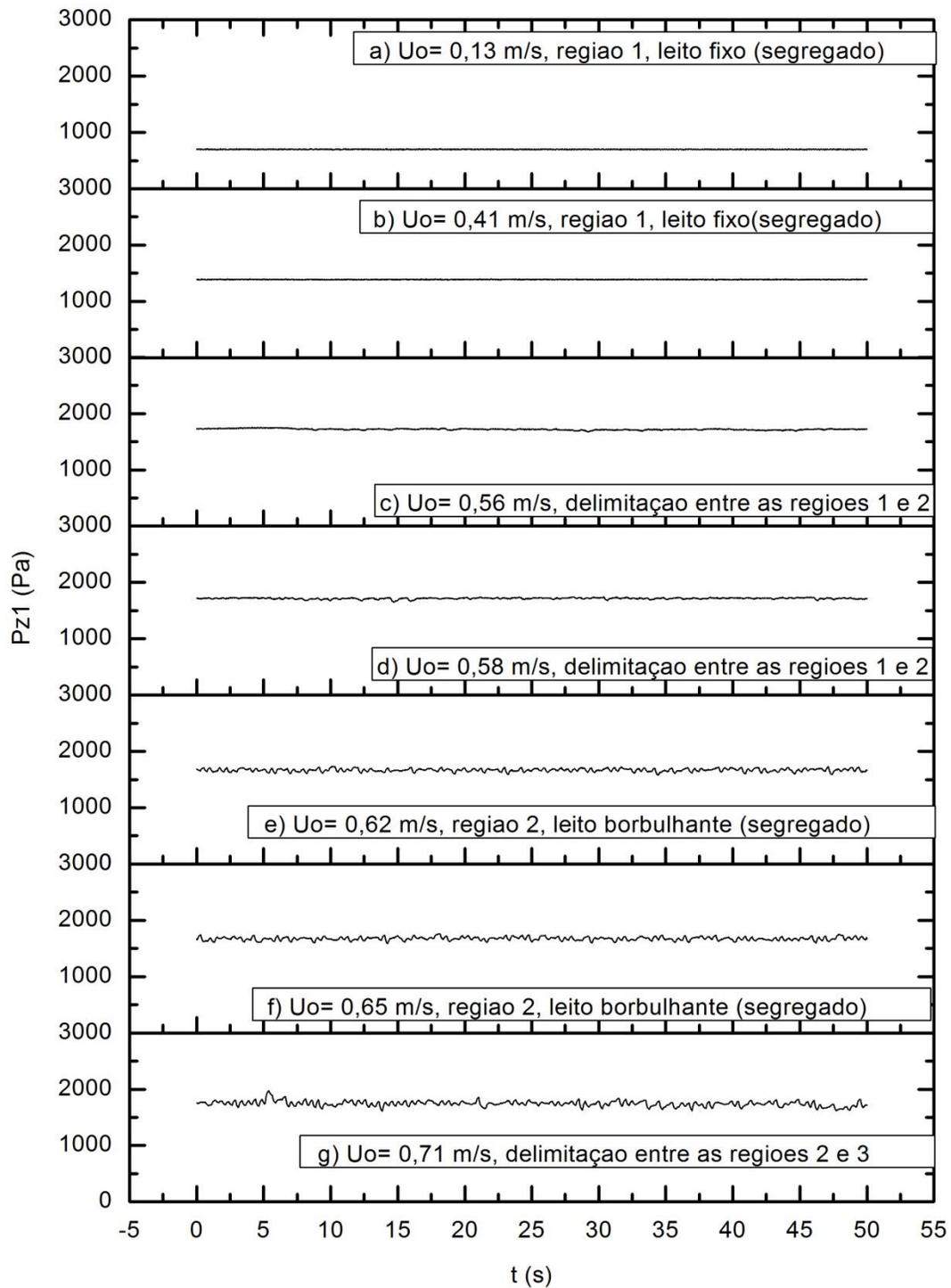


Figura 6.24 - Sinais de pressão na posição  $z_1(P_{z1})$  com a mistura  $(VF-VG)_1$

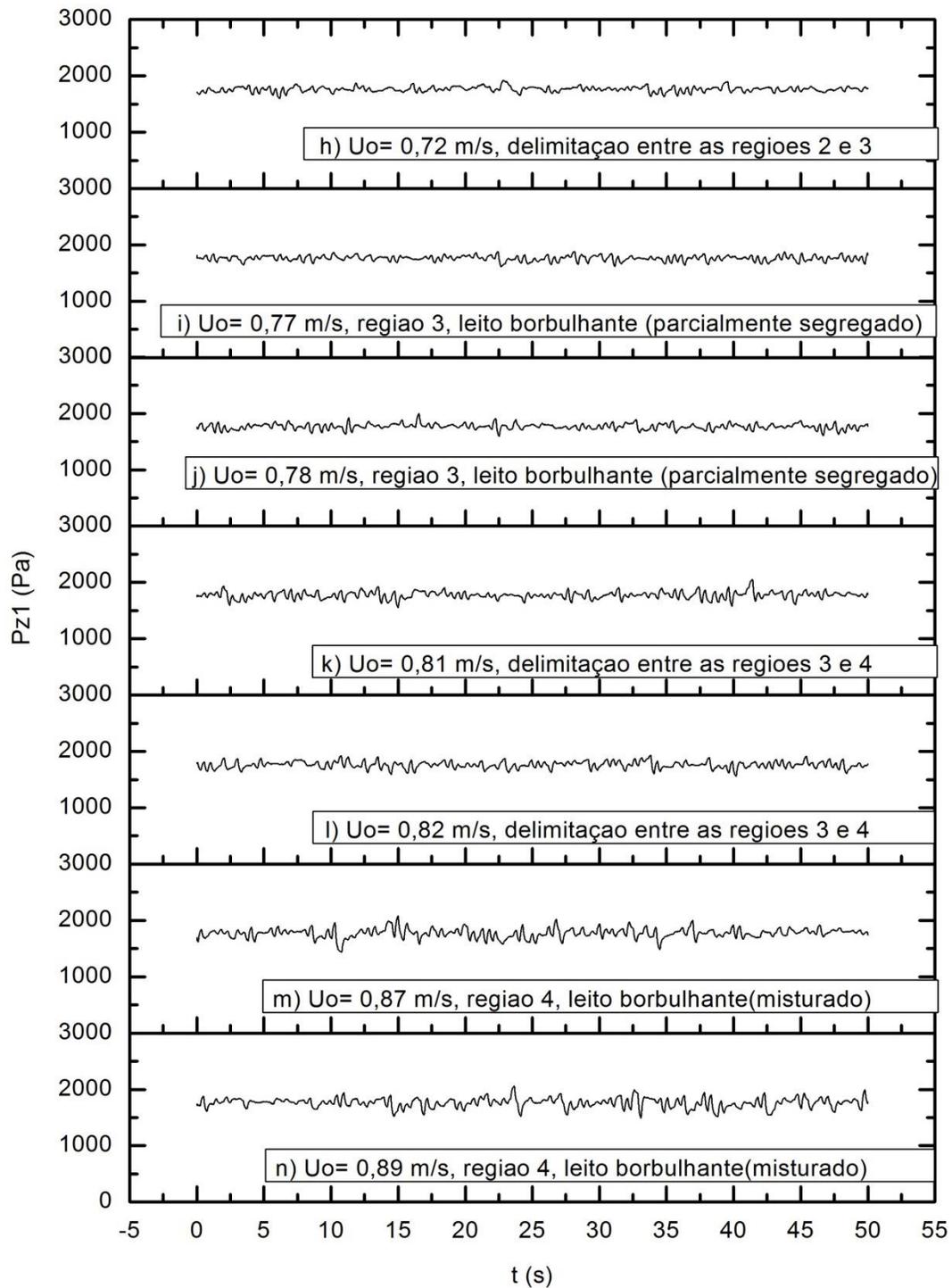


Figura 6.24 (cont.) - Sinais de pressão na posição  $z_1(P_{z1})$  com a mistura  $(VF-VG)_1$

Nos sinais do vidro grosso (*VG*) é possível verificar variações de pressão ao longo do tempo com o aumento da velocidade do gás. Nesta posição são muito menores as flutuações e amplitudes dos sinais quando comparados com os sinais obtidos no *plenum* para este material. O comportamento é muito similar ao verificado para os sinais obtidos para o vidro fino na tomada de pressão localizada em  $z_I$ , onde ocorre a movimentação das partículas devido à passagem do fluido nas camadas do leito próxima ao distribuidor. Esse movimento provoca quase imperceptíveis variações no sinal, nas velocidades correspondentes ao leito fixo. Os valores de pressão são parecidos com os obtidos para os sinais adquiridos para o vidro fino apresentados no item 6.4, no entanto para atingir cada regime estudado foram necessárias maiores vazões de ar.

Na figura 6.25, são apresentados os sinais de pressão no domínio do tempo adquiridos na posição  $z_I$  para o vidro fino, vidro grosso e para a mistura (*VF-VG*). O sinal do vidro fino indica a presença de bolhas de diferentes tamanhos e flutuações com amplitudes maiores do que as que foram identificadas nos sinais do vidro grosso e da mistura, que ainda apresentam um comportamento do leito fixo na velocidade de 0,41 m/s.

No regime de leito borbulhante, a passagem de ar e a formação de bolhas geraram as flutuações de pressão observadas na figura, mas como a tomada de pressão em  $z_I$  está perto do distribuidor, bolhas pequenas e uniformes atravessam o leito fazendo com que os sinais de pressão apresentem pequenas amplitudes, situação também observada para o vidro fino.

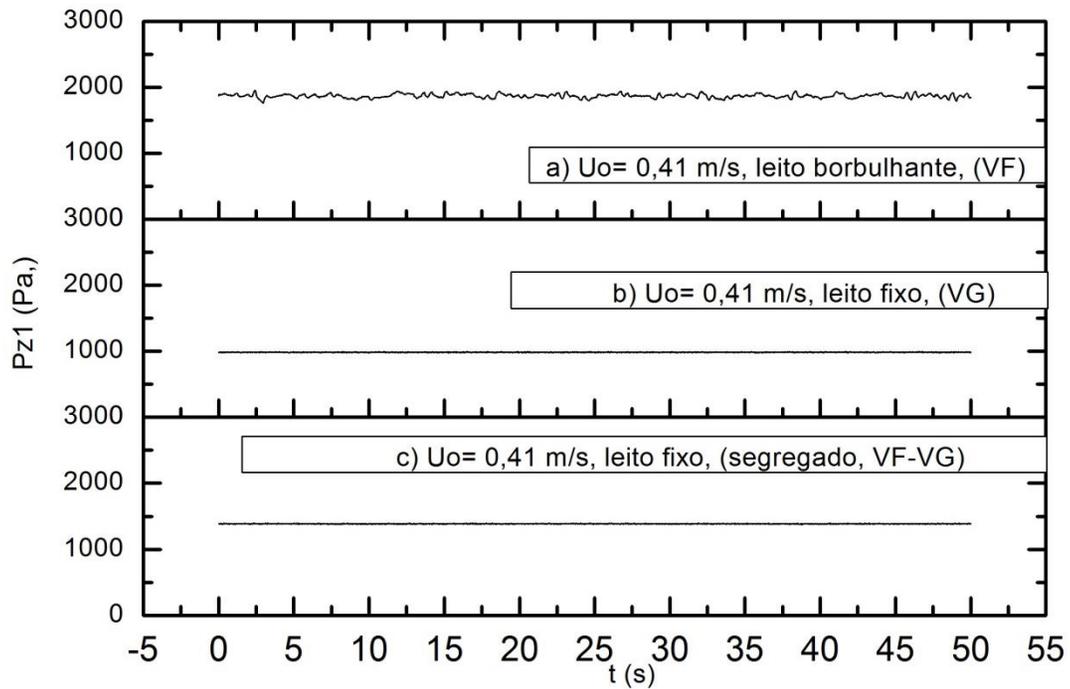


Figura 6.25 - Sinais de pressão na posição  $z_1$  com os materiais isolados (VF) e (VG) e com a mistura (VF- VG):  $U_o = 0,41$  m/s

Os sinais correspondentes à região 2 de leito segregado, Fig. 6.26(b), apresentaram sinais com flutuações de pressão com um comportamento gerado pelo aparecimento de pequenas bolhas que movimentam o vidro grosso, mas transportam este material para o topo do leito. Na Fig. 6.26, pode-se realizar uma comparação dos sinais para a mistura (VF-VG)<sub>1</sub> com aqueles para o vidro grosso que, nesta velocidade, já inicia a sua fluidização, sendo que sua velocidade mínima fluidização é de 0,61 m/s para o material isolado, enquanto que a mistura já apresenta um leito parcialmente fluidizado.

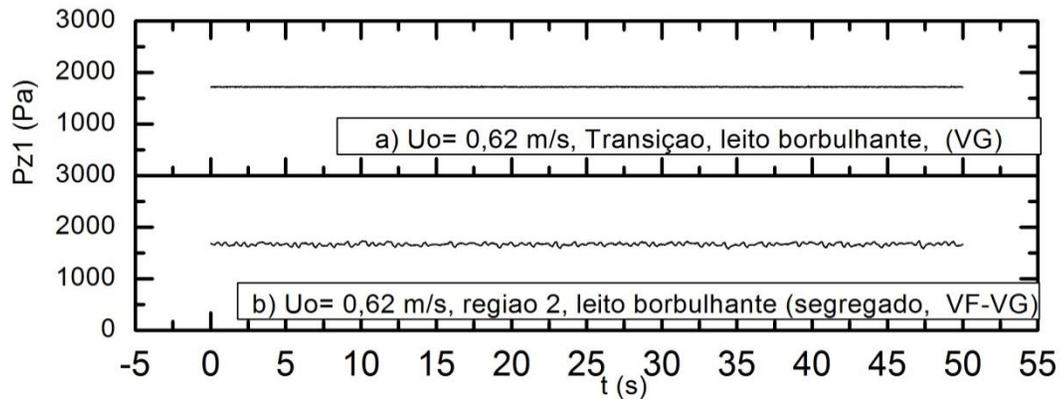


Figura 6.26 - Sinais de pressão na posição  $z_1$  com o vidro grosso (VG) e com a mistura (VF- VG):  
 $U_o = 0,62 \text{ m/s}$

O sinal correspondente à região 3 de leito parcialmente segregado apresenta flutuações com variações periódicas geradas pelo aumento das bolhas e o aumento da velocidade do gás, como observado na Fig. 6.27.

Na figura 6.27, os sinais do vidro grosso e da mistura apresentam regime de leito borbulhante, porém, o sinal de vidro grosso apresenta menores amplitudes nas flutuações de pressão dos sinais.

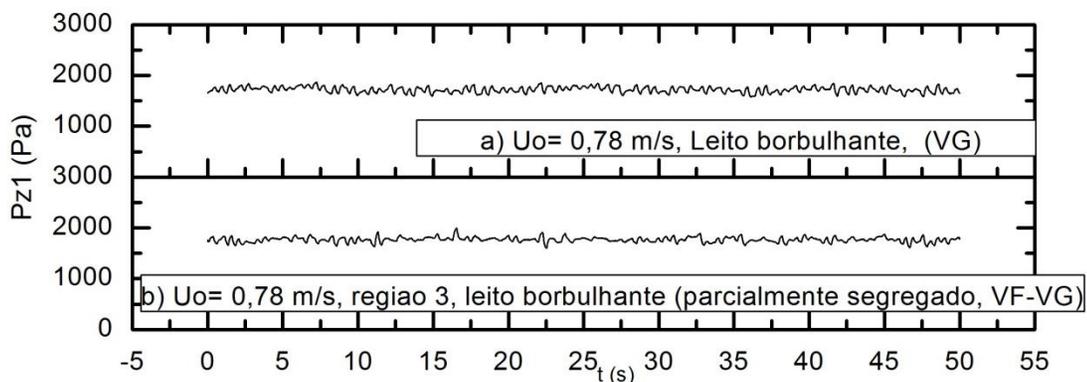


Figura 6.27 - Sinais de pressão na posição  $z_1$  com o vidro grosso (VG) com a mistura (VF- VG):  
 $U_o = 0,78 \text{ m/s}$

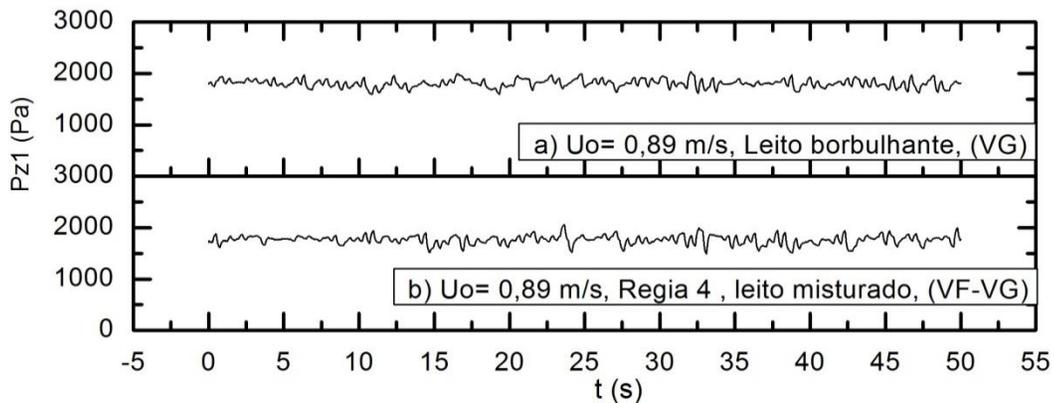


Figura 6.28 - Sinais de pressão na posição  $z_1$  com o vidro grosso (VG) e com a mistura (VF- VG):

$$U_o = 0,89 \text{ m/s}$$

A escala do eixo vertical foi mantida a fim de permitir comparações entre os sinais do regime de leito fixo e os sinais do leito borbulhante, através das quais se verifica a ocorrência de aumento considerável da amplitude dos sinais de flutuação de pressão registrados pelo transdutor instalado na posição  $z_1$  de cerca de 50 Pa com  $U_o = 0,13 \text{ m/s}$  até 400 Pa com  $U_o = 0,89 \text{ m/s}$ .

A figura 6.29 apresentam os sinais para a mistura (VF-VG) na posição  $z_2$ , onde se observa o comportamento dos sinais ao longo do tempo para 14 diferentes velocidades do gás. Verifica-se que as amplitudes dos sinais são menores que as observadas para tanto no *plenum* quanto em  $z_1$ .

No regime de leito fixo, assim como observado para os sinais no *plenum* e na posição  $z_1$ , não é há ocorrência de flutuações de pressão. A faixa do valor médio da pressão para o regime de leito fixo, foi de 200 a 500 Pa, que é um valor muito menor ao observado no *plenum* e em  $z_1$  que foram de 1900 Pa e de 1400 Pa, respectivamente.

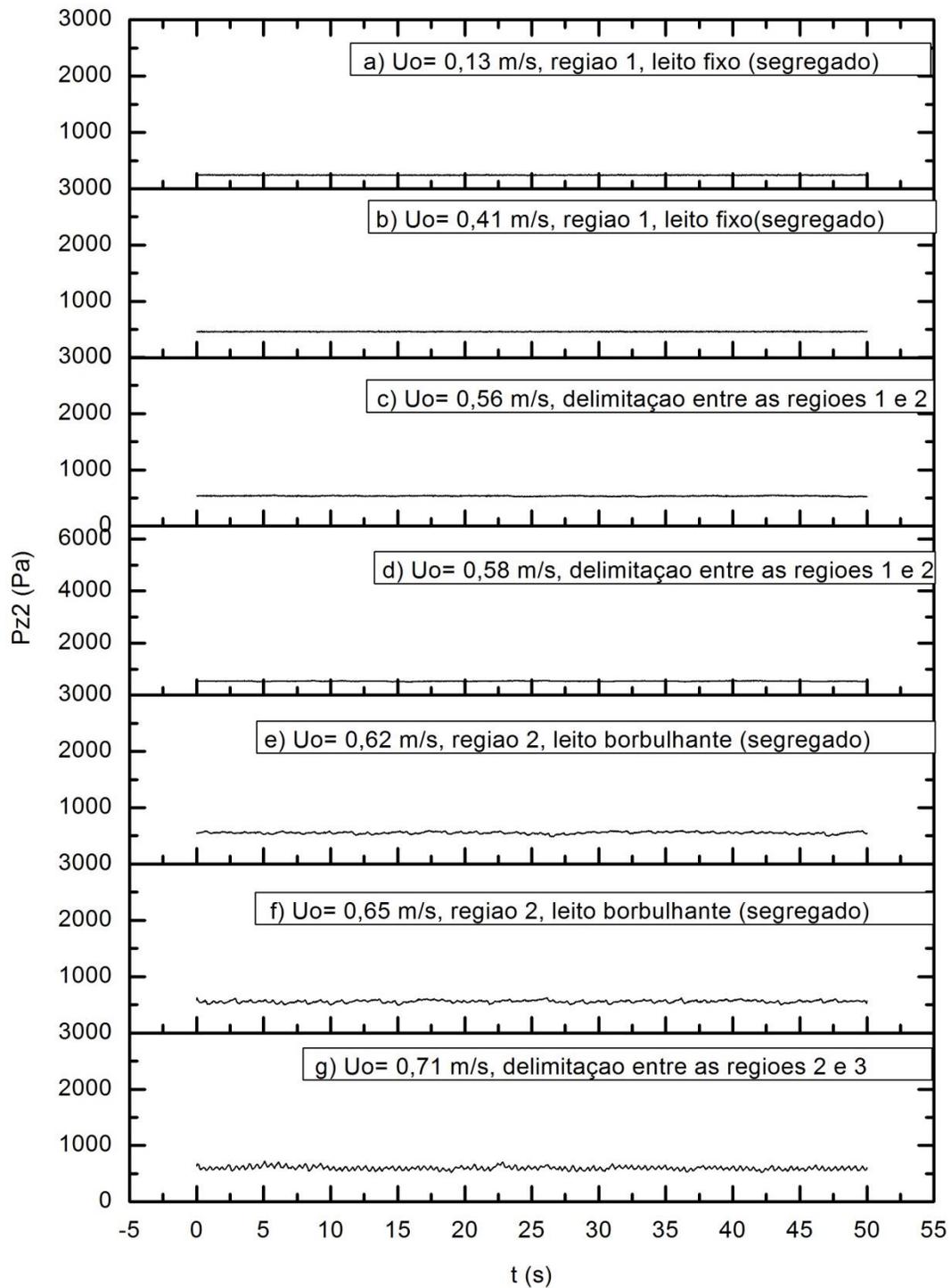


Figura 6.29 - Sinais de pressão na posição  $z_2$  ( $P_{z2}$ ) com a mistura  $(VF-VG)_I$

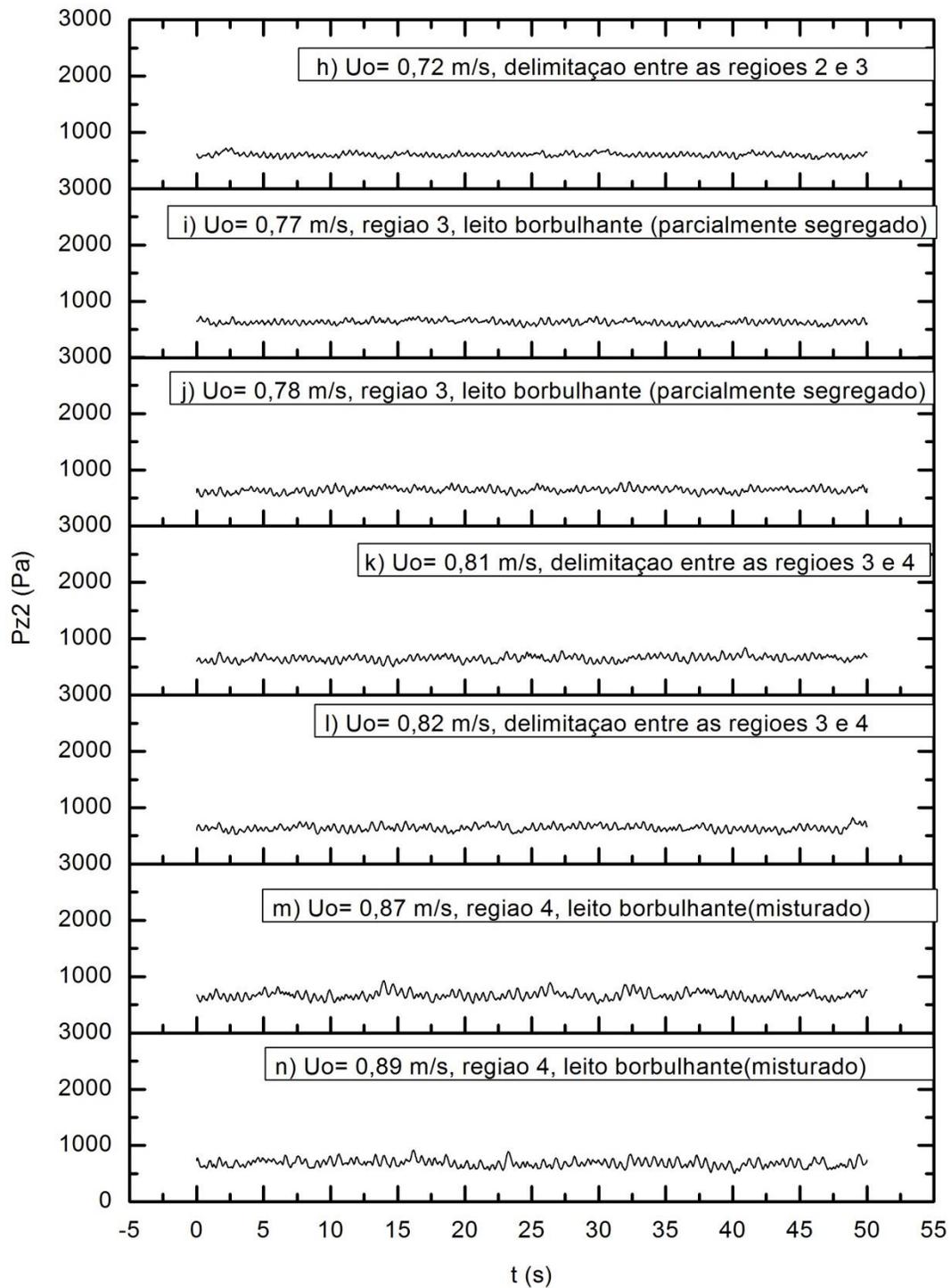


Figura 6.29 (cont.) - Sinais de pressão na posição  $z_2$  ( $P_{z2}$ ) com a mistura  $(VF-VG)_1$

Nos sinais obtidos para o vidro grosso é possível verificar variações de pressão ao longo do tempo com o aumento da velocidade, cujos sinais foram adquiridos pelo transdutor em  $z_2$ , mais distante da placa distribuidora e, portanto, mais próximo da interface do leito. As amplitudes, neste caso, são menores do que a dos sinais obtidos no transdutor situado em  $z_1$ . Também a média da pressão (ou o nível) é menor, pois este ponto capta a queda de pressão apenas de uma parte do leito. Em  $z_2$  observa-se a passagem de bolhas maiores que estão mais próximas à superfície do leito. Neste material, a passagem de bolhas foi mais rápida que no leito contendo vidro fino em função da maior velocidade do gás. Além disso, o tamanho das bolhas foi maior que o registrado para o vidro fino, isso ocasionou ao aumento da amplitude dos sinais de pressão.

Foi observado um comportamento mais regular do que o registrado na posição  $z_1$  onde as bolhas são menores e algumas estão sofrendo coalescência.

A Fig. 6.30 apresenta para a velocidade de 0,41 m/s a comparação dos sinais de cada um dos componentes presentes na mistura, Fig. 6.30(a) e 6.30(b), com os sinais obtidos para a mistura, Fig. 6.30(c), verifica-se que para esse valor de  $U_o$ , tanto (VG) como a mistura (VF-VG) estão em regime de leito fixo, enquanto que o vidro fino apresenta leves flutuações e maior valor da pressão média, indicando que já há fluidização,

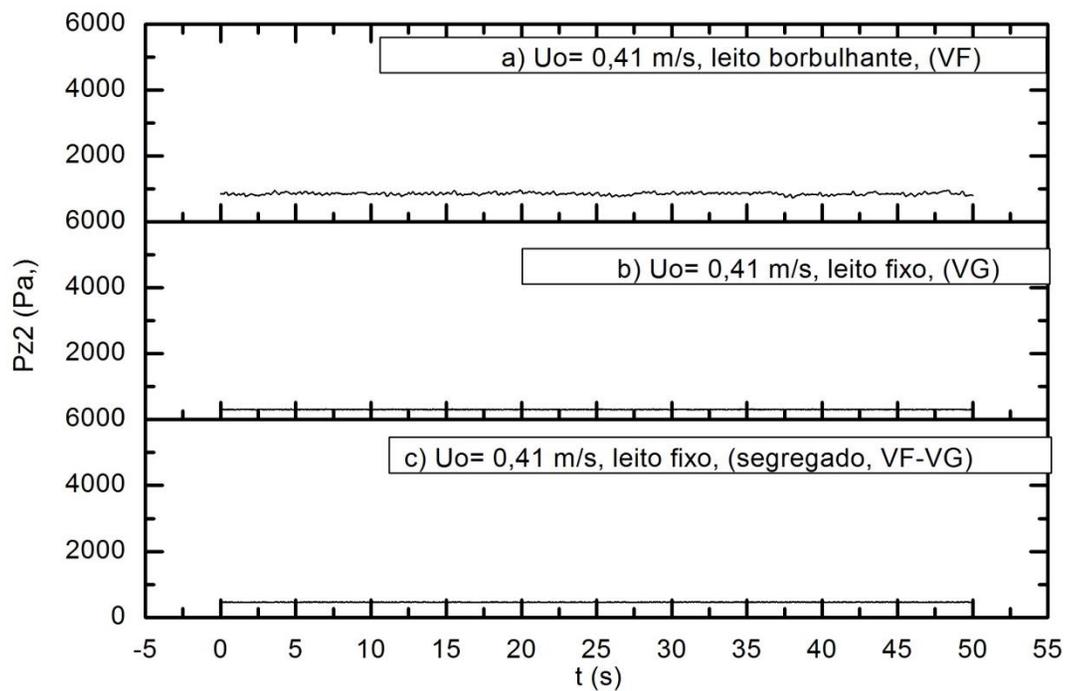


Figura 6.30 - Sinais na posição  $z_2$  com os materiais isolados e com a mistura (VF- VG):  $U_o = 0,41$  m/s

Os sinais correspondentes à região 2, onde o leito encontra-se segregado até a região 4, onde o leito está misturado, não apresentam uma variação significativa na pressão média, registrando um aumento de 200 Pa com respeito à pressão média do leito fixo. A figura 6.31 apresenta a comparação entre os sinais obtidos nos testes com VG [Fig. 6.31(a)] para  $U_o$  igual a 0,62 m/s, verifica-se que para esta velocidade o VG está iniciando o processo de fluidização.

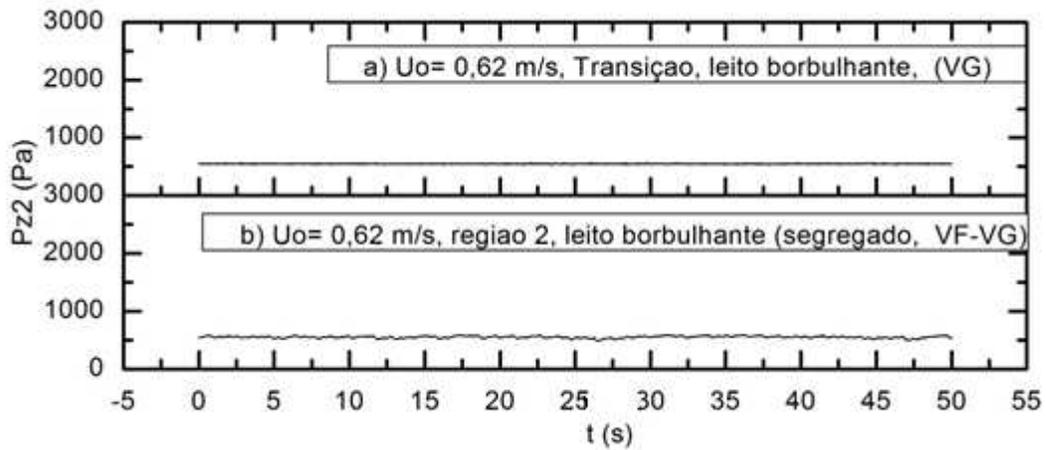


Figura 6.31 - Sinais de pressão na posição  $z_2$  com o vidro grosso (VG) e com a mistura (VF-VG):

$$U_o = 0,62 \text{ m/s}$$

Com o aumento da velocidade do gás, ocorre também o aumento da amplitude das flutuações na zona de leito segregado, que é cerca de 50 Pa. Para a zona de leito parcialmente segregado e zona de leito misturado, ela foi de 200 Pa. Na comparação entre os sinais do vidro grosso e da mistura, Fig. 6.32 e 6.33, observa-se que a amplitude do sinal aumenta com o aumento da velocidade do gás, porém, nesta posição, é difícil identificar uma diferença entre os sinais correspondentes ao vidro grosso e à mistura.

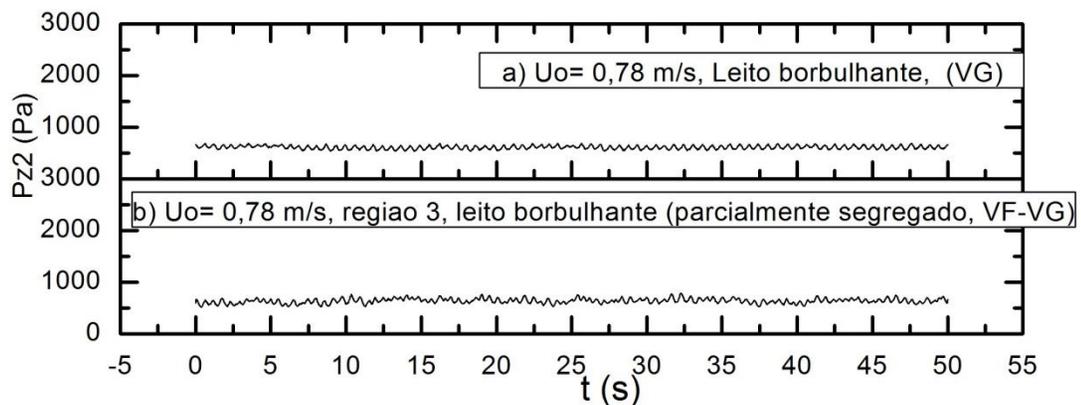


Figura 6.32 - Sinais de pressão na posição  $z_2$  com o vidro grosso (VG) e com a mistura (VF-VG):

$$U_o = 0,78 \text{ m/s}$$

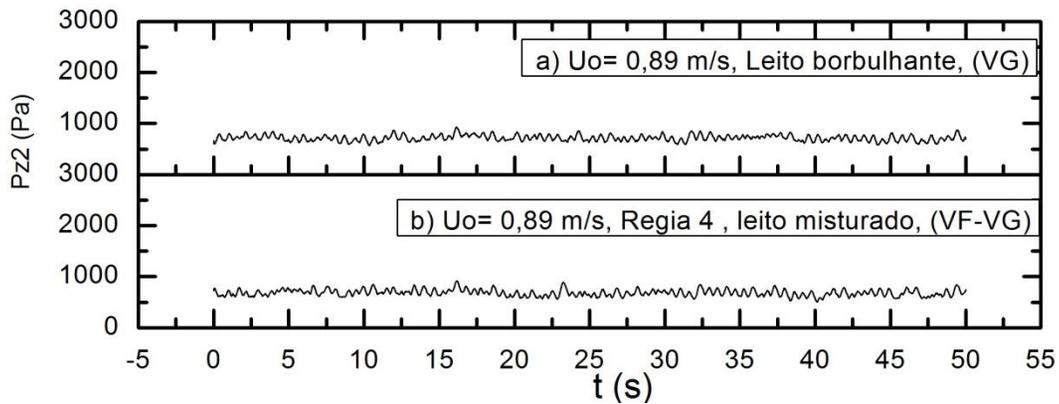


Figura 6.33 - Sinais de pressão na posição  $z_2$  com o vidro grosso (VG) e com a mistura (VF-VG):  
 $U_o = 0,89 \text{ m/s}$

Nesta posição, registram-se sinais que são gerados pelas bolhas que passam e estouram no topo do leito. Eles apresentam variações em suas amplitudes de 200 Pa.

Da mesma forma que para as outras posições, a escala do eixo vertical foi mantida a fim de permitir comparações às quais, desde o regime de leito fixo até o leito borbulhante, se verifica a ocorrência de aumento considerável da amplitude dos sinais de flutuação de pressão registrados pelo transdutor instalado no *plenum* de cerca de 50 Pa com  $U_o$  igual a 0,13 m/s para até 200 Pa com  $U_o$  igual a 0,89 m/s.

Na tabela 6.7 é mostrada a variação da pressão média com a velocidade do gás. Observa-se a redução do valor da pressão média em cada posição com o aumento na altura da tomada de pressão, conforme era esperado.

Tabela 6.7 - Pressões médias obtidas ao longo do processo de fluidização para catorze diferentes velocidades superficiais do gás com a mistura (VF-VG)<sub>1</sub>.

$U_o$ (m/s)	$\bar{P}_{plenum}$ (Pa)	$\bar{P}_{z_1}$ (Pa)	$\bar{P}_{z_2}$ (Pa)	Regime
0,13	1201,70	701,45	244,63	Região 1, leito fixo segregado)
0,41	2679,00	1386,90	462,97	Região 1, leito fixo segregado)
0,56	3544,40	1721,30	537,86	Delimitação entre as regiões 1 e 2.
0,58	3637,80	1716,20	538,53	Delimitação entre as regiões 1 e 2
0,62	3782,00	1670,30	553,08	Região2, leito borbulhante segregado.
0,65	3825,60	1675,10	560,32	Região2, leito borbulhante segregado.
0,71	3987,20	1746,00	598,80	Delimitação entre as regiões 2 e 3
0,72	4068,00	1764,10	605,40	Delimitação entre as regiões 2 e 3
0,77	4223,70	1769,10	642,16	Leito borbulhante parcialmente segregado
0,78	4269,00	1774,30	651,22	Leito borbulhante parcialmente segregado
0,81	4321,70	1763,70	638,12	Delimitação entre as regiões 3 e 4
0,82	4364,50	1766,70	651,93	Delimitação entre as regiões 3 e 4;
0,87	4594,60	1764,60	684,75	Região 4, leito borbulhante, misturado.
0,89	4631,40	1779,70	671,44	Região 4, leito borbulhante, misturado.

Na tabela 6.8, podem ser verificadas diferenças da velocidade superficial para cada regime de fluidização dos leitos compostos com os materiais isolados (VF e VG) e com a mistura (VF-VG). A faixa de velocidades de operação entre o leito fixo e o leito borbulhante para o vidro fino (VF) é 0,13 a 0,40 m/s, faixa menor que a utilizada no vidro grosso e na mistura (VF e VG) onde a faixa foi de 0,13 a 0,89 m/s.

Pode-se observar que as pressões características do leito borbulhante permanecem constantes em  $z_1$  e  $z_2$ .

Quando o *VF* está em regime de leito borbulhante com uma velocidade de 0,40 m/s, a mistura encontra-se, ainda, em regime de leito fixo. Isto ocorre pelo fato do comportamento da mistura ser dominado pelo comportamento do vidro grosso.

Tabela 6.8 – Comparação de velocidades e regimes de fluidização para os materiais isolados (*VF*) e (*VG*) e com a mistura (*VF-VG*)<sub>1</sub>

<i>VF</i> <sub>1</sub>		<i>VG</i> <sub>1</sub>		<i>(VF-VG)</i> <sub>1</sub>	
<i>U</i> <sub>0</sub> (m/s)	<i>Regime</i>	<i>U</i> <sub>0</sub> (m/s)	<i>Regime</i>	<i>U</i> <sub>0</sub> (m/s)	<i>Regime</i>
0,13	Leito fixo	0,13	Leito fixo	0,13	Leito fixo
0,2	Leito fixo	0,51	Leito fixo	0,51	Leito fixo
0,3	Transição	0,61	Transição	0,61	Regime borbulhante
0,31	Transição	0,63	Transição	0,63	Regime borbulhante
0,37	Regime borbulhante	0,75	Regime borbulhante	0,77	Regime borbulhante
0,40	Regime borbulhante	0,88	Regime borbulhante	0,87	Regime borbulhante

A mistura é afetada pela quantidade de vidro fino presente nela. O vidro fino inicia sua fluidização com velocidades de ar menores que o vidro grosso, isto pode ser evidenciado no fato que para uma velocidade de 0,61 m/s em que o vidro grosso está na região de transição de leito fixo para leito borbulhante, e a mistura já atingiu o regime de leito borbulhante.

Para os sinais de pressão do vidro fino coletados no *plenum*, é possível observar uma amplitude máxima na pressão de 1200 Pa. Para o vidro grosso ela foi de 1800 Pa, enquanto na mistura a pressão foi de 2000 Pa.

### **6.3. Mistura de micro esferas de plástico e vidro grosso (PL-VG)**

Neste item, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com a mistura contendo 5% (em massa) de partículas de plástico (diâmetro médio de 971  $\mu\text{m}$ ) e 95% de partículas de vidro grosso (diâmetro médio de 959  $\mu\text{m}$ ). A metodologia adotada permitiu a identificação de regiões com comportamentos fluidodinâmicos diferentes, bem como a determinação das velocidades inerentes ao fenômeno de segregação. Também o comportamento das flutuações de pressão para a mistura *PL-VG* é apresentado e discutido.

#### **6.3.1. Determinação das regiões de fluidização e das velocidades superficiais do gás inerentes ao fenômeno de segregação para a mistura (PL-VG)**

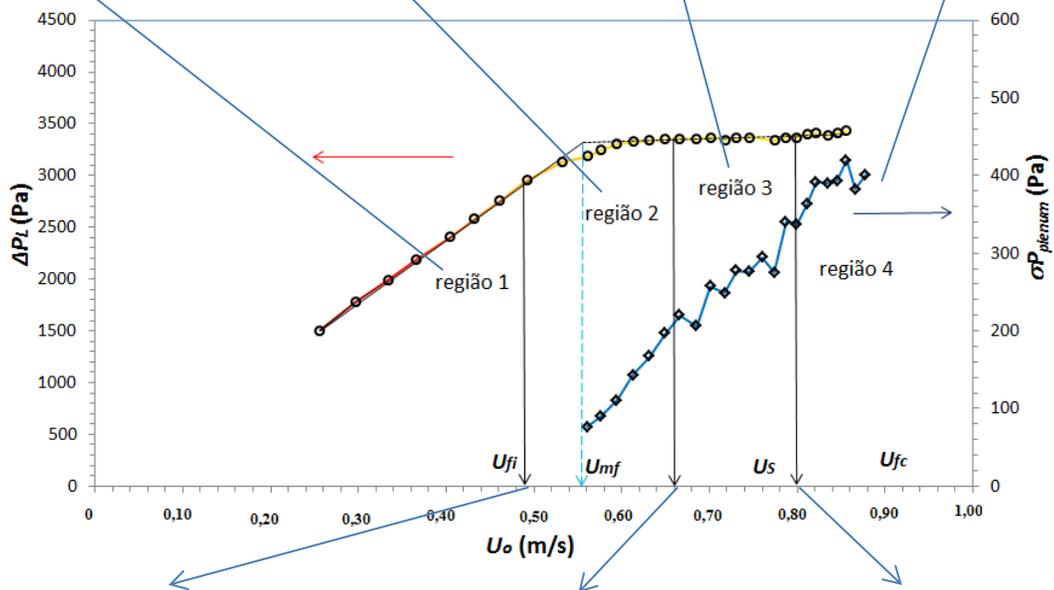
As figuras 6.34 e 6.35 apresentam a queda de pressão no leito e a Fig. 6.36 mostra a curva do desvio padrão da pressão medida no *plenum* em função de  $U_o$ . Esses resultados foram obtidos para o primeiro teste envolvendo a mistura  $(PL-VG)_I$ . Nas Figs. 6.35 e 6.36 são apresentadas as curvas obtidas para cada componente da mistura, identificados por  $(PL)_I$  e  $(VG)_I$ , visando uma comparação entre o comportamento da mistura e seus componentes isolados.

Na figura 6.34 são apresentadas as fotos correspondentes a cada estado de fluidização analisados para os sinais no domínio do tempo.



Leito fixo segregado Leito segregado leito parcialmente segregado Leito misturado.

$U_o = 0,13 \text{ m/s}$   $U_o = 0,56 \text{ m/s}$   $U_o = 0,76 \text{ m/s}$   $U_o = 0,89 \text{ m/s}$



Delimitação entre regiões 1 e 2 Delimitação entre regiões 2 e 3 Delimitação entre regiões 3 e 4

$U_o = 0,48 \text{ m/s}$

$U_o = 0,68 \text{ m/s}$

$U_o = 0,80 \text{ m/s}$

Figura 6.34– Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* em função da velocidade superficial do gás com a mistura  $(PL-VG)_I$ .

Na figura 6.34 são apresentadas as regiões identificadas como próprias do fenômeno da segregação. As imagens mostram a distribuição das partículas no leito em cada região. Assim, para a região 1 e 2 tem-se o plástico no topo do leito de cor mais clara que o vidro grosso que está no fundo do leito. Para a região 3 e 4, não podem ser identificados os materiais, pois eles estão parcialmente misturados ou completamente misturados. Nesta figura, é possível verificar as etapas do fenômeno da segregação onde se observa nas regiões 1 e 2, a presença de plástico no topo do leito enquanto que nas regiões 3 e 4 os materiais estão parcialmente (região 3) ou totalmente (região 4) misturados, semelhantemente à Fig. 6.7 para a mistura VF-VG.

Na figura 6.35, obtida a partir das medidas realizadas com o transdutor no plenum, pode-se verificar que o comportamento da mistura é influenciado pelos seus componentes igual que como é apresentado na Fig. 6.8.

Na Fig. 6.36 são apresentadas as curvas do desvio padrão para o transdutor no *plenum*, utiliza-se a mesma metodologia que a utilizada na Fig. 6.9 da mistura VF-VG.

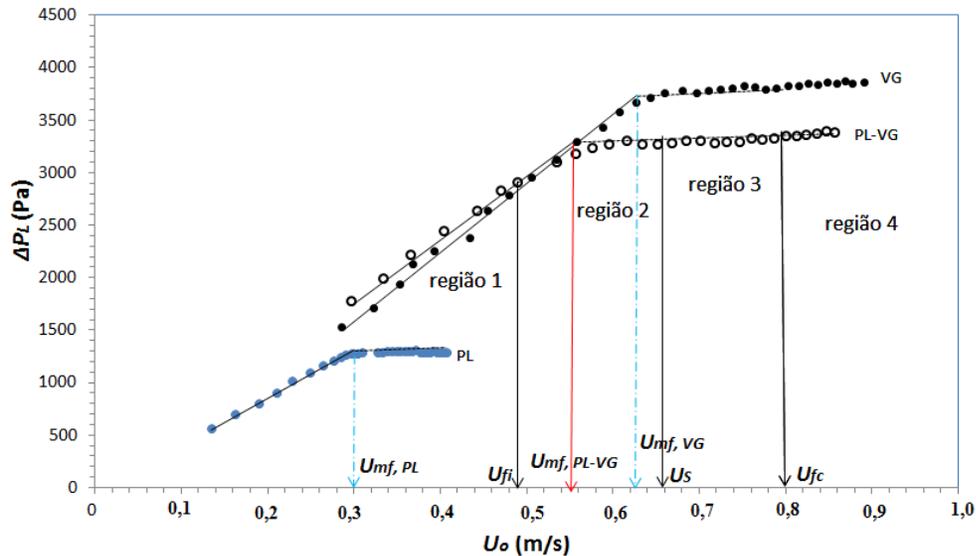


Figura 6.35 – Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás medido no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) para os materiais  $(PL)_1$ ,  $(VG)_1$  e  $(PL-VG)_1$

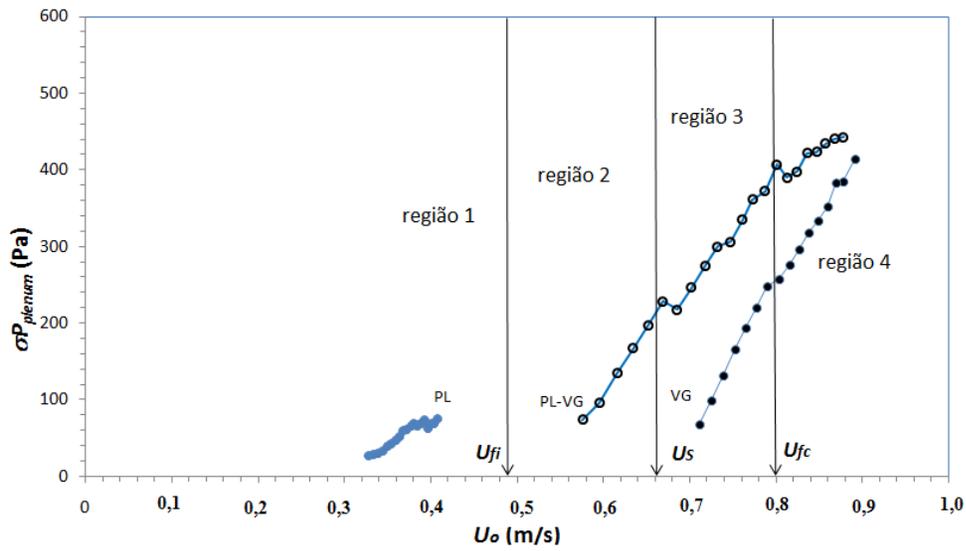


Figura 6.36 – Desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) em função da velocidade superficial do gás com os materiais  $(PL)_I$ ,  $(VG)_I$  e mistura  $(PL-VG)_I$

As figuras 6.35 e 6.36 apresentam os resultados obtidos em  $z_1$  e em  $z_2$  para a queda de pressão do leito e para o desvio padrão das flutuações de pressão, em função de  $U_o$ , para o primeiro teste envolvendo a mistura identificada como  $(PL-VG)_I$ . Os resultados obtidos nos ensaios 2 e 3 estão apresentados no apêndice C (item C.2).

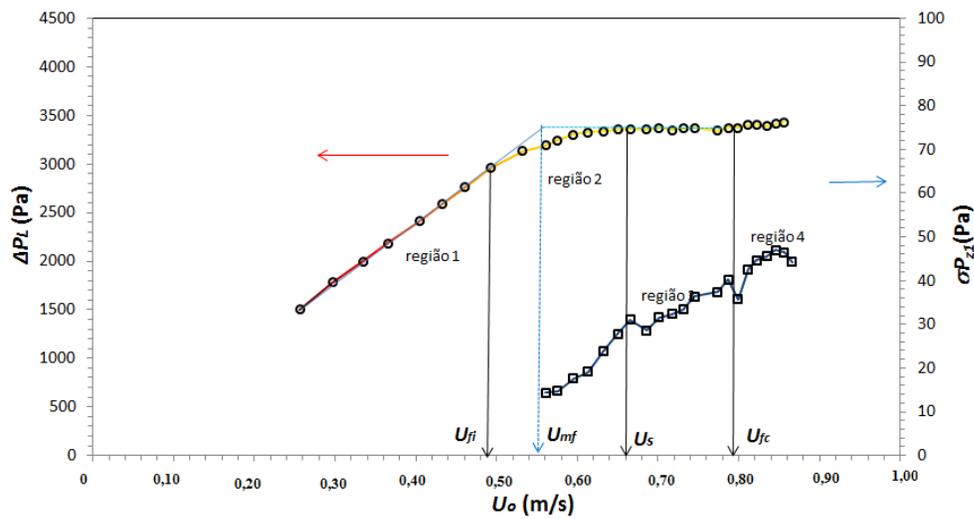


Figura 6.37 - Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas em  $z_1$  em função da velocidade superficial do gás com a mistura (PL-VG).

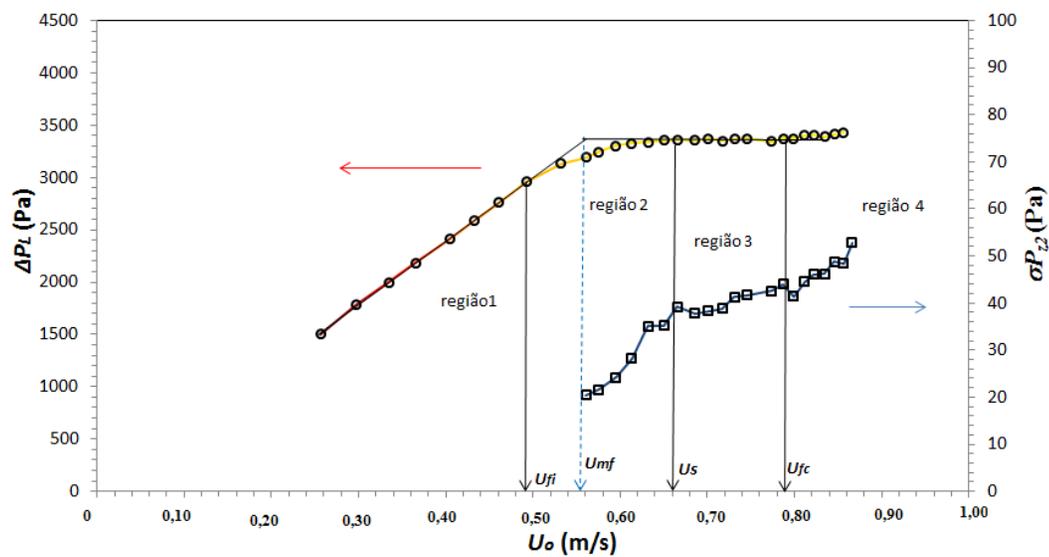


Figura 6.38- Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás com a mistura (PL-VG).

As figuras 6.37 e 6.38 mostram que também nas posições  $z_1$  e  $z_2$  é possível identificar as velocidades inerentes ao fenômeno de fluidização e de segregação, conforme já identificado para a tomada no *plenum*.

A discussão dos resultados gerais obtidos a partir dos sinais de pressão coletados para a mistura *PL-VG* está apresentada no item 6.5 junto com os resultados das outras misturas estudadas.

A partir dos dados do primeiro ensaio de cada material e da mistura, foram construídos gráficos do desvio padrão dos sinais obtidos em  $z_1$  e  $z_2$  versus a velocidade superficial do gás. O intuito foi comparar as flutuações de pressão a partir do desvio padrão dos sinais de pressão adquiridos pelos dois transdutores instalados na parede do riser, que estão em contato direto com o material do leito (Fig. 6.39 e 6.40).

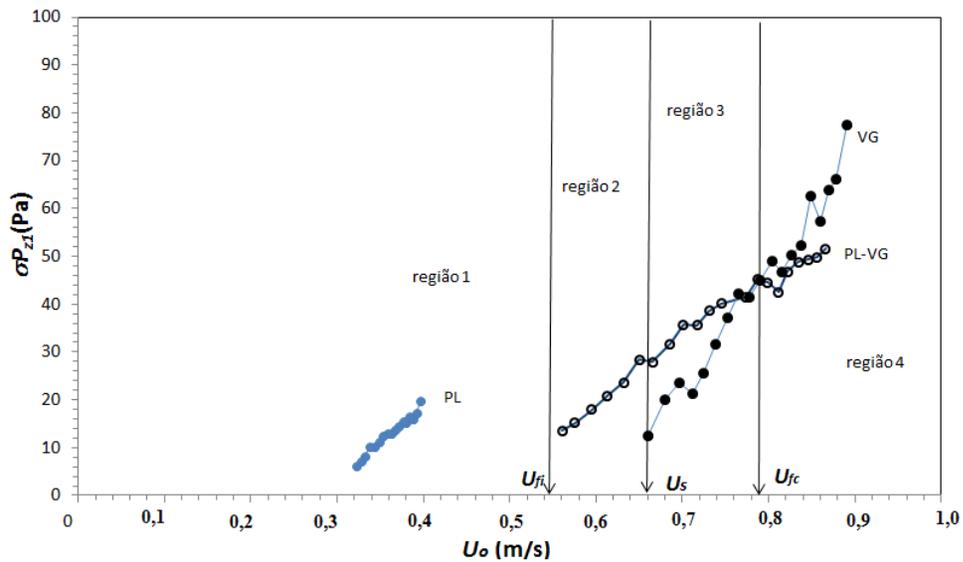


Figura 6.39 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  em função da velocidade superficial do gás, com os materiais isolados (*PL*) e (*VG*) e com a mistura e(*PL-VG*)

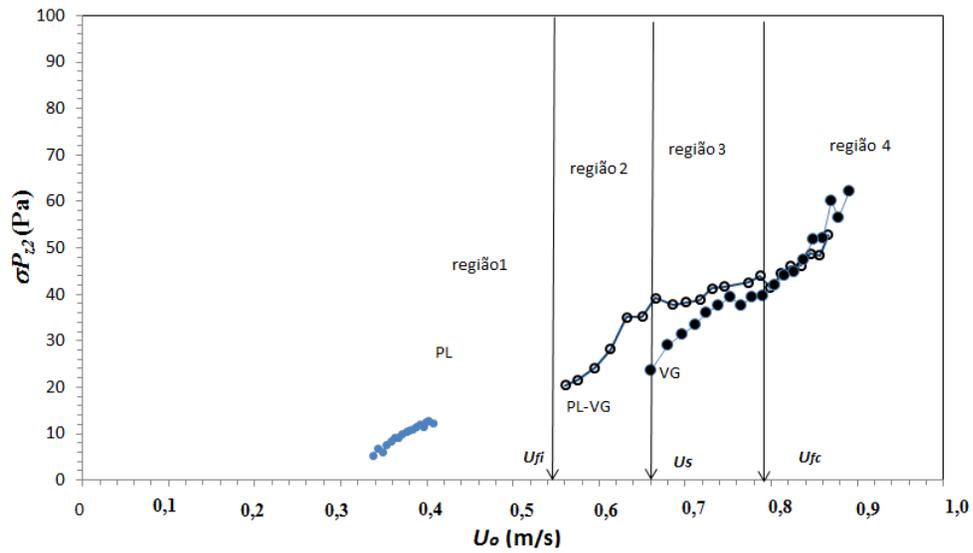


Figura 6.40 - Desvio padrão das medidas de pressão medidos em  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás com os materiais (PL), (VG) e (PL-VG)

- **Análises da velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf,\sigma}$ ) para mistura binária (PL-VG)<sub>1</sub>**

As figuras 6.41 a 6.45 apresentam os resultados para a mistura de plástico e vidro grosso (PL-VG) em seu primeiro teste. Nestes gráficos são apresentados comportamentos e análises da mesma forma que foram apresentados os resultados para a mistura VF-VG (Figs. 6.14 a 6.18).

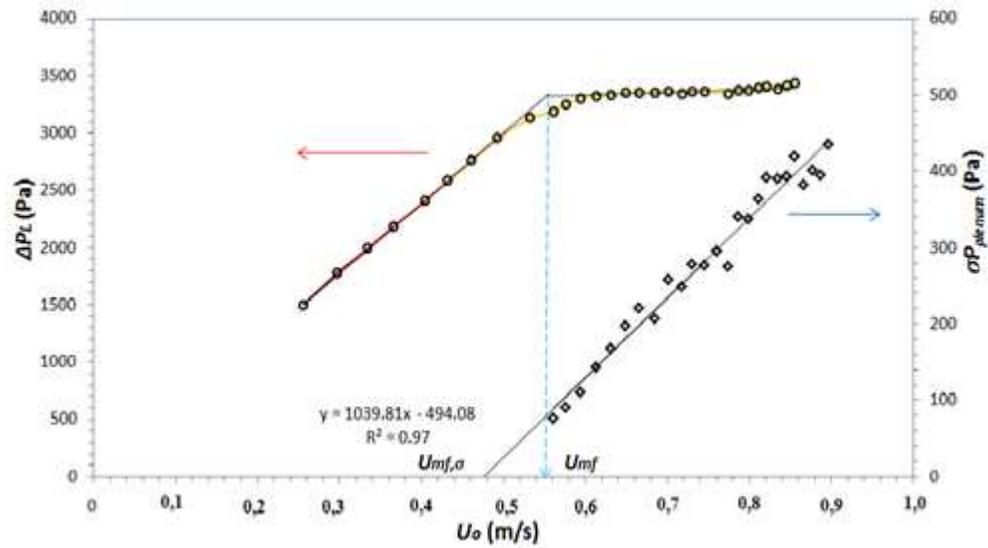


Figura 6.41 - Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* em função da  $U_o$  para a mistura  $(PL-VG)_1$  ( $U_{mf,\sigma}$  obtido levando-se em conta todos os dados levantados, ou seja, regiões 2, 3 e 4).

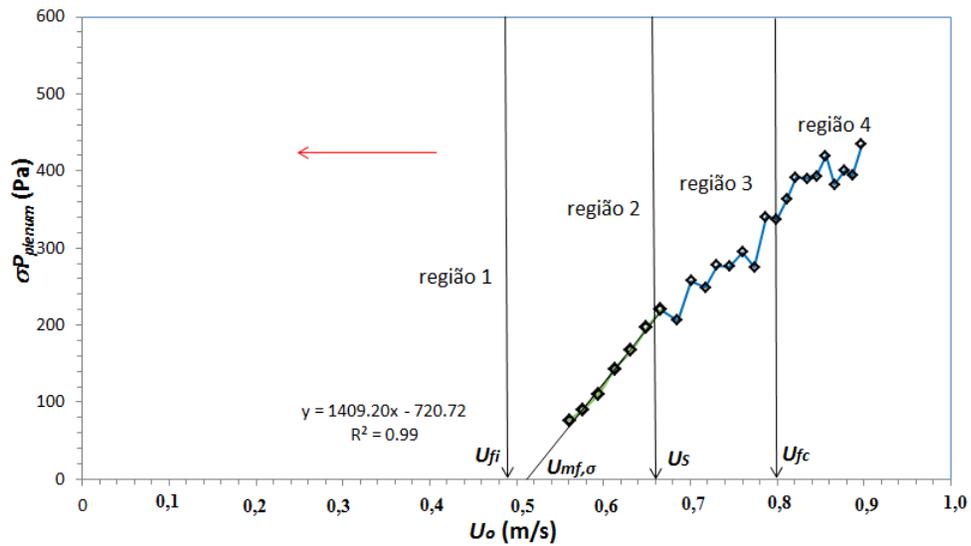


Figura 6.42 - Desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  para a mistura  $(PL-VG)_1$  ( $U_{mf,\sigma}$  obtido levando-se em conta apenas os dados levantados na região 2).

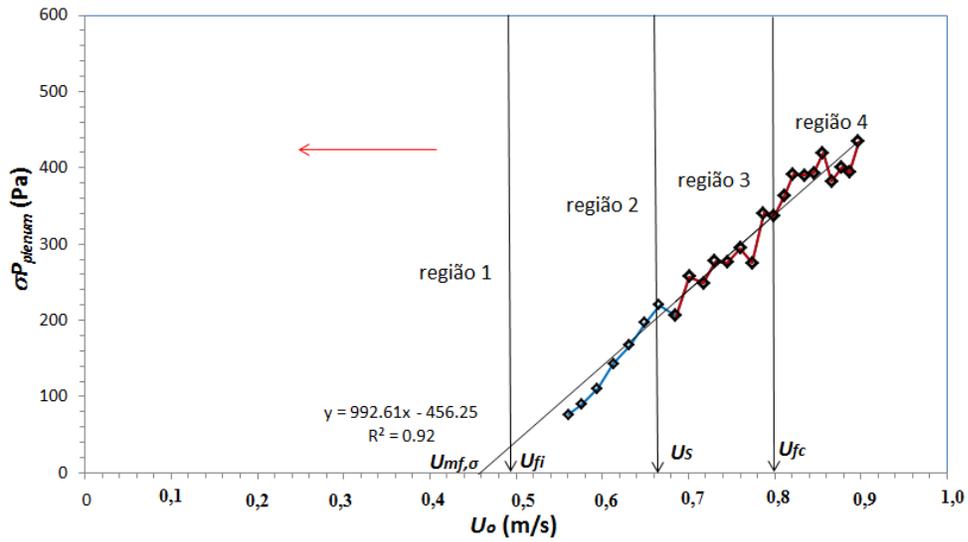


Figura 6.43 - Desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  com a mistura  $(PL-VG)_1$ , ( $U_{mf,\sigma}$  obtido levando-se em conta apenas os dados levantados nas regiões 3 e 4).

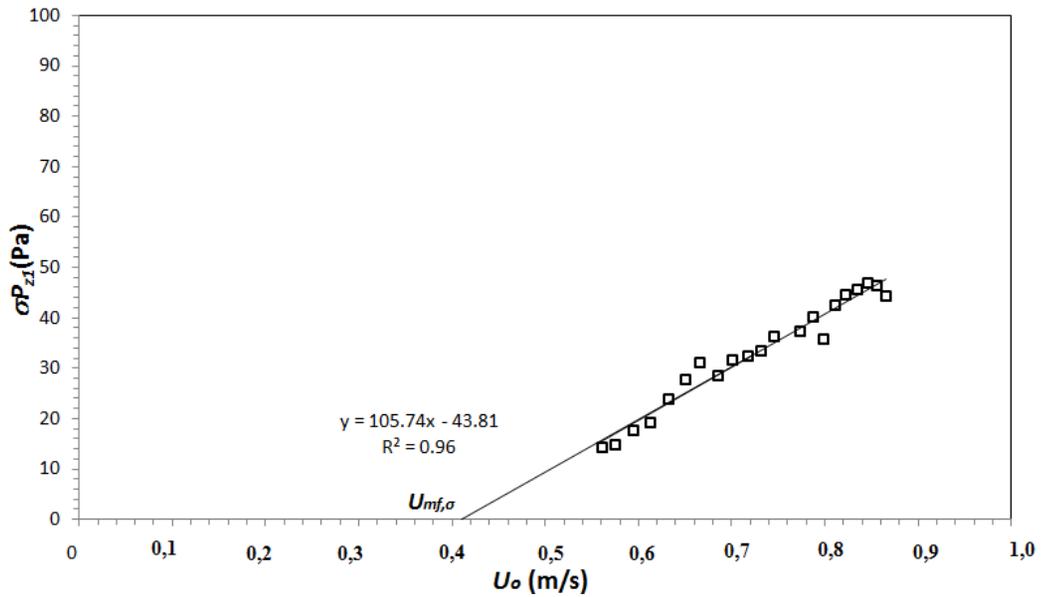


Figura 6.44 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $P_{z1}$  como função da  $U_o$  com a mistura  $(PL-VG)_1$

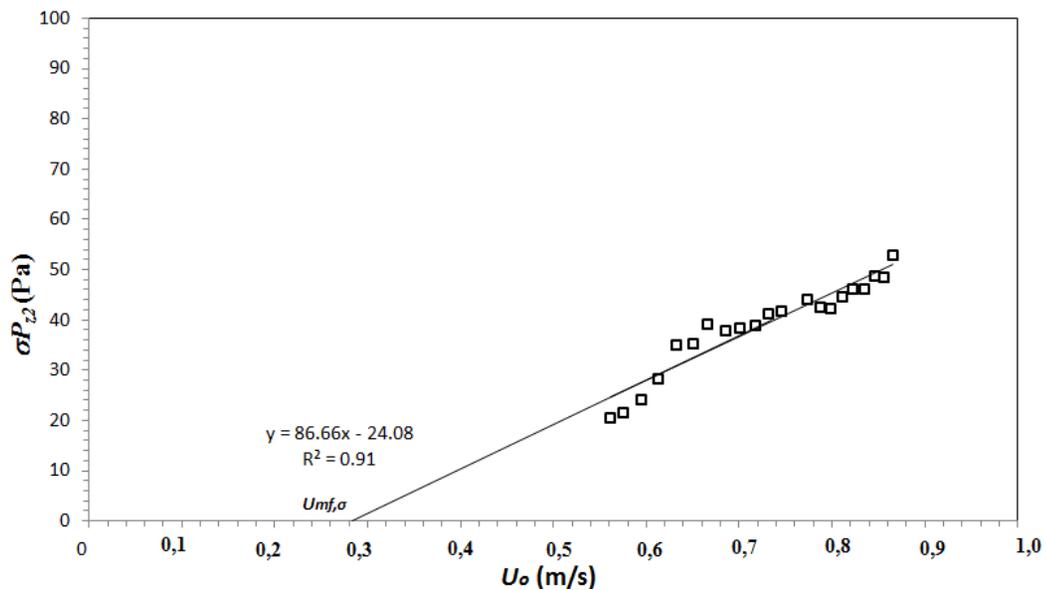


Figura 6.45 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $P_{z_2}$  como função da  $U_o$  com a mistura  $(PL-VG)_1$

Na tabela 6.9 são apresentados os resultados obtidos para a velocidade de mínima fluidização da mistura  $(PL-VG)_1$ , tanto pelo método tradicional ( $U_{mf}$ ) como por três variações do método baseado na medida do desvio padrão das medidas de pressão ( $U_{mf,\sigma}$ ) para o transdutor do plenum, além dos resultados obtidos a partir das medidas obtidas pelos transdutores localizados em  $z_1$  e em  $z_2$ , apresentando os resultados como foi feito para a mistura VF-VG na Tab. 6.5. O resultado obtido considerando apenas os dados da região 2 forneceu um desvio de 8,9% em relação ao obtido pelo método tradicional. Esse resultado indica ser essa a região que deve ser levada em consideração para a determinação da velocidade de mínima fluidização a partir das medidas de flutuações de pressão em misturas com tendência à segregação. Os resultados obtidos a partir dos transdutores localizados acima da placa distribuidora apresentaram desvios entre 26,8 e 50% em relação ao obtido pelo método tradicional.

Tabela 6.9 - Resultados para a determinação da  $U_{mf,\sigma}$  na mistura *PL-VG*

Mistura	Transdutor	$U_{mf}$ (m/s)	$U_{mf,\sigma}$ (m/s)	$\Delta U_{mf,\sigma}$ (%)
<i>PL-VG</i>	<i>Pplenum, regiões 2,3 e 4</i>	0,56	0,48	14,3
	<i>Pplenum, região 2</i>		0,51	8,9
	<i>Pplenum, regiões 3 e 4</i>		0,46	17,9
	<i>Pz1</i>	-	0,41	26,8
	<i>Pz2</i>	-	0,28	50,0

Na tabela 6.10 são apresentadas as velocidades inerentes ao fenômeno de segregação para a mistura (*PL-VG*). Também é apresentado o desvio porcentual calculado com a Eq. 5.12 para cada velocidade ( $U_{fv}$ ,  $U_s$ , e  $U_{fc}$ ).

Tabela 6.10– Resultados na determinação das velocidades inerentes ao fenômeno da segregação para a mistura binária (*PL-VG*)

Material	Teste	Transdutor	$U_{if}$ (m/s)	$U_s$ (m/s)	$U_{tf}$ (m/s)	$U_{mf}$ (m/s) (plenum)	$\Delta \bar{U}_{mf}$ (%)	$\Delta \bar{U}_{if}$ (%)	$\Delta \bar{U}_s$ (%)	$\Delta \bar{U}_{tf}$ (%)
<i>PL-VG</i>	1	<i>Pz1</i>	0,48	0,66	0,78	0,56	0,0	0,0	0,0	0,0
		<i>Pz2</i>	0,48	0,67	0,78			0,0	1,5	0,0
		<i>Pplenum</i>	0,48	0,66	0,78			0,0	0,0	0,0
	2	<i>Pz1</i>	0,49	0,66	0,77	0,56	0,0	2,1	0,0	1,3
		<i>Pz2</i>	0,48	0,66	0,78			0,0	0,0	0,0
		<i>Pplenum</i>	0,49	0,67	0,78			2,1	1,5	0,0
	3	<i>Pz1</i>	0,48	0,66	0,78	0,57	1,8	0,0	0,0	0,0
		<i>Pz2</i>	0,49	0,66	0,77			2,1	0,0	1,3
		<i>Pplenum</i>	0,48	0,67	0,77			0,0	1,5	1,3
<b>Valor médio</b>			<b>0,48</b>	<b>0,66</b>	<b>0,78</b>	<b>0,56</b>				

A tabela 6.10 mostra que houve repetitividade dos valores obtidos, nos três ensaios realizados, para as velocidades do gás correspondentes a  $U_{fi}$ ,  $U_s$ ,  $U_{fc}$  e  $U_{mf}$ . O desvio entre cada resultado de  $U_{mf}$  determinado pelo sensor localizado no plenum e o valor médio de  $U_{mf}$  obtido considerando as três repetições apresentou um valor máximo de 1,8%. Para os valores correspondentes às velocidades inerentes ao fenômeno da mistura o máximo desvio obtido foi de 2,1%.

### **6.3.2. Comportamento das flutuações de pressão no domínio do tempo para a mistura (PL-VG)**

As figuras 6.46 a 6.60 ilustram o sinal de pressão no leito adquirido no *plenum* e nas posições  $z_1$  e  $z_2$  para a mistura (PL-VG)<sub>1</sub>. Além do valor da velocidade superficial do gás,  $U_o$ , na legenda de cada gráfico também é indicado o regime de contato gás-sólido. É apresentada uma comparação com os sinais de pressão dos materiais isolados para auxiliar na identificação do fenômeno de segregação.

É importante lembrar que os testes com as misturas foram realizados da condição de leito misturado, Fig. 6.46(n), até a condição de leito fixo, Fig. 6.46(a), como já foi mostrado nas Figs 6.19 a 6.33 para a mistura VF-VG. O comportamento observado para essa mistura foi semelhante ao observado para a mistura PL-VG.

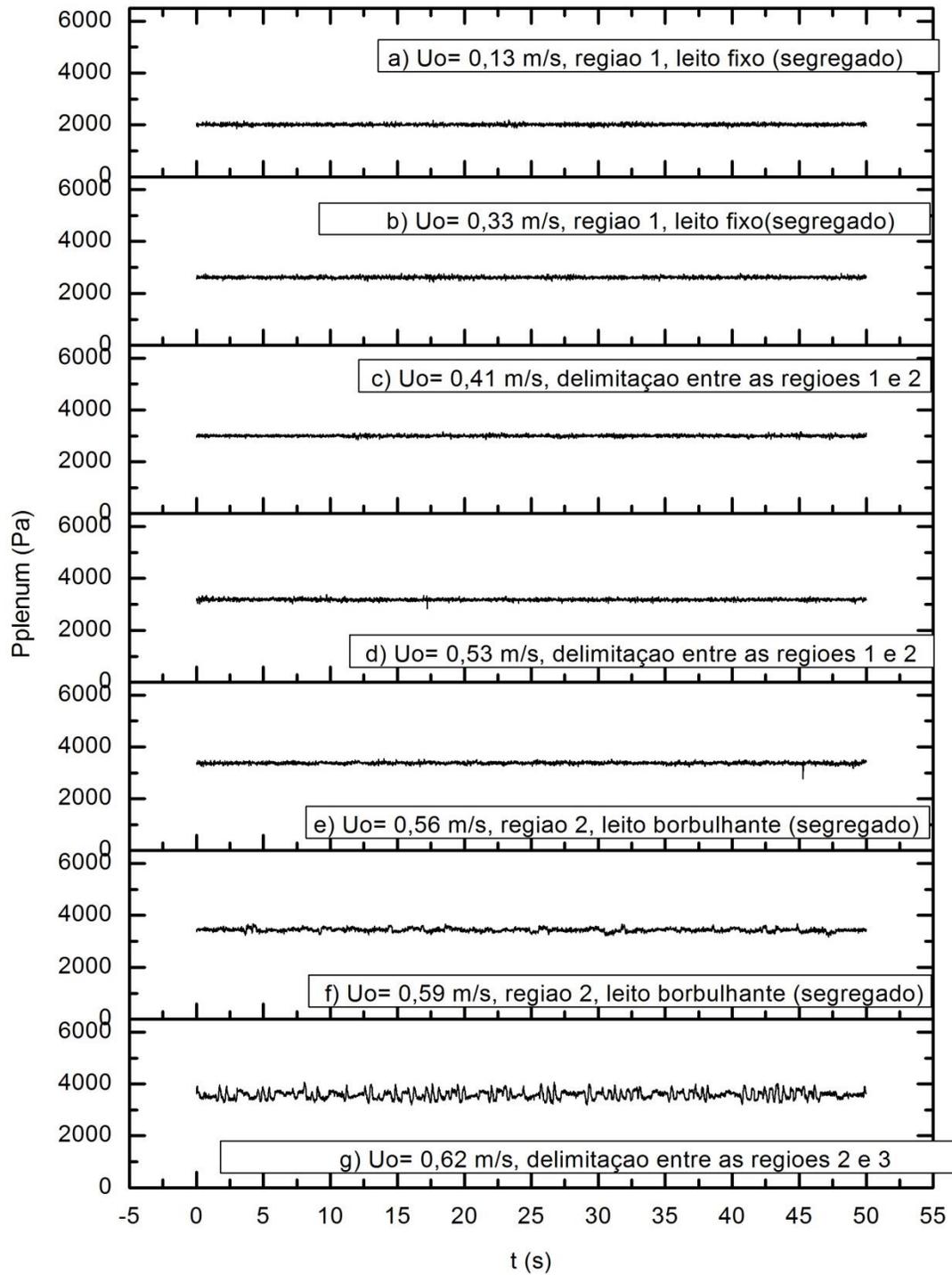


Figura 6.46 - Sinais de pressão no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) com a mistura  $(PL-VG)_1$ .

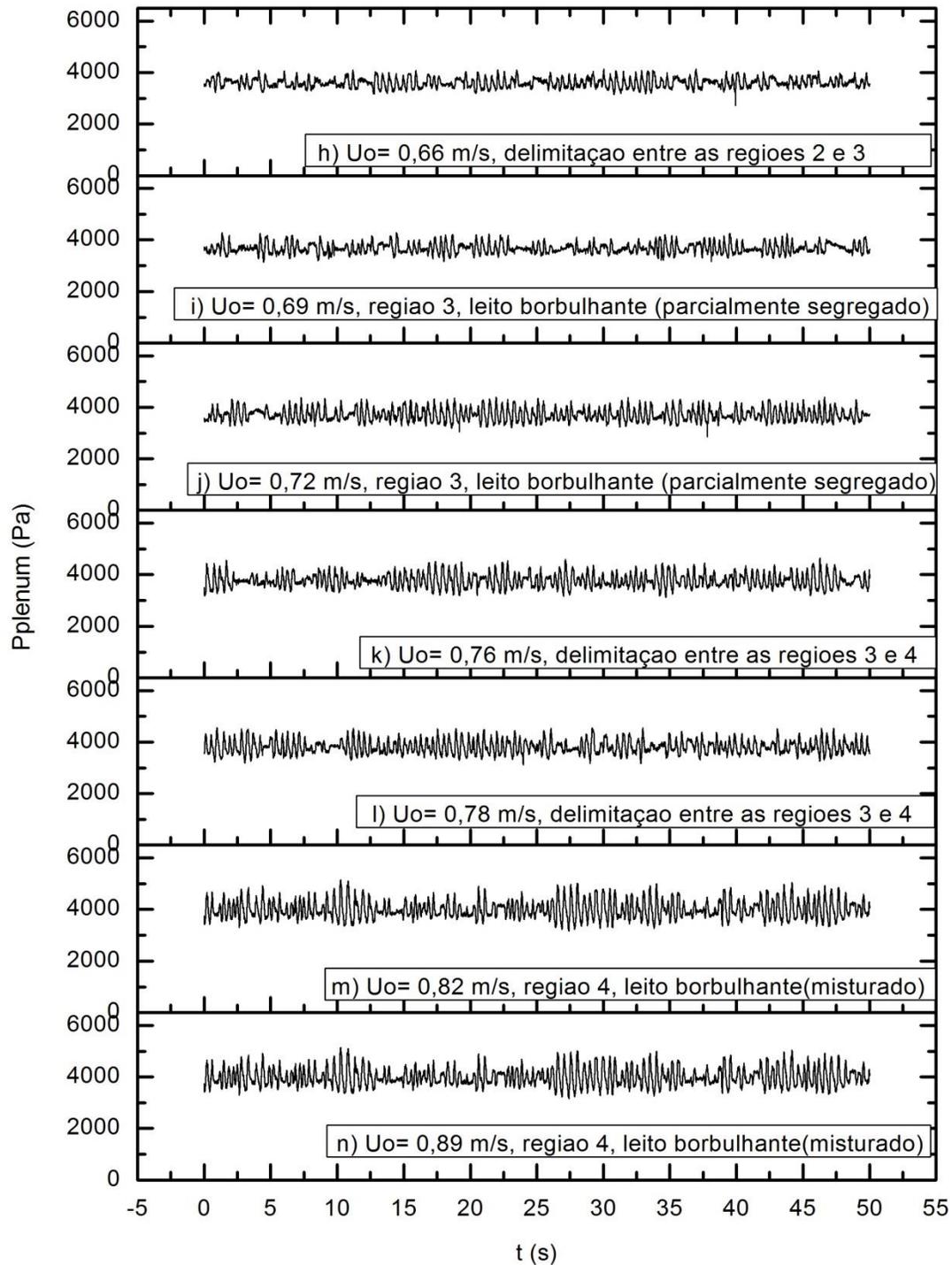


Figura 6.46 (cont.) - Sinais de pressão no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) com mistura ( $PL-VG$ )<sub>1</sub>.

Na figura 6.46 pode-se observar que, sob o regime de leito fixo e no início da região 2 quando os materiais que compõem a mistura estão segregados com o plástico no topo do leito e vidro grosso no fundo, não foi percebida a ocorrência de flutuações de pressão consideráveis como visto nas Figs. 6.46(a) a 6.46(e).

Nos sinais de transição do regime de leito fixo para regime de leito borbulhante, Figs. 6.46(c) e 6.46(d) pode-se observar um leve aumento da pressão, pode-se ver já o início da fluidização do plástico pelo aumento nas vibrações de suas partículas e pelas pequenas bolhas que aparecem no topo do leito. Nesta condição, o vidro grosso permanece em regime de leito fixo no fundo do leito e as flutuações do sinal de pressão apresentam amplitude da ordem de 50 Pa.

Os sinais apresentados para o vidro grosso fazem parte dos sinais adquiridos no primeiro teste. Alguns destes sinais já foram apresentados no item anterior onde foram analisados e comparados sinais para a mistura (*VF-VG*) com o vidro fino e o vidro grosso.

A fim de permitir a comparação dos sinais das misturas com aqueles obtidos com materiais isolados, a Fig. 6.46 apresenta sinais de flutuação de pressão para o plástico e o vidro grosso (*VG*) e para a mistura entre plástico e vidro grosso (*PL-VG*) na mesma velocidade superficial do gás  $U_o = 0,41$  m/s, obtidos com o transdutor instalado no *plenum*. Nesta condição, o leito contendo apenas plástico apresenta um comportamento característico de regime borbulhante em função das amplitudes das flutuações de pressão observadas. O leito contendo a mistura apresenta regime de leito fixo como pode ser verificado pela redução da amplitude dos sinais. Portanto, o plástico atinge, com uma velocidade de 0,41 m/s, o regime de leito borbulhante, o sinal para o plástico apresenta flutuações de pressão menores que as observada para o vidro grosso e o vidro fino quando estes atingiram o comportamento de leito borbulhante (Fig. 47b). Para a mistura, Fig. 6.47(c), não se percebe a ocorrência de borbulhamento nessa velocidade do gás.

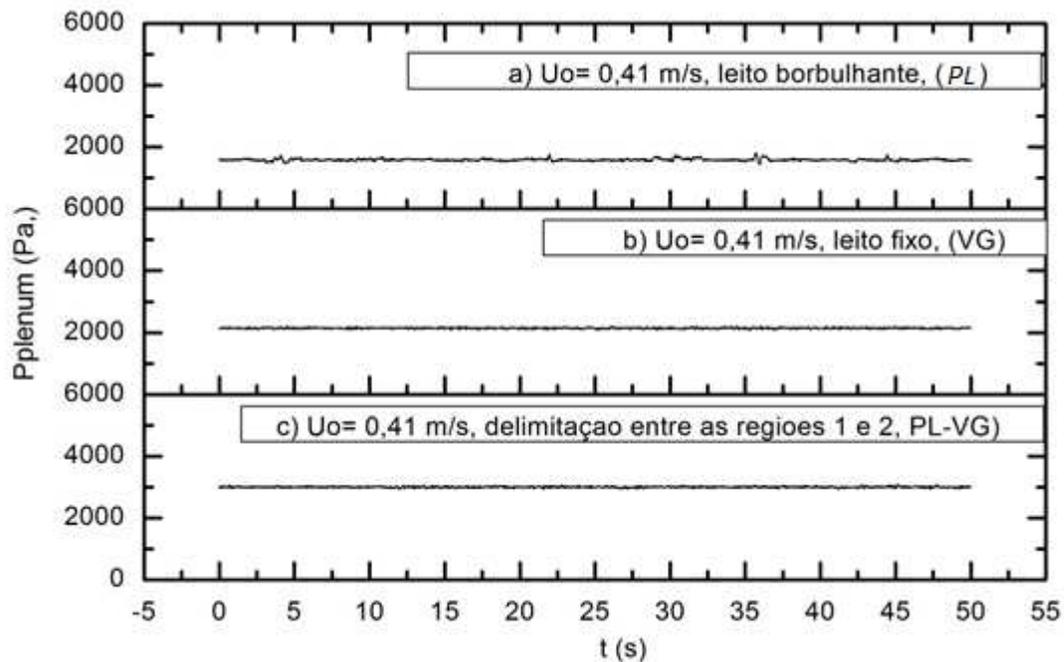


Figura 6.47- Sinais de pressão no *plenum* com os materiais isolados e com a mistura (PL- VG):

$$U_o = 0,41 \text{ m/s}$$

Na figura 6.48 são apresentados os sinais obtidos para  $U_o$  igual a 0,56 m/s, onde só há os sinais obtidos no teste para o vidro grosso e os sinais da mistura (PL-VG). O plástico não foi estudado nesta velocidade nem em velocidades maiores pelo fato de estar já em regime turbulento, o estudo da segregação foi limitado para o regime borbulhante. Nos gráficos, observe-se que a pressão média da mistura é igual que para o vidro grosso. Para o vidro grosso na Fig. 6.48(a), o sinal observado é característico de um leito fixo onde não se percebe a presença de bolhas que ocasionam as flutuações de pressão. Os dois sinais são representativos da vibração de partículas pela passagem do ar, mas, na mistura, Fig. 6.48(b), o plástico já apresenta movimentação ascendente que é registrada com um aumento das flutuações de pressão em comparação com o VG.

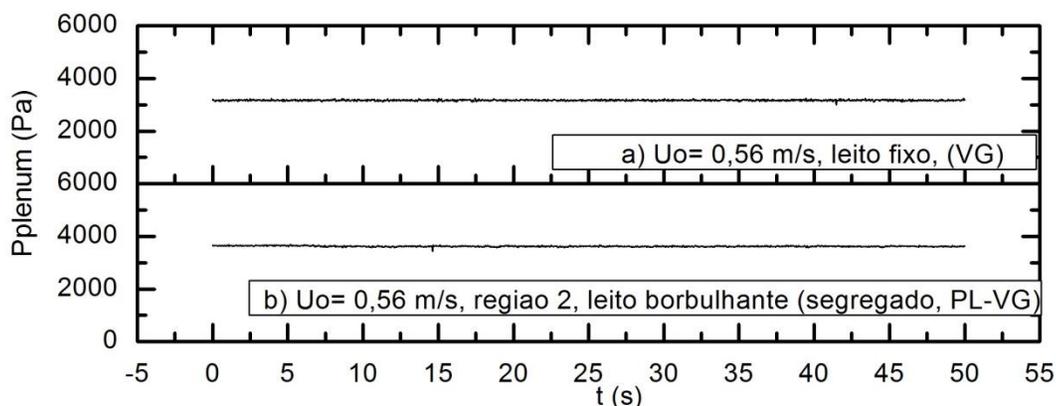


Figura 6.48 –Sinais de pressão no *plenum* com o vidro grosso (VG) e com a mistura, (PL- VG):

$$U_o = 0,56 \text{ m/s}$$

Nos sinais correspondentes à região 2, as partículas estão se movimentando num regime de leito parcialmente fluidizado como é discutido no trabalho de Gauthier *et al.* (1999). Nesta situação, o plástico encontra-se no topo do leito onde se observa a passagem das bolhas pequenas. O vidro grosso, que se encontra no fundo do leito, tem uma movimentação característica de um leito fixo com o ar passando entre as microesferas de vidro, mas não consegue promover grandes movimentações nas partículas de VG, a pressão média do sinal para a mistura é maior que para o vidro grosso apresentando valores de 3900 e 3600 Pa, respectivamente,

Na figura 6.49 estão apresentados os gráficos dos sinais de pressão obtidos para a velocidade de 0,72 m/s, onde se observa que o vidro grosso apresenta um comportamento de regime borbulhante em função da amplitude das flutuações. Esse mesmo regime foi observado para a mistura. A pressão média observada é próxima entre a mistura e o vidro grosso, aproximadamente 4000 Pa, mas a amplitude do sinal para a mistura flutua em 900 Pa, Fig. 6.49(b), enquanto que para o vidro grosso essa flutuação é de apenas 100 Pa, O comportamento observado para a mistura e para o vidro grosso indica a presença de diferentes tamanhos de bolhas ascendendo pela coluna do leito. Porém, nos testes foram observadas bolhas de maior tamanho e em maior quantidade na mistura do que para o vidro grosso isolado.

Nesta região 3 se pode ver, ainda, o plástico no topo do leito, porém, que partículas de vidro grosso já estão sendo elevadas para o topo pelas bolhas de ar. Portanto, nesta região, o topo do leito já possui uma pequena porcentagem de partículas de vidro grosso.

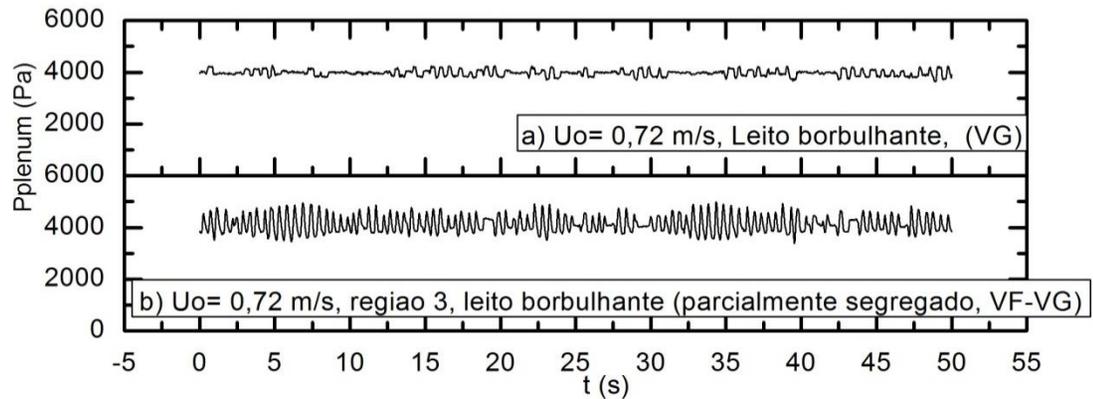


Figura 6.49 - Sinais de pressão no *plenum* com o vidro grosso (VG) e com a mistura (PL-VG):  $U_o = 0,72$  m/s

Na região 4 de leito misturado, não se identifica uma camada de algum material, pois, os dois materiais encontram-se misturados. O comportamento do leito é muito parecido com o comportamento do leito de vidro grosso. A pressão identificada é similar para a mistura e para o vidro grosso, aproximadamente 4100 Pa.

Na Fig. 6.50, os sinais de pressão para o vidro grosso e para a mistura apresentam um comportamento de leito borbulhante, com bolhas regulares em tamanho e em quantidade, mas as bolhas são maiores que as observadas na mistura (PL-VG).

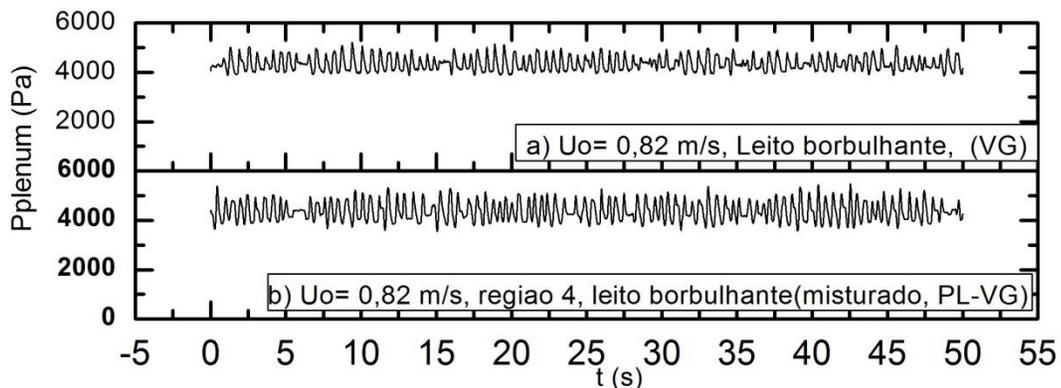


Figura 6.50 - Sinais de pressão no *plenum* com o vidro grosso (VG) e com a mistura (PL-VG):  $U_o = 0,82$  m/s

Na Figura 6.51, são apresentados os sinais para a mistura (*PL-VG*) na posição  $z_j$ . A escala do eixo vertical foi mantida a fim de permitir comparações entre as figuras, desde o regime de leito fixo até o leito borbulhante. Verifica-se a ocorrência de aumento considerável da amplitude dos sinais de flutuação de pressão registrados pelo transdutor instalado no *plenum* de cerca de 50 Pa com  $U_o = 0,13$  m/s até 1000 Pa com  $U_o = 0,82$  m/s. Esses valores foram identificados a partir dos dados coletados.

No regime de leito fixo, Fig. 6.51(a) e 6.51(b), como já observado para os sinais do *plenum*, não é percebida a ocorrência de uma flutuação de pressão considerável e isto é observado até a região 2 Fig. 6.51(f), a pressão tem um leve aumento de 1000 Pa a 1500 Pa na faixa de velocidade entre 0,13m/s a 0,56 m/s, sendo um valor muito menor que o observado no *plenum* que foi de 2000 Pa para a velocidade de 0,13 m/s e 3500 Pa para 0,56 m/s.

Nos sinais correspondentes à região de leito segregado até a região onde o leito está misturado, não se observa uma mudança significativa na pressão média, registrando um valor de 1500 Pa.

Com o aumento da velocidade do gás aumenta a amplitude das flutuações. Entre os sinais da região 2 de leito segregado e os sinais da região 4 de leito misturado, o aumento de pressão média foi de 50 Pa.

Na figura 6.52 são apresentados os sinais de pressão no domínio do tempo adquiridos na posição  $z_j$  para o plástico, vidro grosso e para a mistura (*PL-VG*). O sinal do plástico representa um regime borbulhante com bolhas de diferente tamanho e com flutuações com amplitudes maiores do que as que foram identificadas nos sinais do vidro grosso e da mistura, que ainda apresentam um comportamento do leito fixo na velocidade de 0,41 m/s.

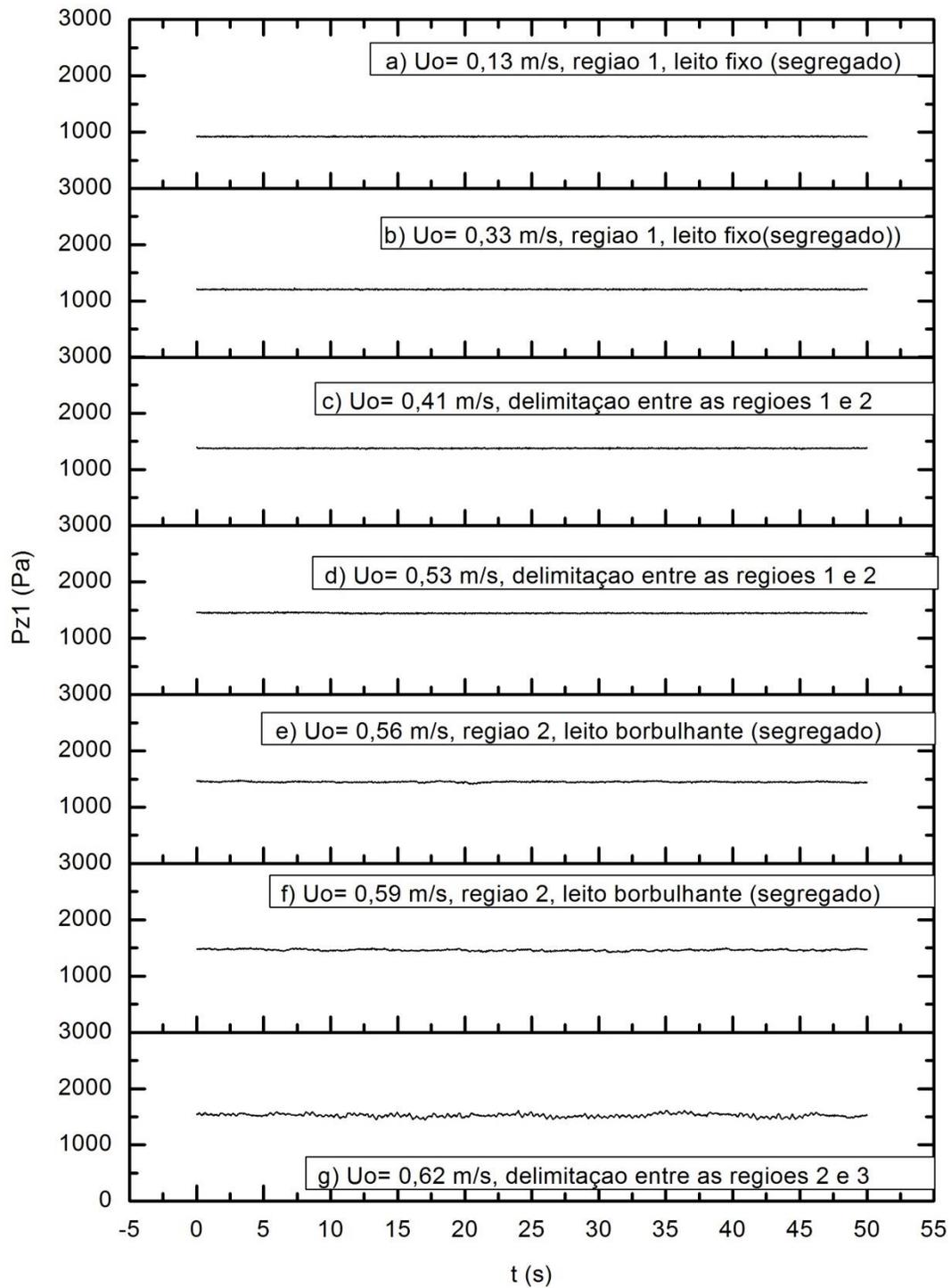


Figura 6.51- Sinais de pressão do transdutor na posição  $z_1(P_{z1})$  com a mistura  $(PL-VG)_1$ .

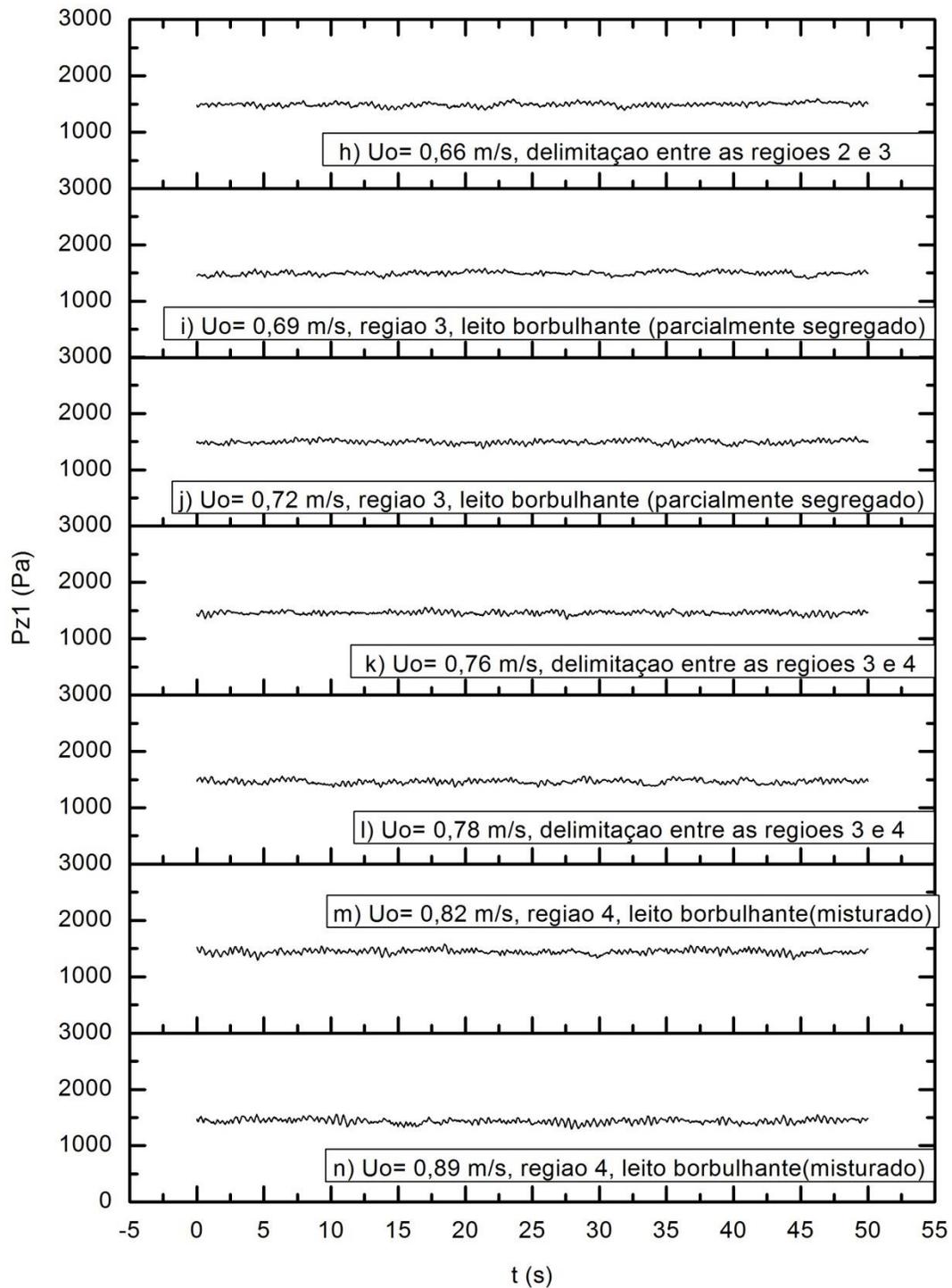


Figura 6.51 - (cont.) - Sinais de pressão do transdutor na posição  $z_1(P_{z1})$  com a mistura  $(PL-VG)_1$ .

Na Fig. 6.52 correspondente à velocidade de 0,41 m/s, observar-se que, para os sinais adquiridos em  $z_1$ , a mistura e vidro grosso apresentam um sinal característico do leito fixo. Nesta condição se esperaria que os sinais adquiridos fossem símiles entre o vidro grosso e a mistura pelo fato da tomada de pressão estar localizada na camada do leito ocupada pelo vidro grosso. Entretanto, os sinais de pressão da mistura registram o comportamento do vidro grosso no fundo do leito que apresenta um comportamento de leito fixo e não o comportamento do plástico no topo do leito que apresenta um comportamento de leito borbulhante.

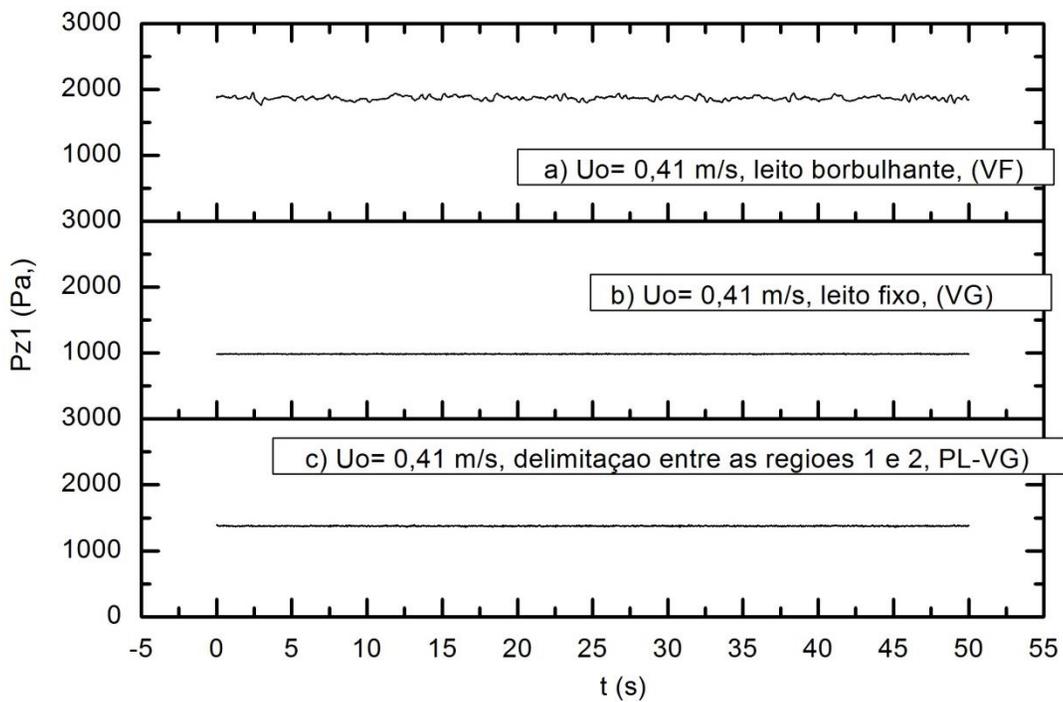


Figura 6.52 - Sinais de pressão na posição  $z_1$  para os materiais isolados e para a mistura (PL- VG) com  $U_o = 0,41$  m/s,

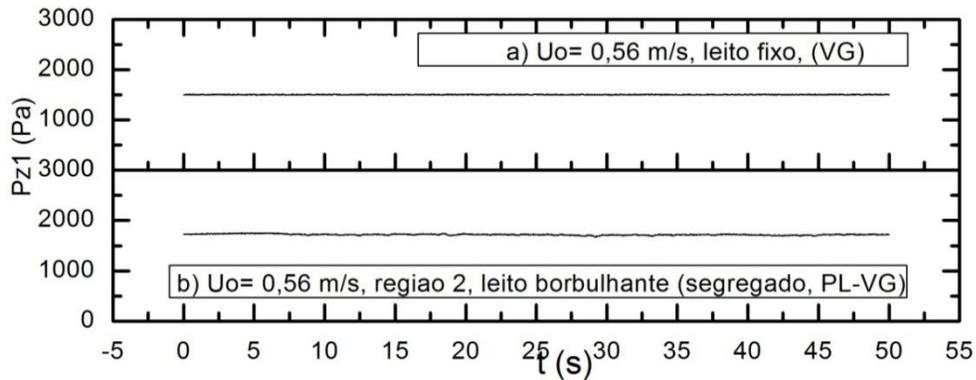


Figura 6.53 - Sinais de pressão na posição  $z_1$  com o vidro grosso (VG) e com a mistura (PL- VG):  
 $U_o = 0,56$  m/s.

Os sinais correspondentes à região 2 de leito segregado, Fig. 6.53(b), apresentaram flutuações de pressão com um comportamento gerado pelo ar que atravessa a camada de vidro grosso, mas não o transportam para o topo do leito. A diferença entre a pressão média é muito pequena, 1800 Pa para a mistura e 1600 Pa para o vidro grosso.

Na Fig. 6.54, pode-se observar o sinal para o vidro grosso na velocidade de 0,72 m/s apresenta comportamento de leito fluidizado.

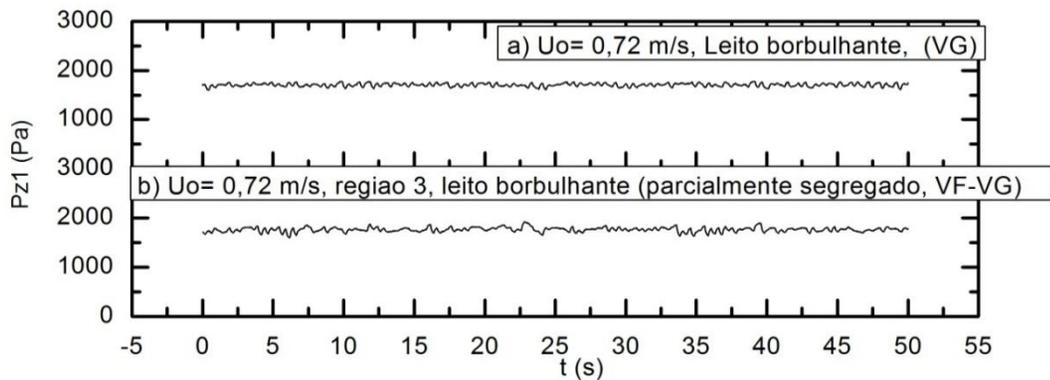


Figura 6.54 - Sinais de pressão na posição  $z_1$  com o vidro grosso (VG) e com a mistura (PL- VG):  
 $U_o = 0,72$  m/s

O sinal correspondente à região 3 de leito parcialmente segregado apresenta flutuações com variações periódicas geradas pelo aumento das bolhas e pelo aumento da velocidade do gás. O valor da pressão média para o vidro grosso e para a mistura é igual a 1600 Pa.

Na figura 6.55, os sinais do vidro grosso e da mistura apresentam comportamento de regime de leito borbulhante.

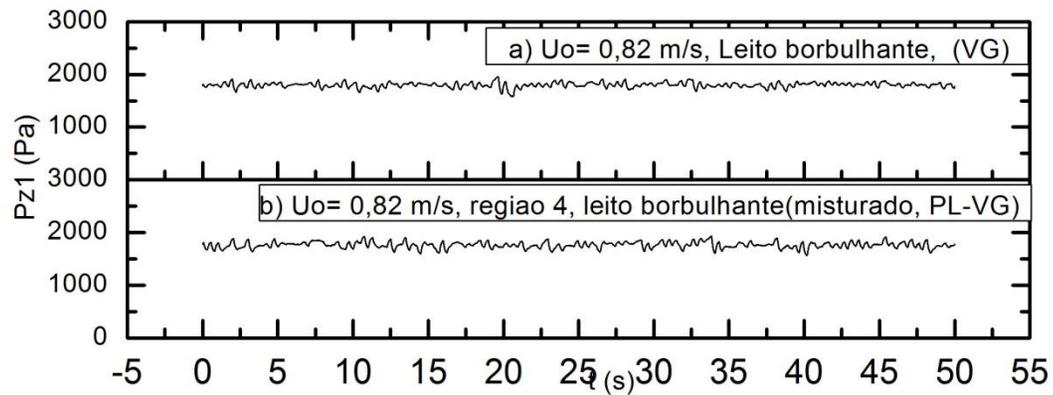


Figura 6.55 - Sinais de pressão na posição  $z_1$  com o vidro grosso (VG) e com a mistura (PL-VG):  $U_o = 0,82$  m/s

Na Figura 6.56, são apresentados os sinais para a mistura (PL-VG) na posição  $z_2$  onde da mesma forma que para os casos anteriores, a escala do eixo vertical foi mantida a fim de permitir comparações entre os sinais do regime de leito fixo e os sinais do leito borbulhante.

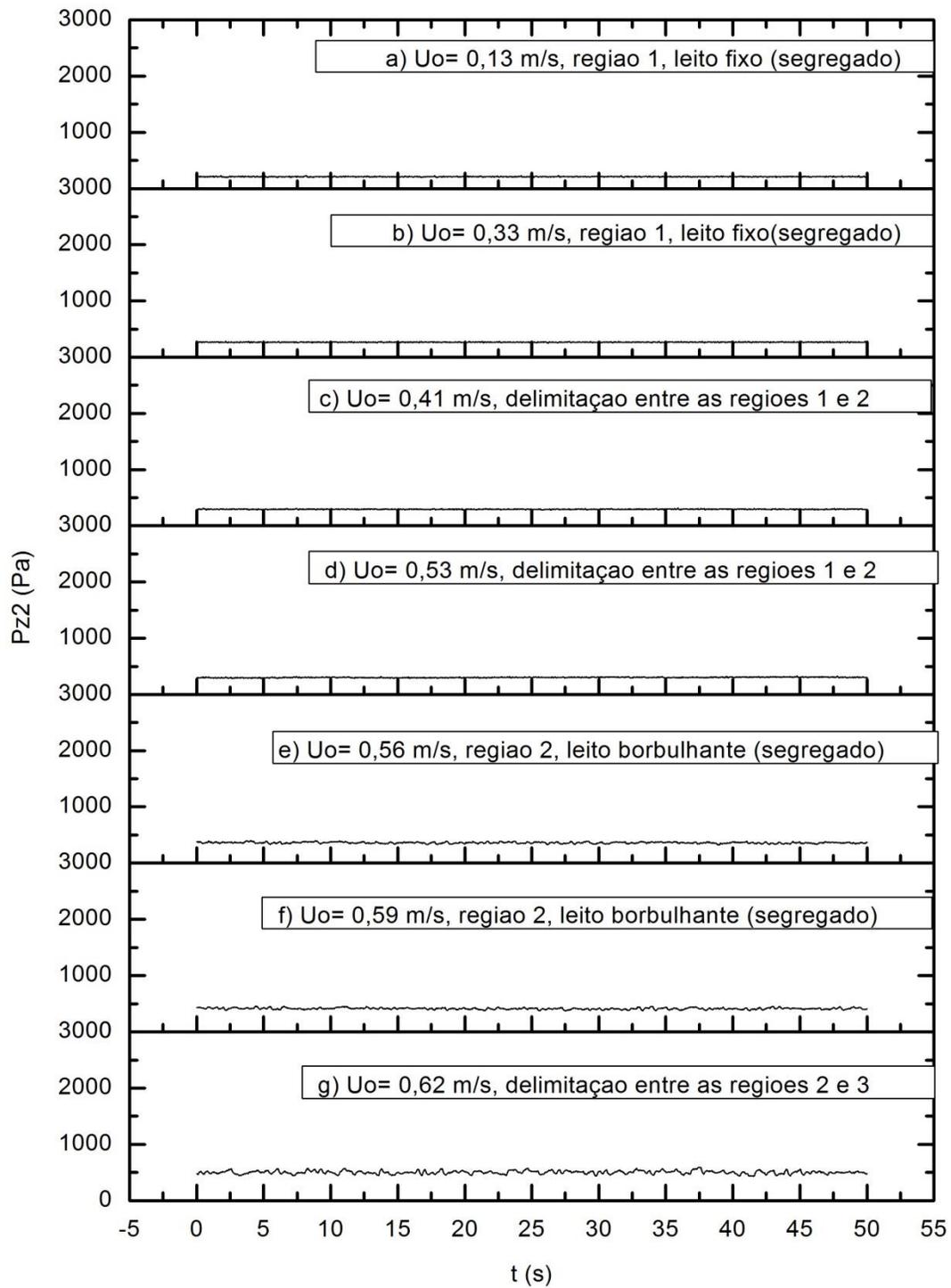


Figura 6.56 - Sinais de pressão na posição  $z_2$  ( $P_{z2}$ ) com a mistura  $(PL-VG)_1$ .

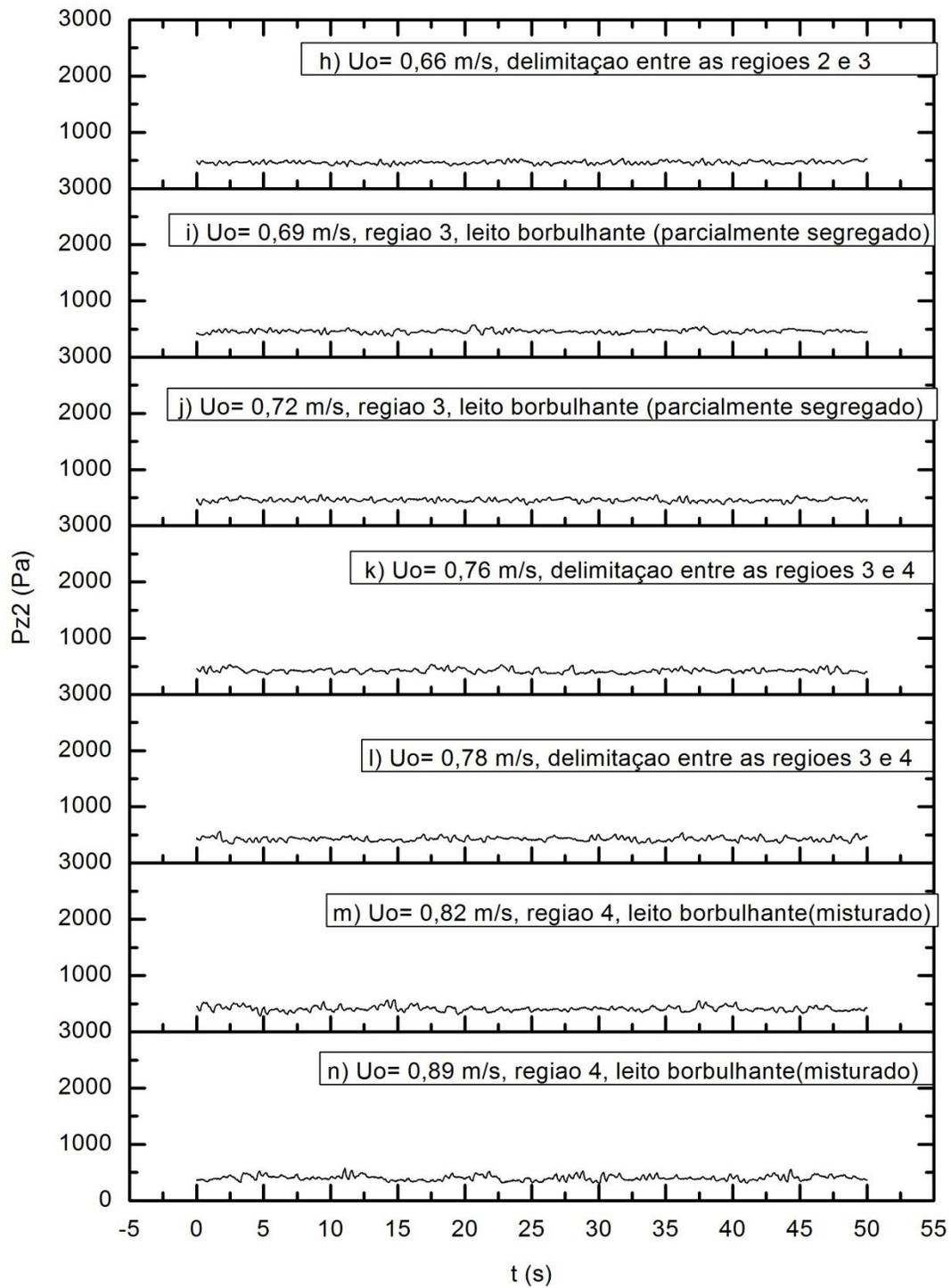


Figura 6.56 (cont.) - Sinais de pressão na posição  $z_2$  ( $P_{z2}$ ) com a mistura  $(PL-VG)_1$ .

A Fig. 6.57 apresenta, para a velocidade de 0,41 m/s, os sinais de cada um dos componentes isolados, Fig. 6.57(a) e 6.57(b), e os sinais observados para a mistura, Fig. 6.57(c). Verifica-se que, para esse valor de  $U_o$ , tanto VG como a mistura (PL-VG) estão em regime de leito fixo, sendo que, apesar do plástico já encontrar-se fluidizado, ocorrem flutuações imperceptíveis de pressão, e que o valor médio da pressão é muito menor que os observados com o vidro grosso e com a mistura.

Os sinais para os três materiais parecem apresentar o comportamento de leito fixo, mas o plástico está com um comportamento de leito borbulhante.

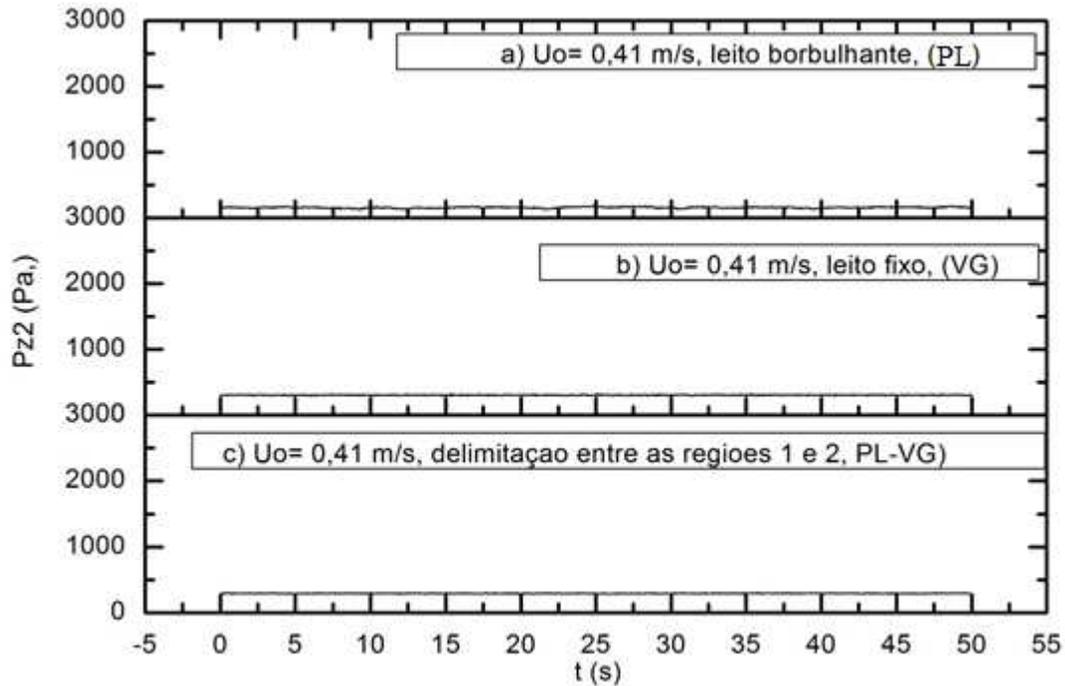


Figura 6.57 - Sinais de pressão na posição  $z_2$  com os materiais isolados e com a mistura (PL-VG):  $U_o = 0,41$  m/s.

Na velocidade do gás igual a 0,56 m/s, o leito contendo a mistura PL-VG apresenta comportamento de leito parcialmente fluidizado. As flutuações registradas pelo transdutor colocado em  $z_2$  correspondem ao comportamento das partículas de plástico que estão fluidizadas no topo do leito. Não são observadas variações entre os sinais do vidro grosso e da mistura. As

amplitudes dos sinais para o vidro grosso tem um comportamento muito parecido com valores de pressão média de 1600 Pa para o material *VG* e de 1700 Pa para a mistura [Fig. 6.58 (a) e 6.58 (b)]. Os sinais do componente *PL* isolado não foram obtidos experimentalmente para  $U_o$  maiores a 0,41 m/s, daí não serem apresentados na Fig. 6.58. O leito contendo plástico encontrava-se totalmente fluidizado desde  $U_o$  igual a 0,30 m/s os testes para esse material foram feitos até velocidades de gás ao redor de 0,45 m/s.

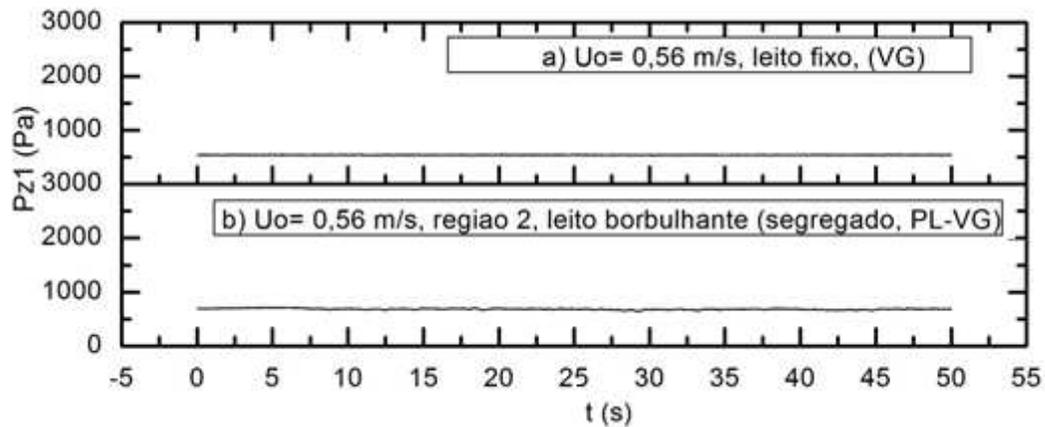


Figura 6.58- Sinais de pressão medidos na posição  $z_2$  com o vidro grosso (*VG*) e com a mistura (*PL- VG*):  $U_o = 0,56$  m/s

Os sinais correspondentes à região 2, onde o leito encontra-se segregado até a região 4 e, portanto, onde o leito está misturado, não apresentam uma variação significativa na pressão média, registrando um aumento de 200 Pa com respeito à pressão média do leito fixo. A Fig. 6.59 permite a comparação entre os sinais obtidos nos testes com (*VG*) e com a mistura, Fig. 6.59(a) e 6.59(b), para  $U_o$  igual a 0,72 m/s, verifica-se o comportamento de leito fluidizado pelas pequenas flutuações de pressão no sinal.

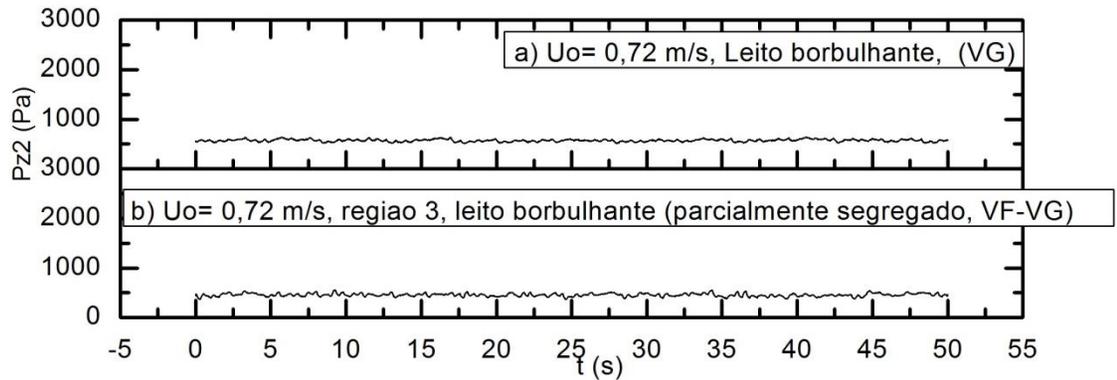


Figura 6.59 - Sinais de pressão medidos na posição  $z_2$  com o vidro grosso (VG) materiais isolados e com a mistura (PL- VG):  $U_o=0,72$  m/s

Na comparação entre os sinais do vidro grosso e da mistura na Fig. 6.60, se observa que a amplitude do sinal aumenta com o aumento da velocidade do gás, porém, nesta posição, é difícil identificar uma diferença entre os sinais correspondentes ao vidro grosso e à mistura, eles têm comportamentos parecidos, com pressões médias de 600 Pa.

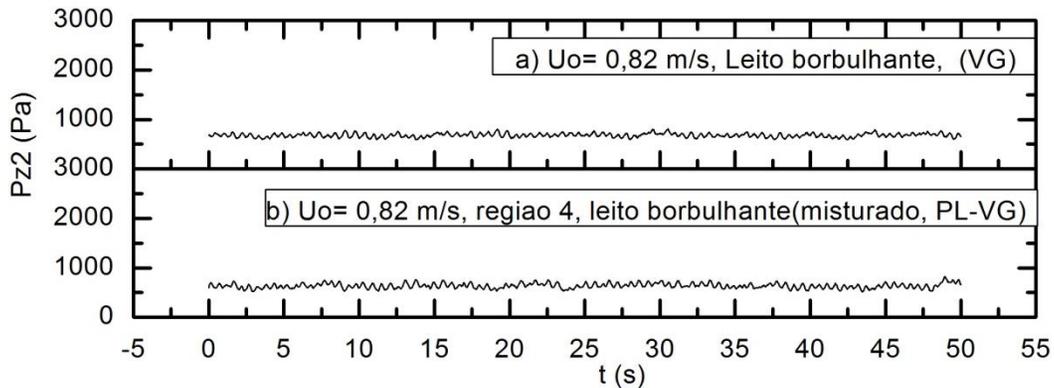


Figura 6.60 - Sinais de pressão na posição  $z_2$  com o vidro grosso (VG) e com a mistura (PL- VG) com  $U_o=0,82$  m/s

Na posição  $z_2$  se registram sinais que são gerados pelas bolhas que passam e estouram no topo do leito. Eles apresentam variações em suas amplitudes de 200 Pa para o leito fixo, até 600 Pa para o leito borbulhante misturado.

Na tabela 6.11 pode-se ver a variação da pressão média com a velocidade do gás. Apresentam-se diferenças entre a pressão registrada, como a diminuição do valor da pressão média junto com o aumento na altura do leito. Observa-se a redução do valor da pressão média em cada posição com o aumento na altura da tomada de pressão.

Tabela 6.11 - Pressões médias obtidas ao longo do processo de fluidização para catorze diferentes velocidades superficiais do gás com a mistura  $(PL-VG)_1$ .

$U_o$ (m/s)	$\bar{P}_{plenum}$ (Pa)	$\bar{P}_{z1}$ (Pa)	$\bar{P}_{z2}$ (Pa)	Regime
0,13	1046,10	465,15	84,741	Região 1, leito fixo segregado)
0,33	2261,30	1052,20	240,34	Região 1, leito fixo segregado)
0,41	2889,20	1336,30	286,94	Delimitação entre as regiões 1 e 2.
0,53	3336,80	1449,90	363,69	Delimitação entre as regiões 1 e 2
0,56	3394,80	1445,30	402,09	Região2, leito borbulhante segregado.
0,59	3438,10	1440,50	446,45	Região2, leito borbulhante segregado.
0,62	3541,30	1511,60	493,91	Delimitação entre as regiões 2 e 3
0,66	3624,60	1526,80	504,51	Delimitação entre as regiões 2 e 3
0,69	3667,10	1514,90	488,14	Leito borbulhante parcialmente segregado
0,72	3735,10	1502,60	474,71	Leito borbulhante parcialmente segregado
0,76	3839,00	1484,00	457,82	Delimitação entre as regiões 3 e 4
0,78	3877,90	1465,30	455,87	Delimitação entre as regiões 3 e 4;
0,82	3995,90	1456,60	430,45	Região 4, leito borbulhante, misturado.
0,89	4264,90	1426,60	401,17	Região 4, leito borbulhante, misturado.

Na tabela 6.12 são comparadas diferenças entre os materiais isolados (*PL* e *VG*) e a mistura *PL-VG*. A faixa de velocidades de operação entre o leito fixo e o leito borbulhante para o material *PL* é 0,13 – 0,41 m/s, faixa menor que a utilizada no vidro grosso e na mistura (*PL-VG*) onde a faixa foi de 0,13 a 0,89 m/s.

Pode se observar igual que para a mistura *VF-VG* que quando o leito esta em regime borbulhante, a pressão media não tem uma variação significativa.

Tabela 6.12 - Comparação de velocidades e regimes de fluidização para os materiais isolados (*PL*) e (*VG*) e a mistura (*PL-VG*)<sub>1</sub>

<i>PL</i> <sub>1</sub>		<i>VG</i> <sub>1</sub>		<i>(PL-VG)</i> <sub>1</sub>	
<i>U</i> <sub>o</sub> (m/s)	Regime	<i>U</i> <sub>o</sub> (m/s)	Regime	<i>U</i> <sub>o</sub> (m/s)	Regime
0,13	Leito fixo	0,13	Leito fixo	0,13	Leito fixo
0,21	Leito fixo	0,51	Leito fixo	0,51	Leito fixo
0,31	Transição	0,62	Transição	0,61	Regime borbulhante
0,32	Transição	0,63	Transição	0,63	Regime borbulhante
0,36	Regime borbulhante	0,76	Regime borbulhante	0,77	Regime borbulhante
0,41	Regime borbulhante	0,89	Regime borbulhante	0,89	Regime borbulhante

A mistura é afetada pela quantidade de plástico presente nela. O plástico inicia sua fluidização com velocidades de ar menores que o vidro grosso, isto pode ser evidenciado no fato que para uma velocidade de 0,61 m/s em que o vidro grosso está na região de transição de leito fixo para leito borbulhante, e a mistura já atingiu o regime de leito borbulhante.

Para os sinais de pressão do plástico coletados no *plenum*, se pode observar uma variação máxima na pressão de 200 Pa. Para o vidro grosso a variação da pressão foi de 1800 Pa, enquanto na mistura a pressão variou em 1500 Pa.

A variação do sinal de pressão em *z*<sub>1</sub> e *z*<sub>2</sub>, para os materiais isolados e para a mistura, é regida pelo aumento da velocidade do gás, e pelas bolhas que estouram no topo do leito.

#### **6.4. Mistura de microesferas de plástico e vidro fino (*PL-VF*)**

Neste item, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com a mistura contendo 5% (em massa) de partículas de plástico (diâmetro médio de 971  $\mu\text{m}$ ) e 95% de partículas de vidro fino (diâmetro médio de 462  $\mu\text{m}$ ). A metodologia adotada permitiu a identificação de regiões com comportamentos fluidodinâmicos diferentes, bem como a determinação das velocidades inerentes ao fenômeno de segregação. Também o comportamento das flutuações de pressão para a mistura *PL-VF* é apresentado e discutido.

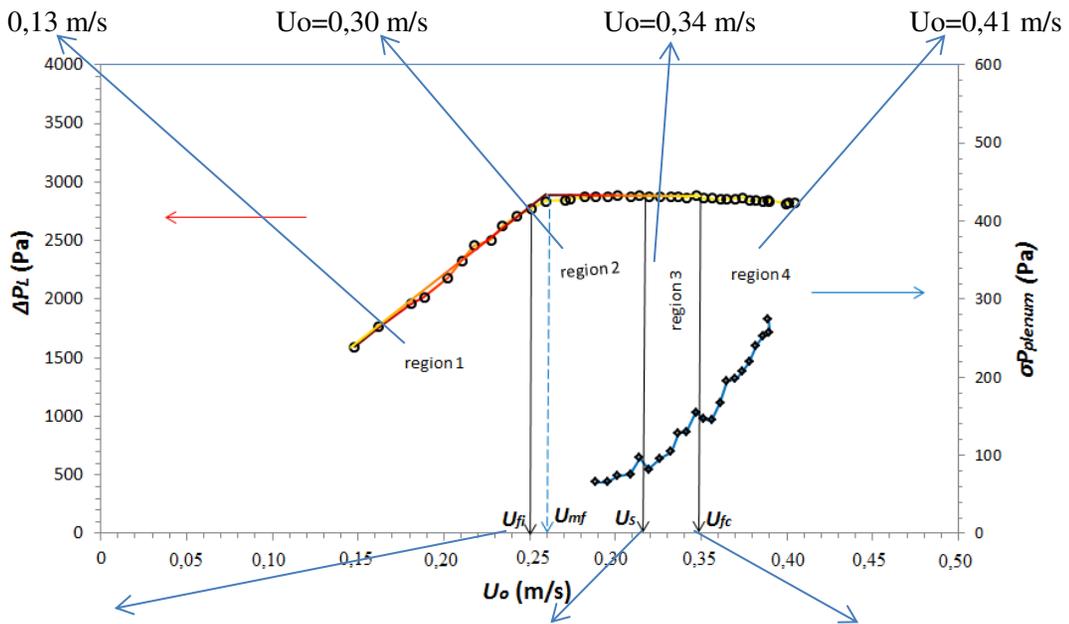
##### **6.4.1. Determinação das regiões de fluidização e das velocidades superficiais do gás inerentes ao fenômeno de segregação**

As figuras 6.61 e 6.62 apresentam a queda de pressão do leito e a Fig. 6.63 mostra a curva do desvio padrão da pressão medida no *plenum* em função de  $U_o$ . Esses resultados foram obtidos para o primeiro teste envolvendo a mistura (*PL-VF*)<sub>1</sub>. Nas Figs. 6.62 e 6.63 são apresentadas as curvas obtidas para cada componente da mistura, identificados por (*PL*)<sub>1</sub> e (*VF*)<sub>1</sub>, visando uma comparação entre o comportamento da mistura e seus componentes isolados.

Na figura 6.61 são apresentadas as fotos correspondentes a cada estado de fluidização analisados para os sinais no domínio do tempo.



Leito fixo segregado Leito segregado leito parcialmente segregado Leito misturado.



Delimitação entre regiões 1 e 2  $U_o = 0,26$  m/s      Delimitação entre regiões 2 e 3  $U_o = 0,31$  m/s      Delimitação entre regiões 3 e 4  $U_o = 0,35$  m/s

Figura 6.61 – Quedas de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* em função da velocidade superficial do gás com a mistura (PL-VF)

A figura 6.61 apresenta a curva do desvio padrão onde se podem ver as deflexões com que foram identificadas as delimitações entre as regiões,

Na figura 6.62 são apresentadas as curvas para a queda de pressão como função da velocidade superficial do gás, na posição do plenum. Nesta figura é possível perceber que a mistura tem uma velocidade de mínima fluidização menor que a  $U_{mf}$  do vidro fino e do plástico. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que a presença de partículas diferentes, mas que apresentam valores próximos de  $U_{mf}$ , favorece a fluidização da mistura permitindo o início da fluidização em velocidade inferior à dos componentes individuais. Na Fig. 6.63 são apresentadas as curvas do desvio padrão para o transdutor no *plenum*, em função da  $U_o$ , tanto para a mistura como para os materiais isolados.. A aplicação da metodologia descrita no cap. 5 (item 5.4) na curva levantada para a mistura permitiu identificar as velocidades de segregação ( $U_s$ ) e de fluidização completa ( $U_{fc}$ ).

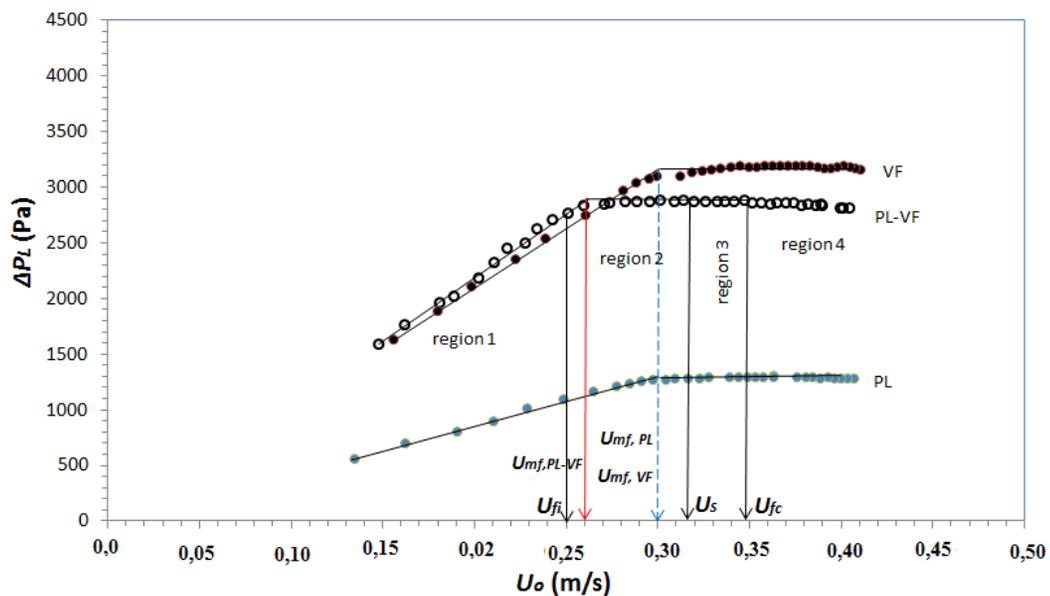


Figura 6.62 – Queda de pressão em função da velocidade superficial do gás medido no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) com os materiais  $(PL)_1$ ,  $(VF)_1$  e mistura  $(PL-VF)_1$

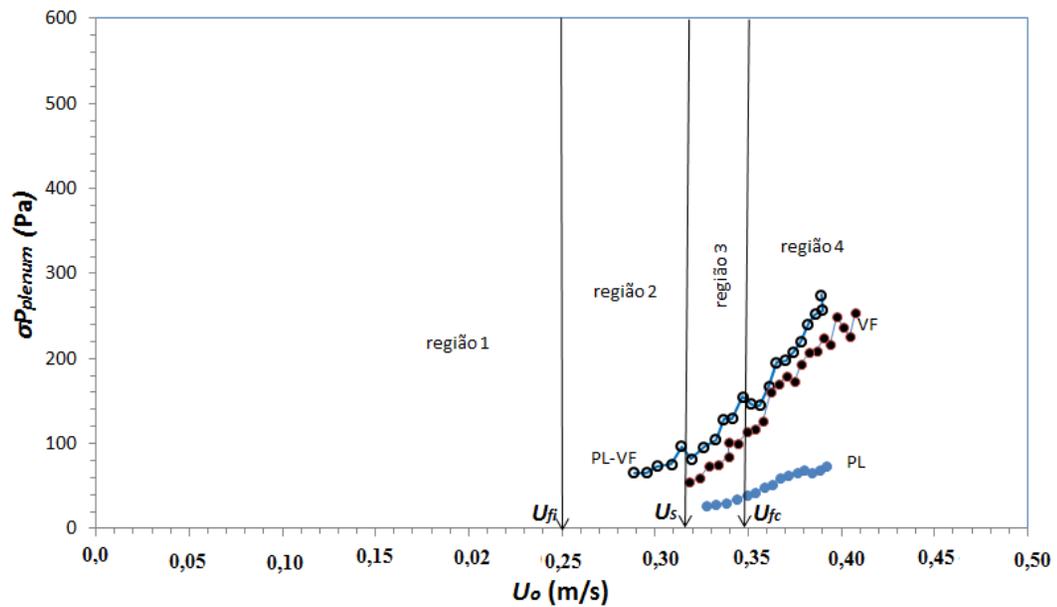


Figura 6.63 – Desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) em função da velocidade superficial do gás com os materiais  $(PL)_1$ ,  $(VF)_1$  e mistura  $(PL-VF)_1$

As figuras 6.64 e 6.65 apresentam os resultados obtidos em  $z_1$  e em  $z_2$  para a queda de pressão do leito e para o desvio padrão das flutuações de pressão, em função de  $U_o$ .

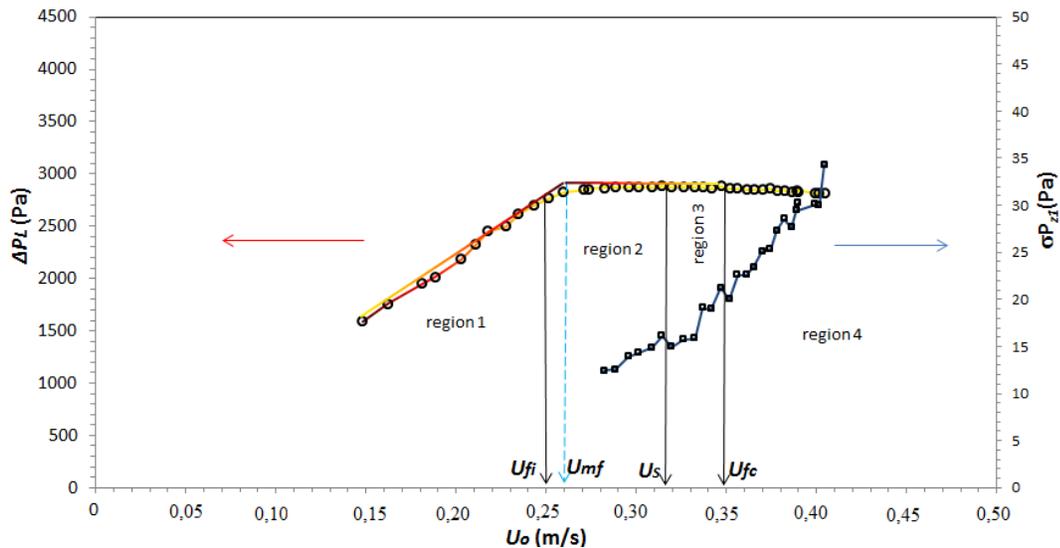


Figura 6.64 - Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $z_1$  em função da velocidade superficial do gás com a mistura  $(PL-VF)$ .

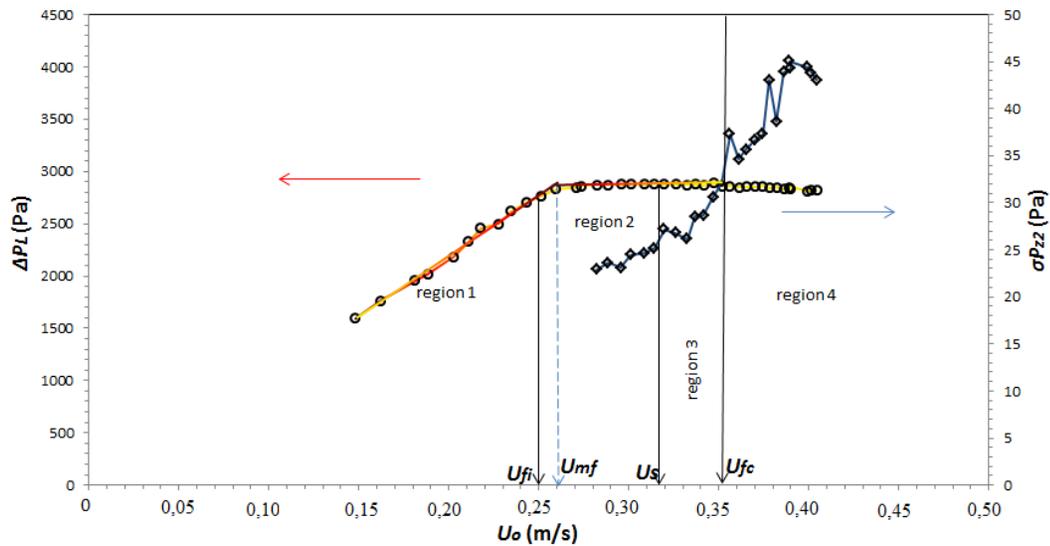


Figura 6.65 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás com a mistura ( $PL-VF$ )

As figuras 6.66 e 6.67 mostram que também nas posições  $z_1$  e  $z_2$  é possível identificar as velocidades inerentes ao fenômeno de fluidização e de segregação, conforme já identificado para a tomada no *plenum*.

A discussão dos resultados gerais obtidos a partir dos sinais de pressão coletados para a mistura  $PL-VF$  está apresentada no item 6.5.

Apartir dos dados do primeiro ensaio de cada material isolado e da mistura foram construídas as Figs 6.66 e 6.67, o desvio padrão dos sinais obtidos em  $z_1$  e  $z_2$  é graficado como função da velocidade superficial do gás, o intuito foi comparar as flutuações de pressão a partir do desvio padrão.

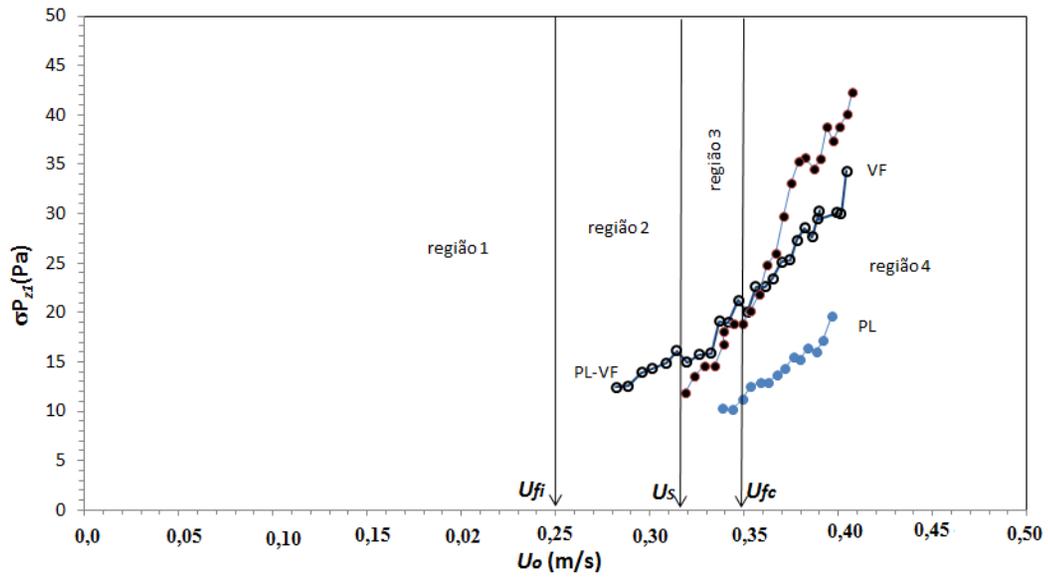


Figura 6.66- Desvio padrão das medidas de pressão medidos em  $z_1$  em função da velocidade superficial do gás com os materiais  $[(PL)_1, (VF)_1$  e mistura  $(PL-VF)_1]$

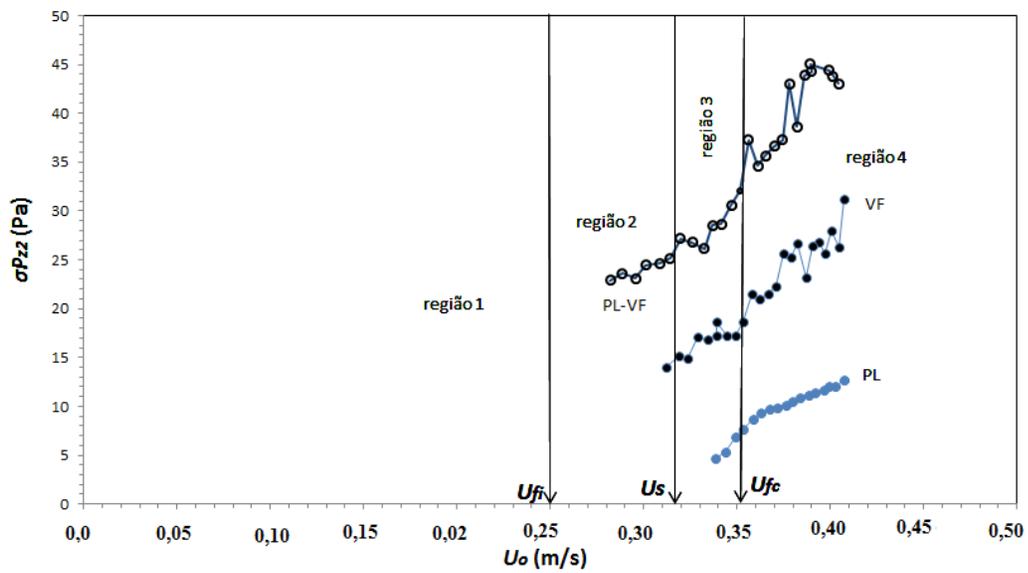


Figura 6.67 - Desvio padrão das medidas de pressão medidos em  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás com os materiais  $[(PL)_1, (VF)_1$  e mistura  $(PL-VF)_1]$

- **Análise da velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf,\sigma}$ ) para mistura binária ( $PL-VF$ )<sub>1</sub>**

As figuras 6.68a 6.72 apresentam resultados obtidos para a mistura de plástico e vidro fino  $PL-VF$  em seu primeiro teste. Na Fig. 6.70 é apresentada a comparação entre a velocidade de mínima fluidização pelo método da queda de pressão e pelo método do desvio padrão das flutuações de pressão. Nestas figuras pode-se ver a variação da velocidade de mínima fluidização para cada intervalo de pontos utilizado.

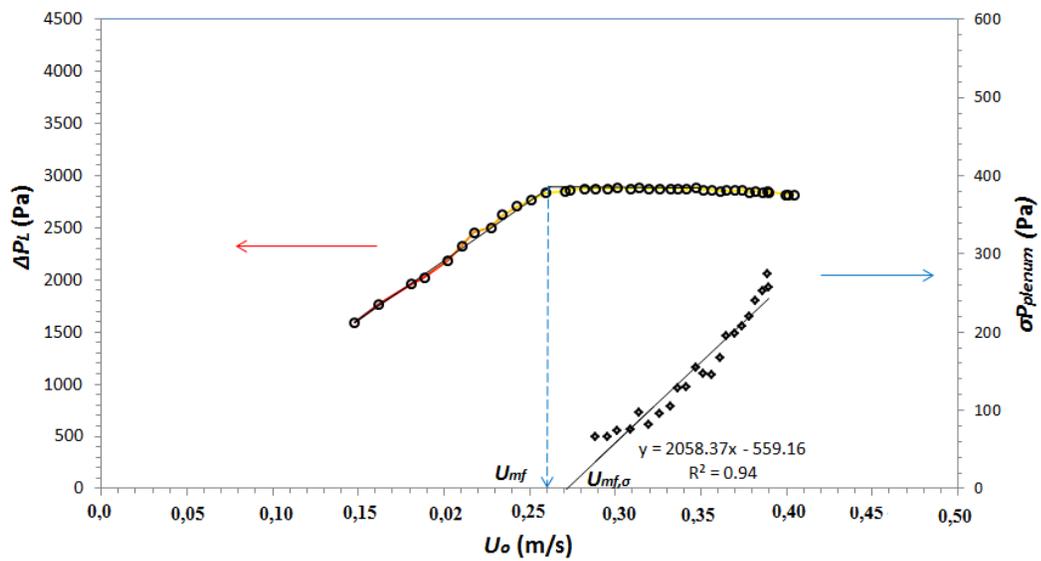


Figura 6.68 - Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* em função da  $U_o$  para a mistura ( $PL-VF$ )<sub>1</sub> ( $U_{mf,\sigma}$  obtido levando-se em conta todos os dados levantados, ou seja, regiões 2, 3 e 4).

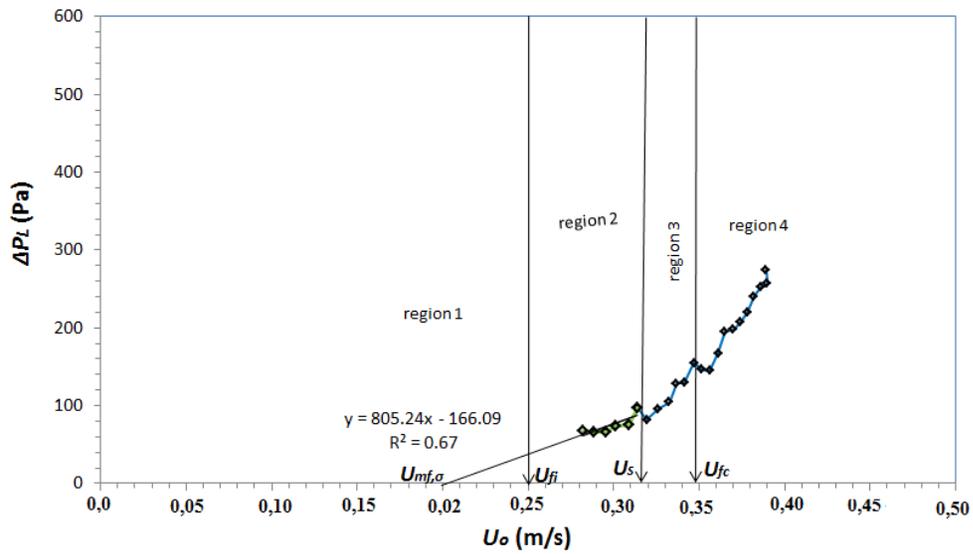


Figura 6.69 - Desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  para a mistura  $(PL-VF)_1$  ( $U_{mf,\sigma}$  obtido levando-se em conta apenas os dados levantados na região 2).

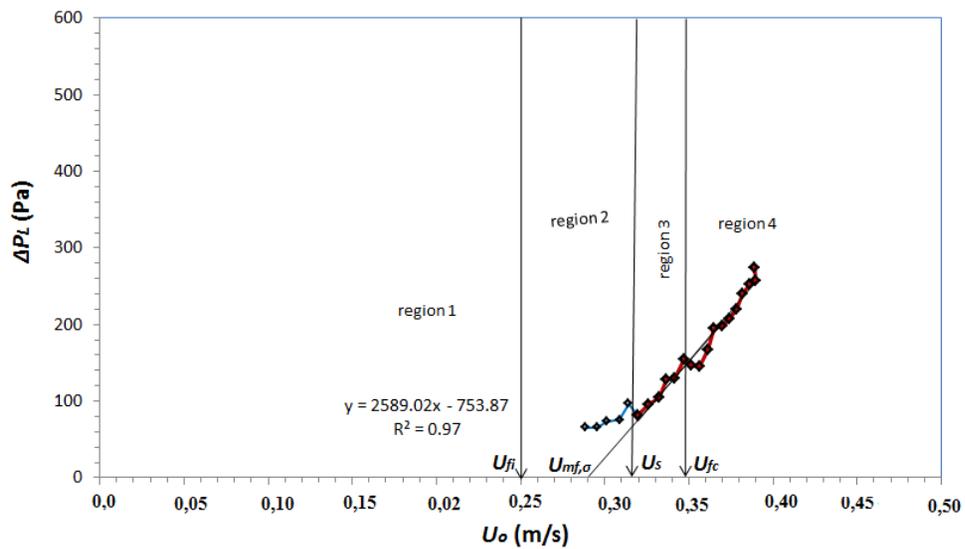


Figura 6.70 - Desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  com a mistura  $(PL-VF)_1$ , ( $U_{mf,\sigma}$  obtido levando-se em conta apenas os dados levantados nas regiões 3 e 4).

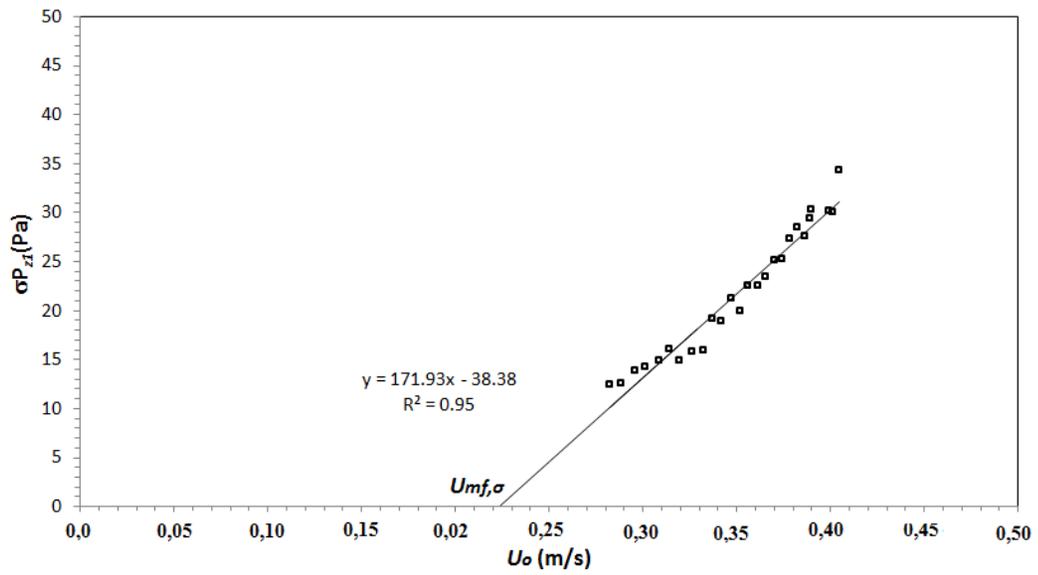


Figura 6.71 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $P_{z1}$  como função da  $U_o$  com a mistura  $(PL-VF)_1$

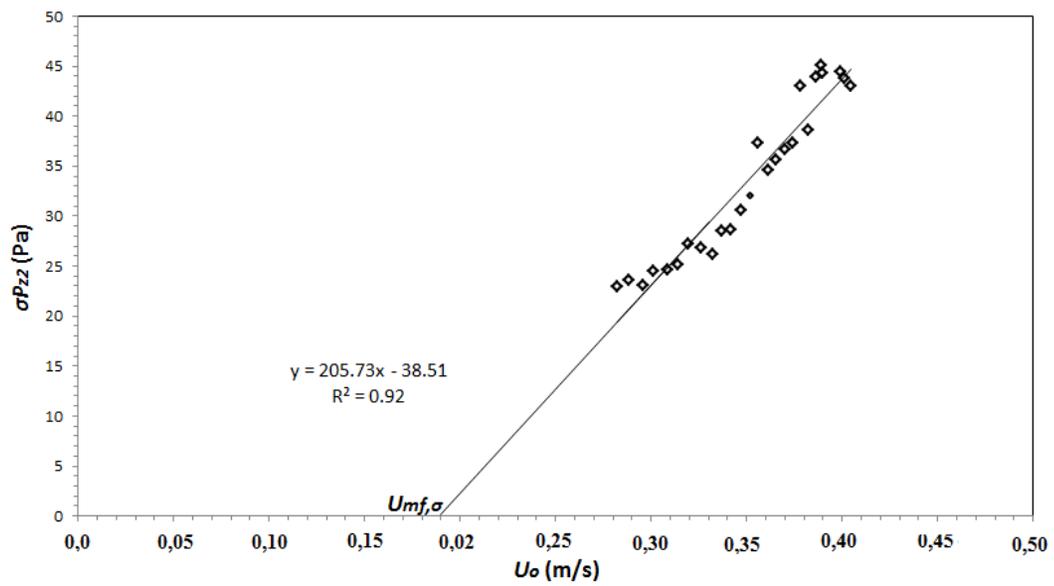


Figura 6.72 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $P_{z2}$  como função da  $U_o$  com a mistura  $(PL-VF)_1$

Na tabela 6.13 são apresentados os resultados obtidos para a velocidade de mínima fluidização da mistura  $(PL-VF)_1$ , tanto pelo método tradicional ( $U_{mf}$ ) como por três variações do método baseado na medida do desvio padrão das medidas de pressão ( $U_{mf,\sigma}$ ) para o transdutor do plenum, além dos resultados obtidos a partir das medidas obtidas pelos transdutores localizados em  $z_1$  e em  $z_2$ . A análise dos resultados foi realizada da mesma forma que para as misturas  $VF-VG$  e  $PL-VG$ .

Os resultados obtidos considerando todos os pontos levantados, forneceram a melhor aproximação, com um desvio de 3,7% em relação ao obtido pelo método tradicional. Os resultados obtidos a partir dos transdutores localizados acima da placa distribuidora apresentaram desvios elevados (15,4 e 30,8%) em relação ao obtido pelo método tradicional.

Tabela 6.13 - Resultados para a determinação da  $U_{mf,\sigma}$  na mistura  $PL-VF$

Mistura	Transdutor	$U_{mf}$ (m/s)	$U_{mf,\sigma}$ (m/s)	$\Delta U_{mf,\sigma}$ (%)
PL-VF	<i>Pplenum, regiões 2,3 e 4</i>	0,26	0,27	3,70
	<i>Pplenum, região 2</i>		0,20	30,00
	<i>Pplenum, regiões 3 e 4</i>		0,29	10,34
	<i>Pz1</i>	-	0,22	15,4
	<i>Pz2</i>	-	0,18	30,8

Na tabela 6,14 são apresentadas as velocidades inerentes ao fenômeno de segregação para a mistura (PL-VF), também é apresentado o desvio porcentual calculado com a Eq. 5.12 para cada velocidade ( $U_{fv}$ ,  $U_s$ , e  $U_{fc}$ ).

Tabela 6.14– Resultados obtidos na determinação das velocidades inerentes ao fenômeno da segregação para a mistura binária (PL-VF)

Material	Teste	Transdutor	$U_{if}$ (m/s)	$U_s$ (m/s)	$U_{tf}$ (m/s)	$U_{mf}$ (m/s) (plenum)	$\Delta \bar{U}_{mf}$ (%)	$\Delta \bar{U}_{if}$ (%)	$\Delta \bar{U}_s$ (%)	$\Delta \bar{U}_{tf}$ (%)
PL-VF	1	Pz1	0,26	0,31	0,34	0,26	3,7	3,7	3,1	0,0
		Pz2	0,28	0,32	0,34			3,7	0,0	0,0
		Pplenum	0,27	0,32	0,35			0,0	0,0	2,9
	2	Pz1	0,27	0,32	0,34	0,27	0,0	0,0	0,0	0,0
		Pz2	0,27	0,31	0,34			0,0	3,1	0,0
		Pplenum	0,26	0,32	0,34			3,7	0,0	0,0
	3	Pz1	0,27	0,31	0,35	0,27	0,0	0,0	3,1	2,9
		Pz2	0,27	0,32	0,35			0,0	0,0	2,9
		Pplenum	0,26	0,31	0,34			3,7	3,1	0,0
<b>Valor médio</b>			<b>0,27</b>	<b>0,32</b>	<b>0,34</b>	<b>0,27</b>				

A tabela 6.14 mostra que houve concordância dos valores obtidos, nos três ensaios realizados, para as velocidades do gás correspondentes a  $U_{fi}$ ,  $U_s$ ,  $U_{fc}$  e  $U_{mf}$ . O desvio entre cada resultado de  $U_{mf}$  determinado pelo sensor localizado no plenum e o valor médio de  $U_{mf}$  obtido considerando as três repetições apresentou um valor máximo de 3,7%. Para os valores correspondentes às velocidades inerentes ao fenômeno da mistura o máximo desvio obtido foi de 3,7%. Esta mistura apresentou os maiores desvios em comparação com as outras misturas estudadas, mas ainda assim, verificou-se uma aproximação muito boa entre as repetições, inferior a 5%.

#### 6.4.2. Comportamento das flutuações de pressão no domínio do tempo para o primeiro ensaio com plástico e vidro grosso e a mistura (PL-VF)

As figuras 6.73 a 6.89 ilustram o sinal de pressão no leito adquirido no *plenum* e nas posições  $z_1$  e  $z_2$  para a mistura (PL-VF)<sub>1</sub>. Além do valor da velocidade superficial do gás,  $U_o$ , na legenda de cada gráfico também é indicado o regime de contato gás-sólido. Os sinais foram analisados adotando a mesma metodologia que para as misturas VF-VG e PL-VG.

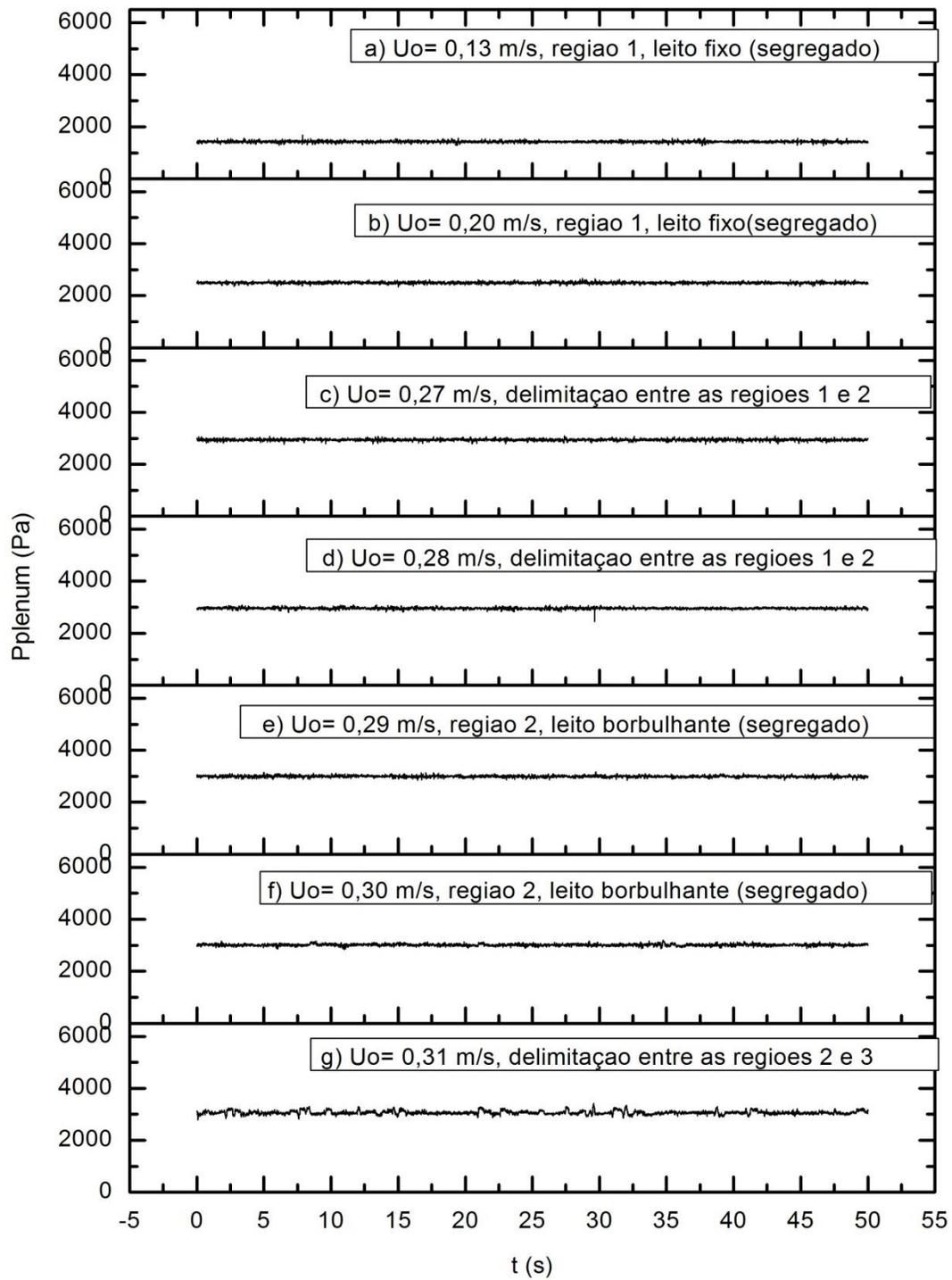


Figura 6.73- Sinais de pressão do transdutor medidos no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) como mistura  $(PL-VF)_I$ .

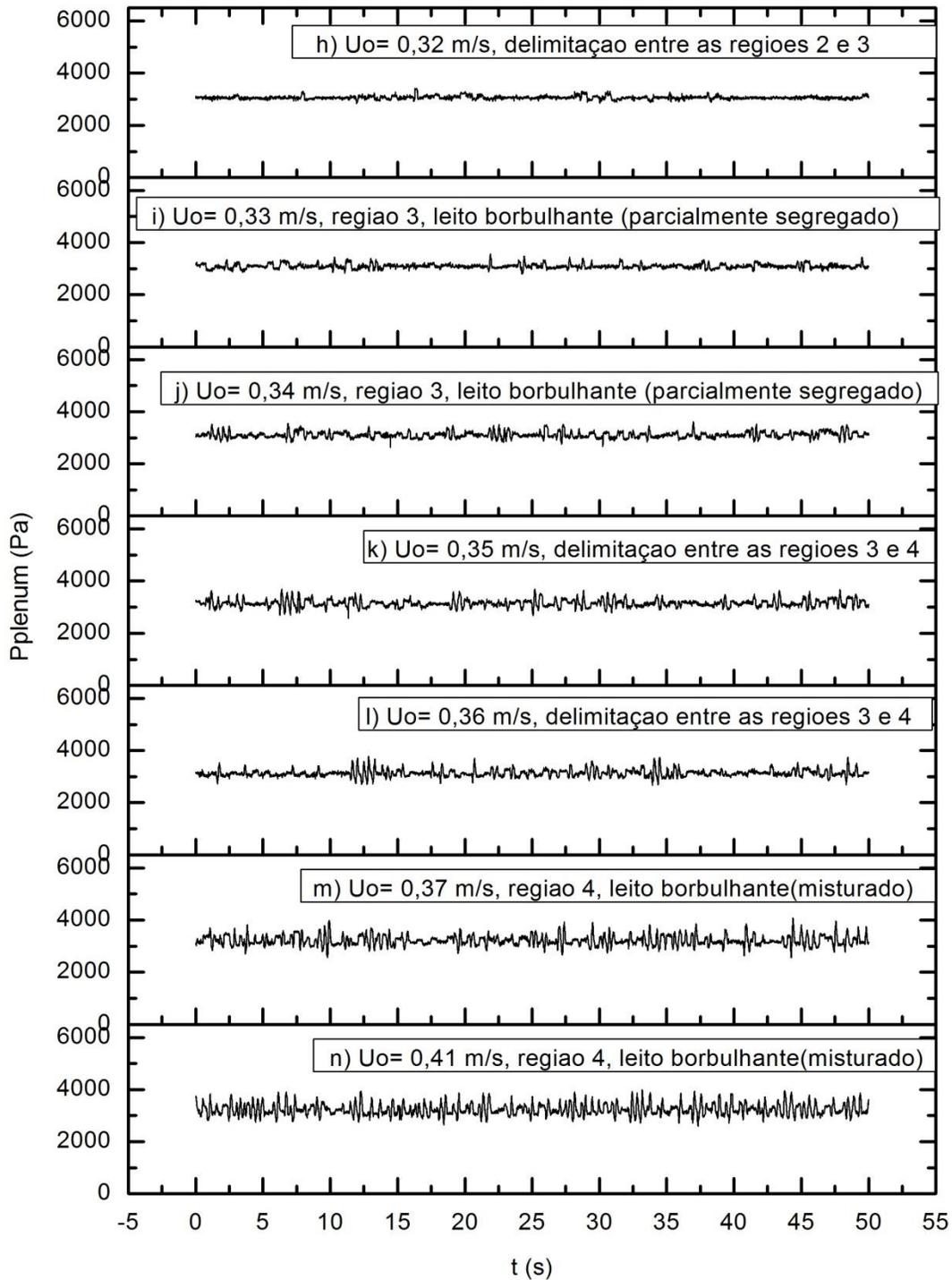


Figura 6.73 - (cont.) - Sinais de pressão do transdutor medidos no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) com a mistura  $(PL-VF)_1$ .

Sob o regime de leito fixo e na região 2 quando os materiais que compõem a mistura estão segregados com o plástico no topo do leito e vidro fino no fundo, não foi percebida a ocorrência de flutuações de pressão consideráveis [Figs. 6.73(a) a 6.73(f)]. Os dados levantados experimentalmente mostraram que a pressão média aumenta de 700 Pa para o leito fixo até 3100 Pa para o leito borbulhante misturado.

Para os sinais da região 3, Fig. 6.73(i), pode-se observar um aumento da amplitude das flutuações de pressão, observa-se também que a mistura apresenta um comportamento de leito parcialmente fluidizado pelo aumento nas vibrações de suas partículas e pelas pequenas bolhas que sobem através do leito. Nesta condição, o vidro fino permanece no fundo do leito e o sinal de pressão apresenta variações na amplitude da ordem de 100 Pa com uma pressão média de 3000 Pa.

Para a região 4 de leito borbulhante misturado, (Fig. 6.73(n)), o sinal de pressão apresenta flutuações com variações de até 1000 Pa.

Foi verificada a ocorrência de aumento considerável da amplitude dos sinais de flutuação de pressão registrados pelo transdutor instalado no *plenum* de cerca de 50 Pa com  $U_o = 0,13$  m/s até 1000 Pa com  $U_o = 0,41$  m/s.

Nas figuras correspondentes ao plástico apresentadas na comparação com o vidro fino e a mistura observa-se a variação da pressão em função da velocidade superficial do gás,  $U_o$  para cada regime e para cada transdutor com que foi adquirida a medida de pressão.

Examinando os sinais obtidos para o plástico no regime de leito fixo e de leito borbulhante, não se nota uma grande diferença na amplitude da flutuação da pressão. A pressão aumenta com o aumento da velocidade, mas as flutuações de pressão apresentam amplitudes baixas. A fluidização das partículas de plástico caracteriza-se pela passagem de ar entre as partículas gerando bolhas pequenas, muito parecidas ao comportamento do vidro fino, mas a pressão média é menor neste material, pelo fato de apresentar uma massa específica menor que o vidro fino. Os sinais medidos no *plenum* para esse material são mais claros e fáceis de analisar em comparação com os sinais adquiridos nas posições  $z_1$  e  $z_2$ .

A fim de permitir comparação dos sinais das misturas com aqueles obtidos com materiais isolados, a Fig. 6.74 apresenta sinais de flutuação de pressão para o plástico e o vidro fino e para a mistura (*PL-VF*) na mesma velocidade superficial do gás de 0,13 m/s, obtidos com o transdutor

instalado no *plenum*. Nesta condição, os materiais isolados e a mescla apresentam um comportamento de leito fixo.

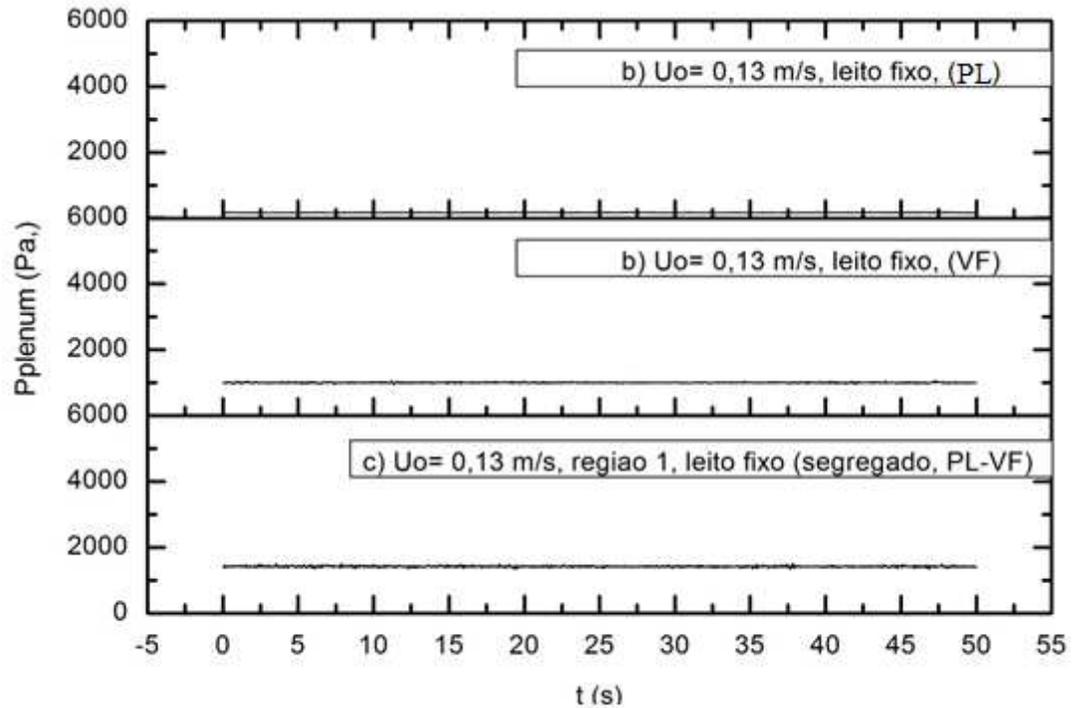


Figura 6.74 - Sinais de pressão medidos no *plenum* com os materiais isolados e com a mistura (PL- VF):  $U_o = 0,13$  m/s

Na figura 6.75 são apresentados os sinais obtidos com  $U_o = 0,30$  m/s. A mistura apresenta um comportamento de leito parcialmente fluidizado, como verificado na figura 6.57 porém, as flutuações de pressão são muito pequenas e quase imperceptíveis.

Pode-se observar um aumento na pressão média dos sinais de pressão relativos aos materiais isolados e à mistura, onde para o plástico o aumento foi de 50 a 400 Pa, para o vidro fino foi de 1000Pa para 3000 Pa e para a mistura foi de 1500 Pa para 3000 Pa.

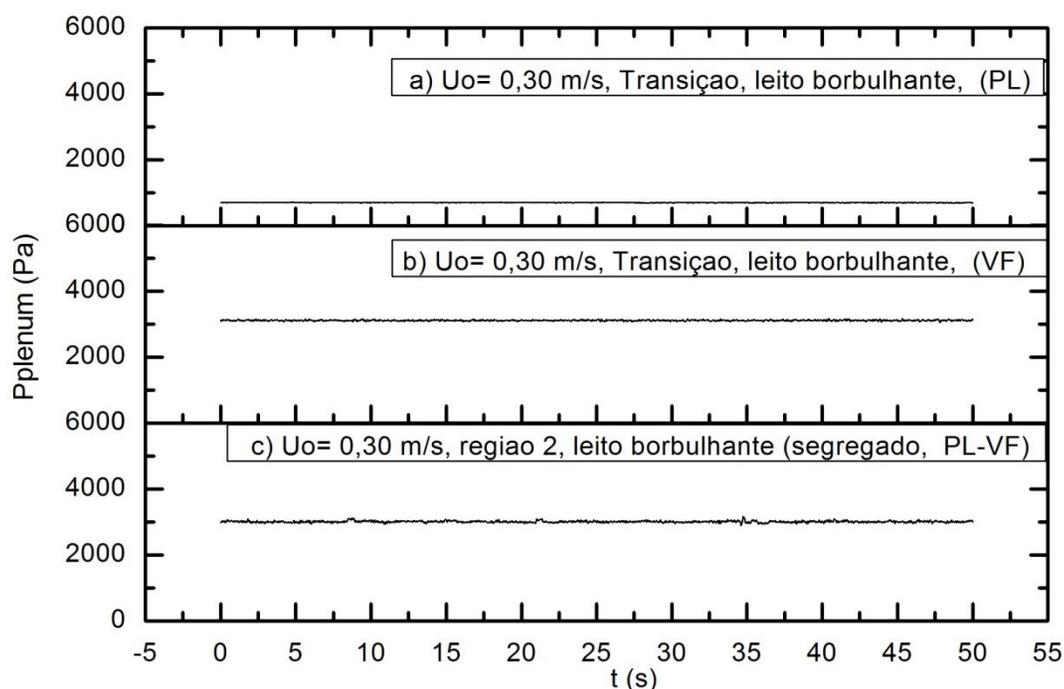


Figura 6.75 - Sinais de pressão medidos no *plenum* com os materiais isolados e com a mistura (PL- VF):  $U_o = 0,30$  m/s

Na região 3 de leito borbulhante parcialmente segregado [Fig. 6.76], a pressão média do sinal não aumenta nem para os materiais isolados nem para a mistura com relação as sinais da Fig. 6.75. Nesta região foi possível observar o plástico no topo do leito, porém, nesta mistura o material tem o comportamento de flotsam pelo fato desta ser menos segregada que nas outras misturas estudadas. O sinal da Fig. 6.76(c) apresenta um comportamento de leito semifluidizado, sendo que os sinais dos materiais isolados apresentam um comportamento do leito fixo, mas já estão iniciando a transição de leito fixo para leito borbulhante.

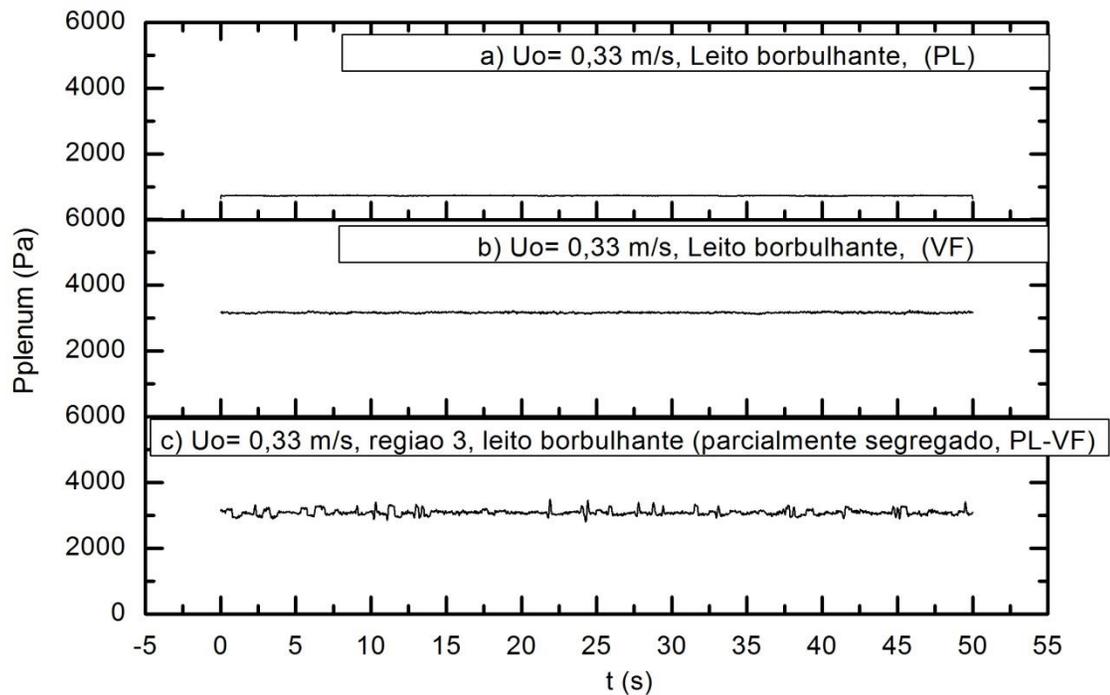


Figura 6.76 - Sinais de pressão medidos no *plenum* com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF):  $U_o = 0,33$  m/s

Na figura 6.77, o sinal de pressão para o vidro fino apresenta um aumento na amplitude dos sinais de 1000 Pa em comparação com o sinal da Fig. 6.77, com um comportamento de um material em regime borbulhante, com a presença de bolhas maiores que sobem pelo leito. Os sinais de plástico apresentam flutuações menores (ao redor de 500 Pa) que as observadas para o vidro fino e para a mistura. No entanto, a mistura tem um comportamento semelhante do vidro fino com sinais de flutuações de pressão muito parecidas e pressões médias de 3700 Pa.

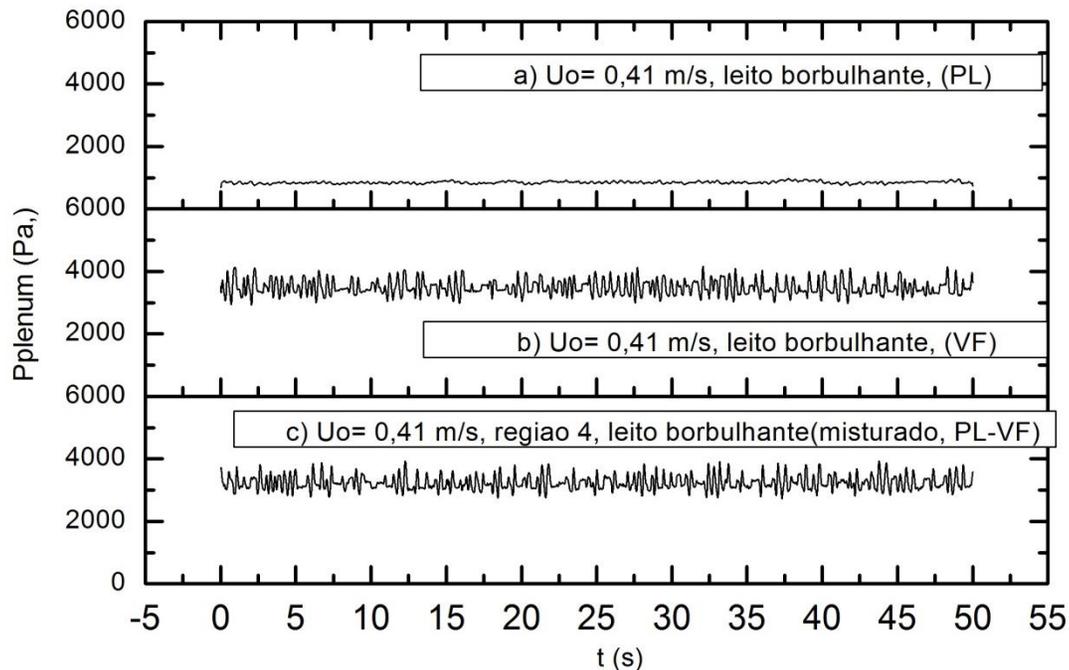


Figura 6.77 - Sinais de pressão medidos no *plenum* com os materiais isolados e com a mistura (*PL-VF*):  $U_o = 0,78$  m/s.

Na região 4 de leito misturado [Fig. 6.77(c)], não se identifica camadas distintas de cada material. O plástico se movimentava pelo leito através da massa de vidro fino. As bolhas aumentam e tem-se um comportamento semelhante ao observado nos testes do vidro fino em regime borbulhante.

Na Figura 6.78, são apresentados os sinais para a mistura (*PL-VF*) na posição  $z_I$  onde se pode observar as flutuações da pressão ao longo do tempo. Com o aumento da velocidade do gás, verifica-se que as variações na amplitude dos sinais são menores que as adquiridas com o transdutor do *plenum*, Fig. 6.61.

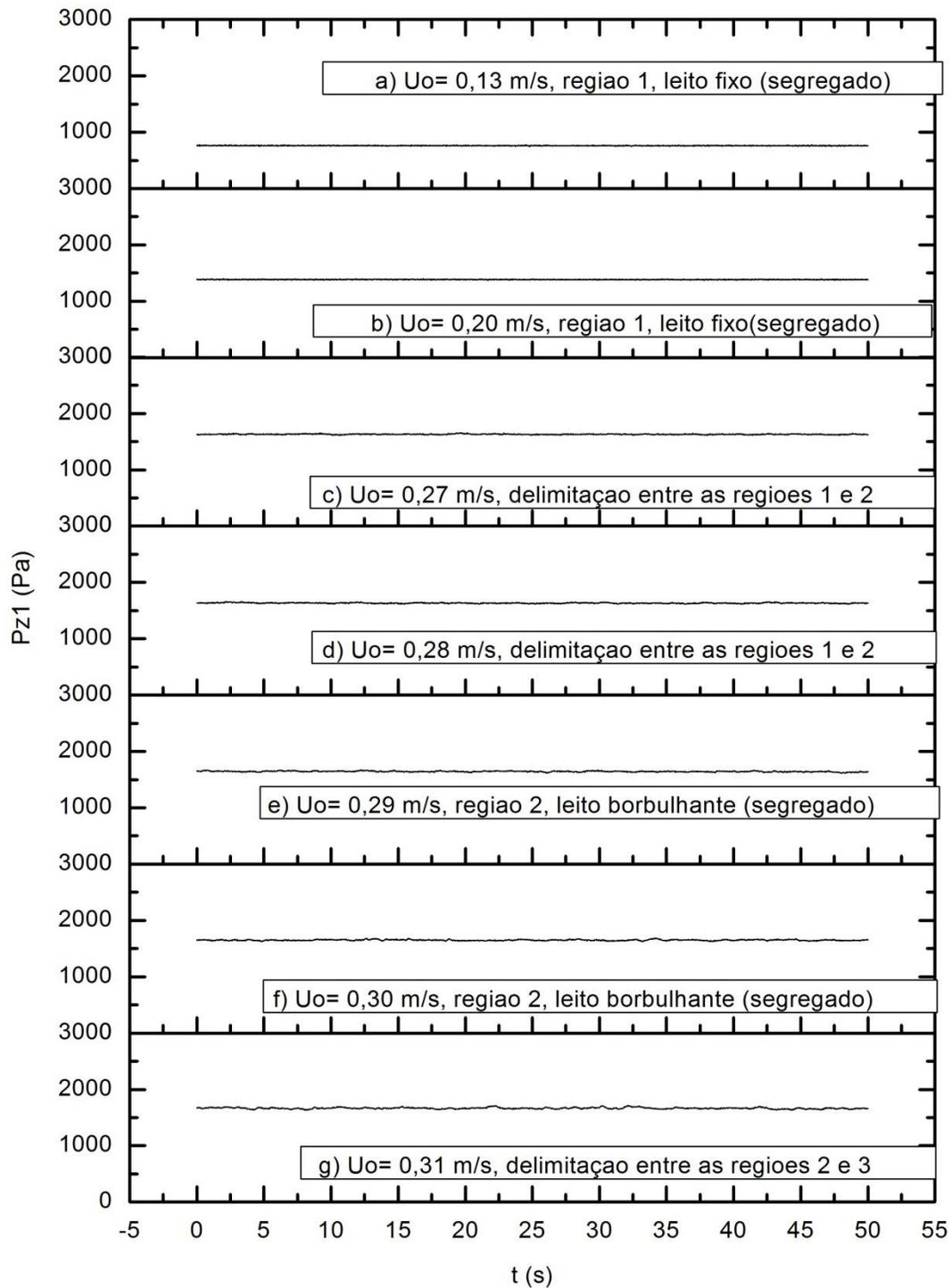


Figura 6.78 - Sinais de pressão do transdutor medidos na posição  $z_1(P_{z1})$  com mistura  $(PL-VF)_1$ .

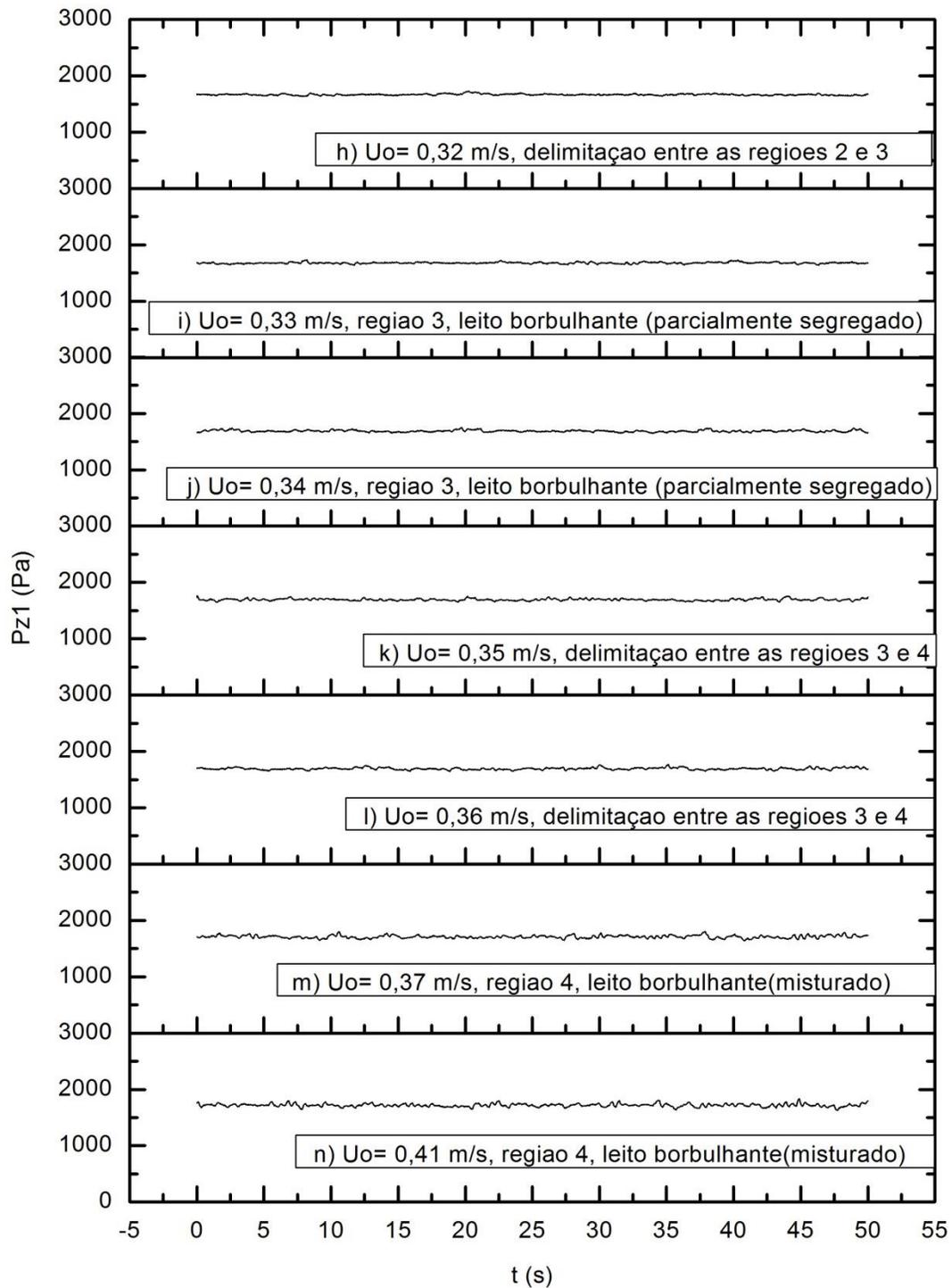


Figura 6.78 (cont.) - Sinais de pressão do transdutor medidos na posição  $z_1(P_{z1})$  com a mistura  $(PL-VF)_1$ .

Para os sinais correspondentes às Figs. 6.78 (a) a 6.78(f) não é percebida a ocorrência de uma flutuação de pressão considerável.

Nos sinais correspondentes à região de leito segregado até a região 4 de leito borbulhante misturado, não se observa um aumento significativo da pressão média Fig. 6,78(e) a (n).

Na Fig. 6.78, com o aumento da velocidade do gás, aumenta o valor da amplitude das flutuações de pressão para 10 Pa na região 2 de leito segregado e para 200 Pa na região 4 de leito borbulhante misturado. Portanto, a análise dos sinais do vidro fino mostra que a amplitude das flutuações de pressão no regime de leito borbulhante medidas em  $z_1$  são muito menores que aquelas medidas no *plenum*. Esse fato é atribuído à presença de bolhas de gás pequenas e uniformes na região próxima ao distribuidor, resultando em sinais de pequena amplitude, estes sinais são apresentados nas figuras comparativas entre a mistura (*PL-VF*) e os materiais correspondentes ao plástico e o vidro fino.

Para o vidro fino o comportamento dos sinais sob leito fixo pode ser explicado pelas vibrações das partículas situadas nas camadas do leito próximas ao distribuidor que provocaram as flutuações no sinal depressão

A observação nos sinais de pressão para o plástico na posição  $z_1$  mostra que é muito difícil diferenciar os sinais obtidos no regime de leito fixo e de leito borbulhante uma vez que as variações na amplitude dos sinais são pequenas. Apenas com o aumento considerável da velocidade do gás é possível verificar o aumento da amplitude das flutuações de pressão.

A análise dos sinais de pressão no regime de leito fluidizado para o leito contendo partículas de plástico mostra que as vibrações foram muito suaves indicando que as bolhas formadas foram pequenas e geraram flutuações com amplitudes muito menores que as geradas no leito contendo partículas de vidro grosso e de vidro fino. O plástico apresenta um comportamento similar ao do vidro fino, mas as bolhas que surgiram na superfície do leito foram pequenas e emergiam na superfície do leito mais suavemente. As pressões, neste material, foram menores que as registradas para os outros materiais desta pesquisa em virtude da menor densidade das partículas.

Na figura 6.79 são apresentados os sinais de pressão no domínio do tempo adquiridos na posição  $z_1$  para o plástico, vidro fino e para a mistura (*PL-VF*). Os sinais para a velocidade superficial do gás de 0,13 m/s, para o plástico, vidro fino e a mistura são sinais característicos de

leito fixo onde não há flutuações de significativa amplitude, a pressão média para esta velocidades é de 200 Pa, de 600 Pa e de 800, respectivamente.

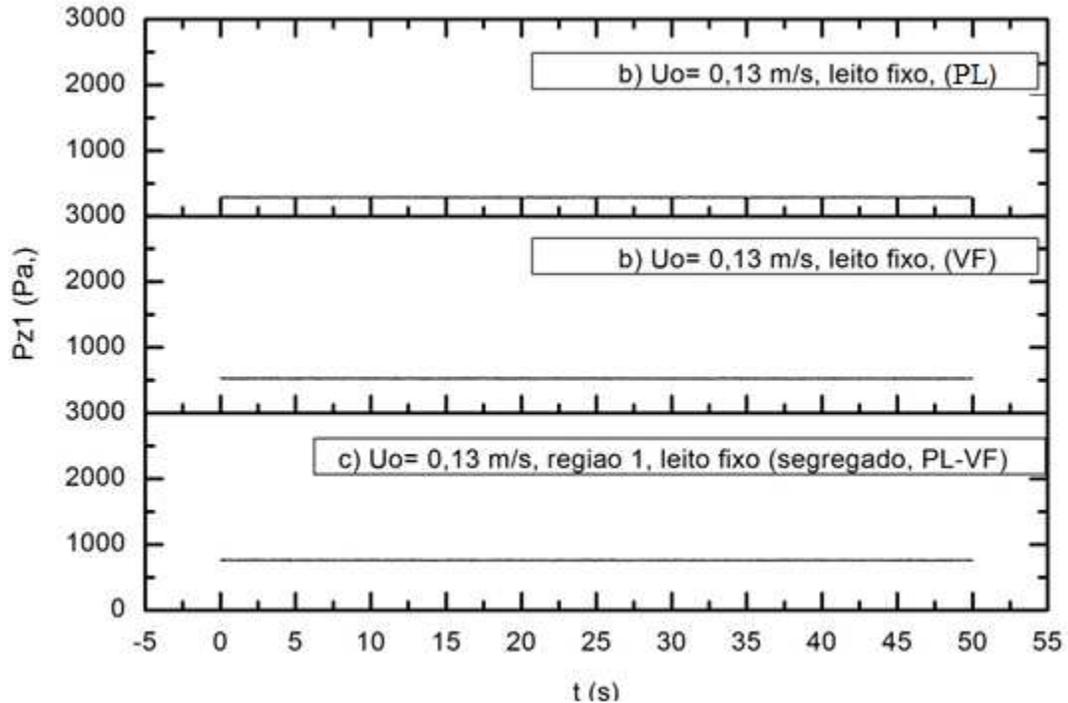


Figura 6.79 - Sinais de pressão medidos na posição  $z_1$  com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF):  $U_o = 0,13$  m/s

Na Fig. 6.80 correspondente à velocidade de 0,30 m/s, onde se pode observar que, para os sinais adquiridos em  $z_1$ , a mistura apresenta pequenas flutuações (~50 Pa). O vidro fino e o plástico apresentam um sinal característico do leito fixo, mas o vidro fino e o plástico tem um comportamento de leito borbulhante, caracterizado por pequenas bolhas de gás. Seria esperado que, nesta condição, os sinais adquiridos fossem símiles entre o vidro fino e a mistura pelo fato da tomada de pressão estar localizada na camada do leito ocupada pelo vidro fino. Entretanto, os sinais de pressão também registram o comportamento do plástico no topo do leito.

Os sinais correspondentes à região 2 de leito segregado, Fig. 6.80(c), apresentaram sinais com flutuações de pressão com um comportamento gerado pelo aparecimento de pequenas bolhas que movimentam o vidro fino, mas não o transportam para o topo do leito.

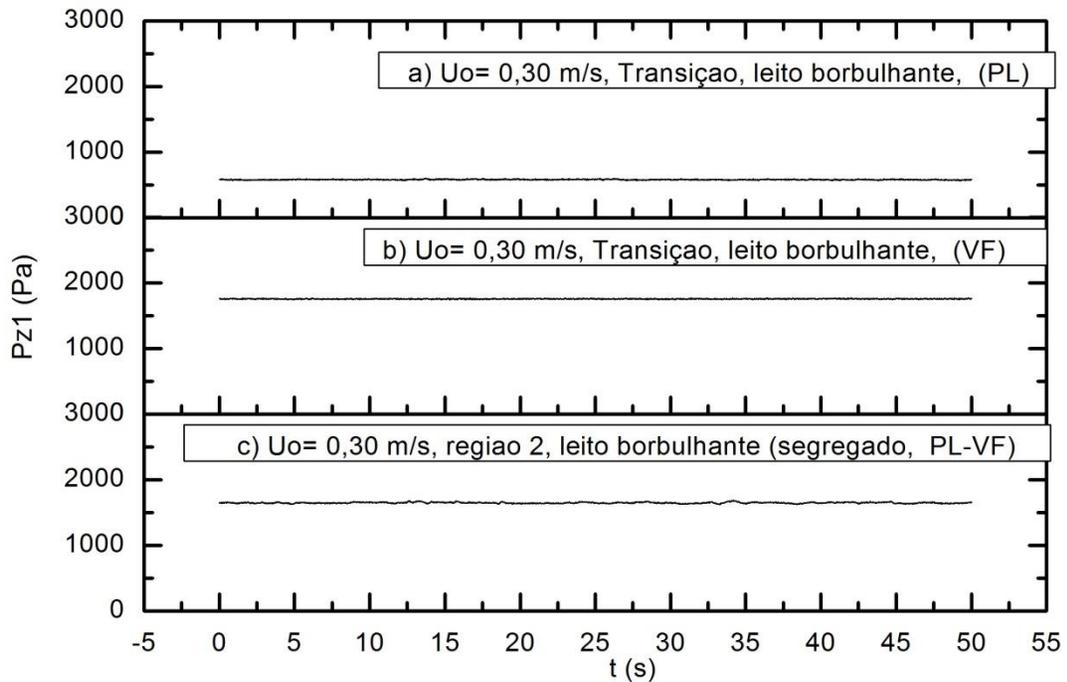


Figura 6.80 - Sinais de pressão medidos na posição  $z_1$  com os materiais isolados e com a mistura (PL- VF):  $U_o = 0,30$  m/s

O sinal correspondente à região 3 de leito parcialmente segregado apresenta flutuações com variações periódicas geradas pelo aumento das bolhas e o aumento da velocidade do gás, como observado na Fig. 6.81.

A mistura apresenta uma pressão média maior do que com o vidro fino de 1900 Pa e 1600 Pa, respectivamente. O plástico não apresenta aumento na pressão média.

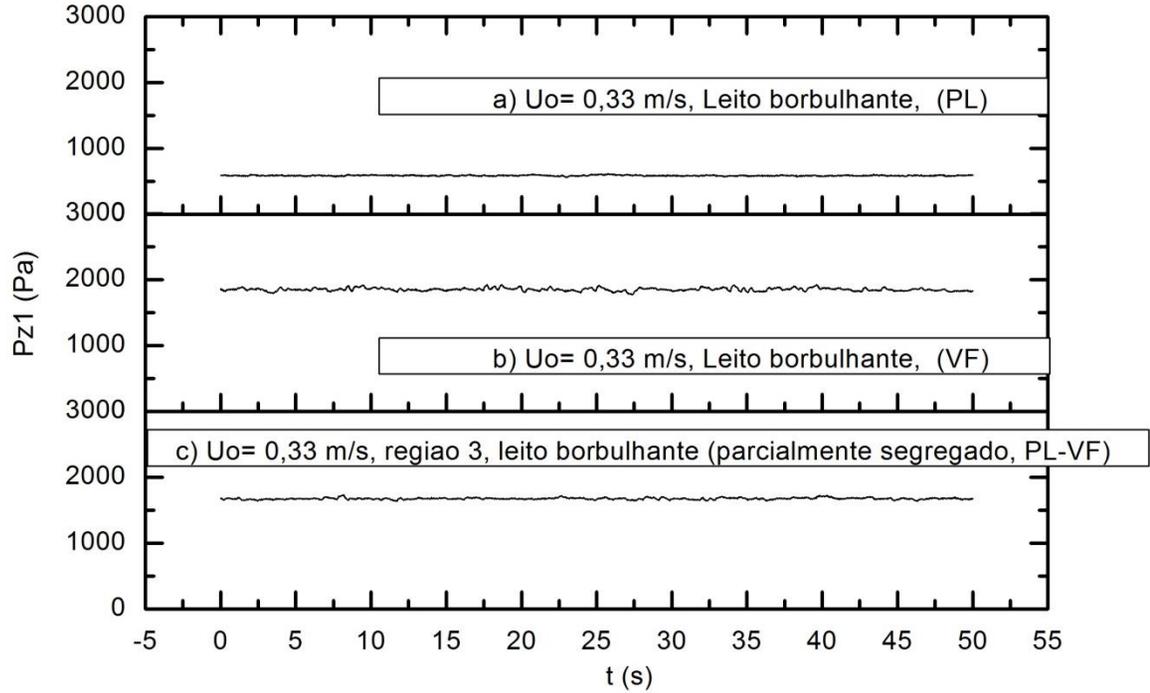


Figura 6.81 - Sinais de pressão medidos na posição  $z_1$  com os materiais isolados e com a mistura (PL- VF):  $U_o = 0,33$  m/s

Na figura 6.82, os sinais com plástico, com vidro fino e com a mistura apresentam regime de leito borbulhante. O sinal de vidro fino apresenta amplitudes parecidos às da mistura com valores de 100 Pa, Fig. 6.82(b) e 6.782(c). A pressão média não muda em comparação com os sinal da Fig. 6.81.

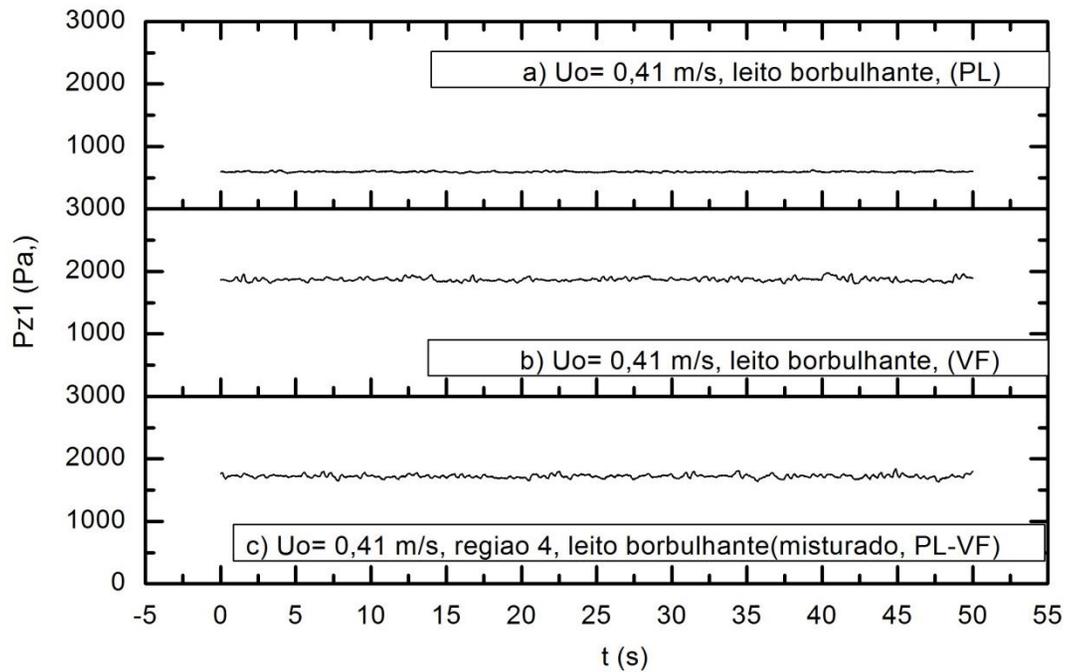


Figura 6.82 - Sinais de pressão medidos na posição  $z_1$  com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF):  $U_o = 0,41$  m/s

A escala do eixo vertical foi mantida a fim de permitir comparações entre os sinais do regime de leito fixo e os sinais do leito borbulhante.

A figura 6.83 apresentam os sinais para a mistura PL-VF na posição  $z_2$ , onde se observa que as variações na amplitude dos sinais é menor que as observadas no *plenum* e na posição  $z_1$ .

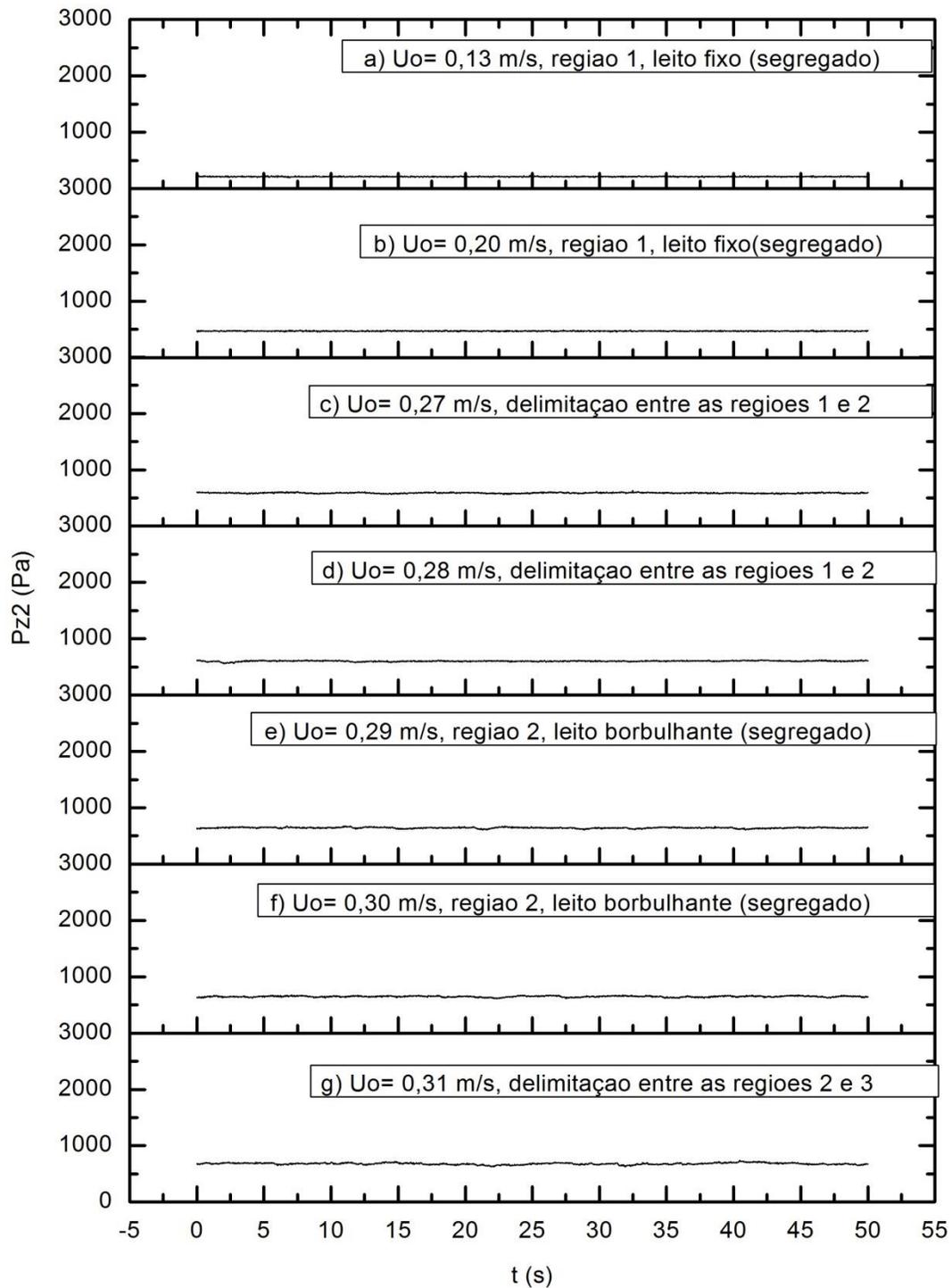


Figura 6.83 - Sinais de pressão para o transdutor medidos na posição  $z_2$  ( $P_{z2}$ ) com a mistura  $(PL-VF)_1$

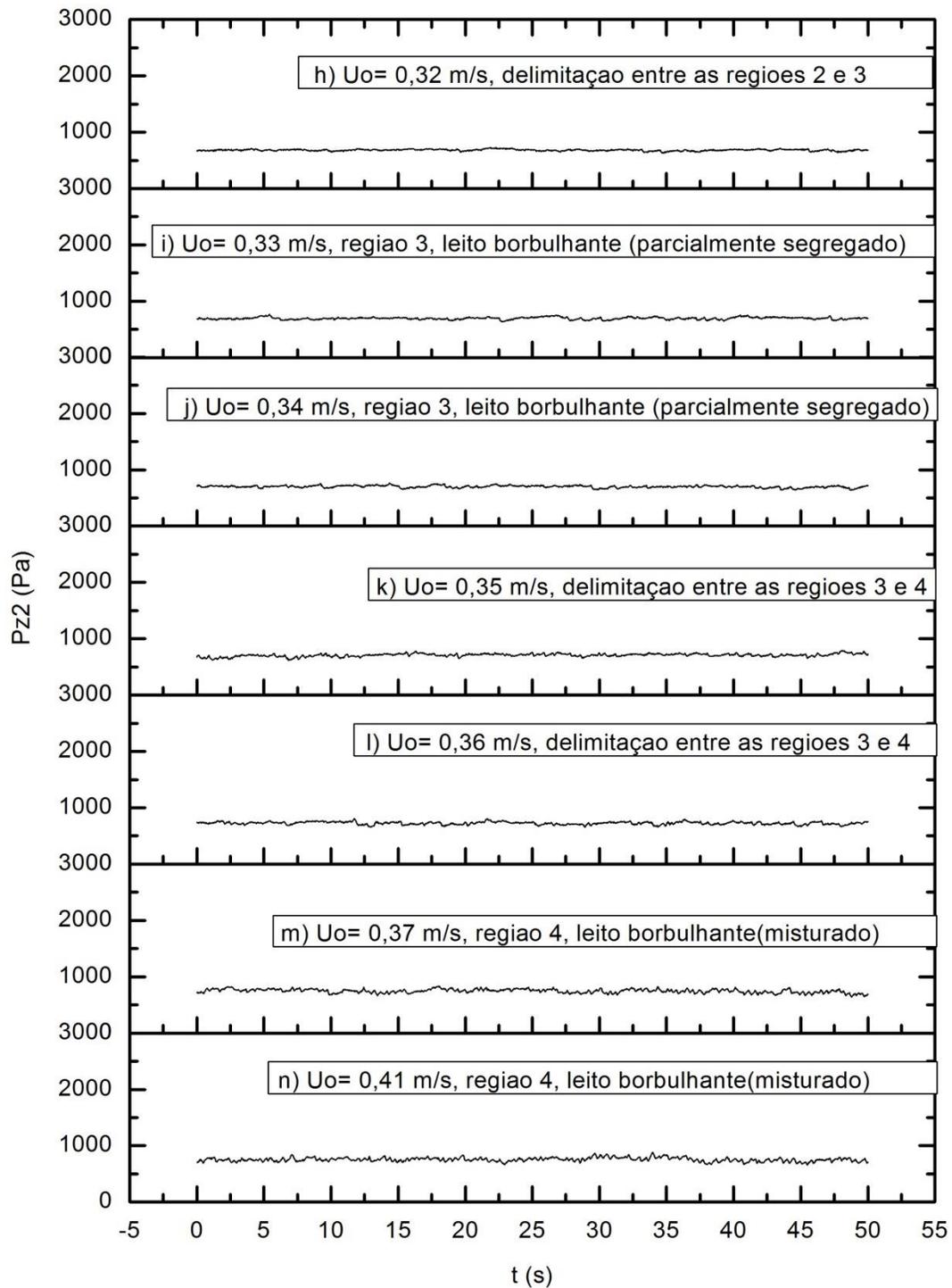


Figura 6.83 (cont.) - Sinais de pressão para o transdutor medidos na posição  $z_2$  ( $P_{z2}$ ) com a mistura  $(PL-VF)_1$

No regime de leito fixo até a delimitação entre a região 2 e 3, da mesma forma que nas outras posições, não houve ocorrência de flutuações de pressão consideráveis. A faixa de pressão média, para o regime de leito fixo, foi de 200 a 500 Pa, que é um valor muito menor ao observado no *plenum* que foi de 700 a 2200 Pa, e em  $z_1$  que foi de 700 Pa a 1400 Pa.

A pressão média tem um aumento de 200 a 800 Pa ao passar do regime de leito fixo [Fig. 6.83(a)] para o regime de leito borbulhante misturado [Fig. 6.83(n)].

A observação nos sinais de pressão para o plástico na posição  $z_2$  mostra que é muito difícil diferenciar os sinais obtidos no regime de leito fixo e de leito borbulhante uma vez que as variações dos sinais são pequenas. Apenas com o aumento considerável da velocidade do gás é possível verificar o aumento da amplitude das flutuações de pressão.

A Fig. 6.84 apresenta para a velocidade de 0,13 m/s a comparação dos sinais de cada um dos componentes individuais da mistura [Fig. 6.84(a) e 6.84(b)] com os sinais obtidos para a mistura, Fig. 6.84(c). Verifica-se que, para esse valor de  $U_o$ , todos os sinais são característicos de um comportamento de leito fixo.

As flutuações de pressão no sinal do plástico são imperceptíveis e a pressão média tem um valor muito menor que para o vidro fino e a mistura que apresentam valores de 200 Pa.

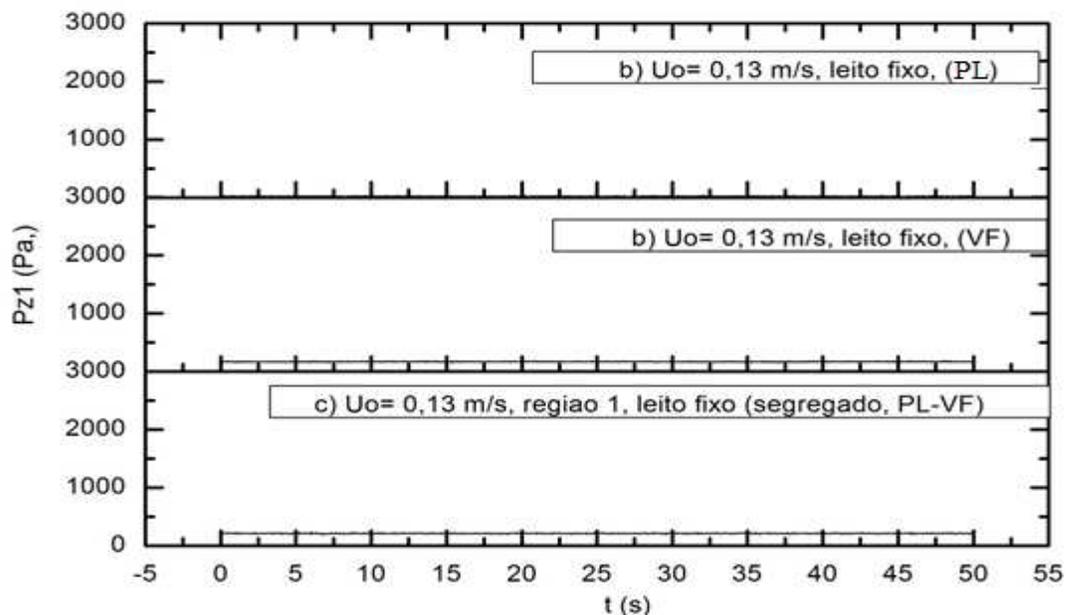


Figura 6.84 - Sinais de pressão medidos na posição  $z_2$  com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF):  $U_o = 0,13$  m/s.

Para a velocidade do gás igual a 0,30 m/s, o leito contendo a mistura (*PL-VF*) encontra-se no início do processo de fluidização, O transdutor colocado em  $z_2$  registra efeito do escoamento de ar, as flutuações registradas neste transdutor correspondem ao comportamento do plástico que esta em regime de leito fluidizado no topo do leito, porém o sinal não apresenta flutuações perceptíveis, o sinal de pressão apresenta variações na amplitude menores que 50 Pa, Fig. 6.85(a).

Na Fig. 6.85(b) e 6.85(c) foi observado um aumento da pressão média significativo para o vidro fino e a mistura de 200 Pa para 700 Pa. Nesta velocidade, os dois materiais isolados e a mistura já apresentam um comportamento de leito borbulhante, porém os sinais não apresentam flutuações significativas.

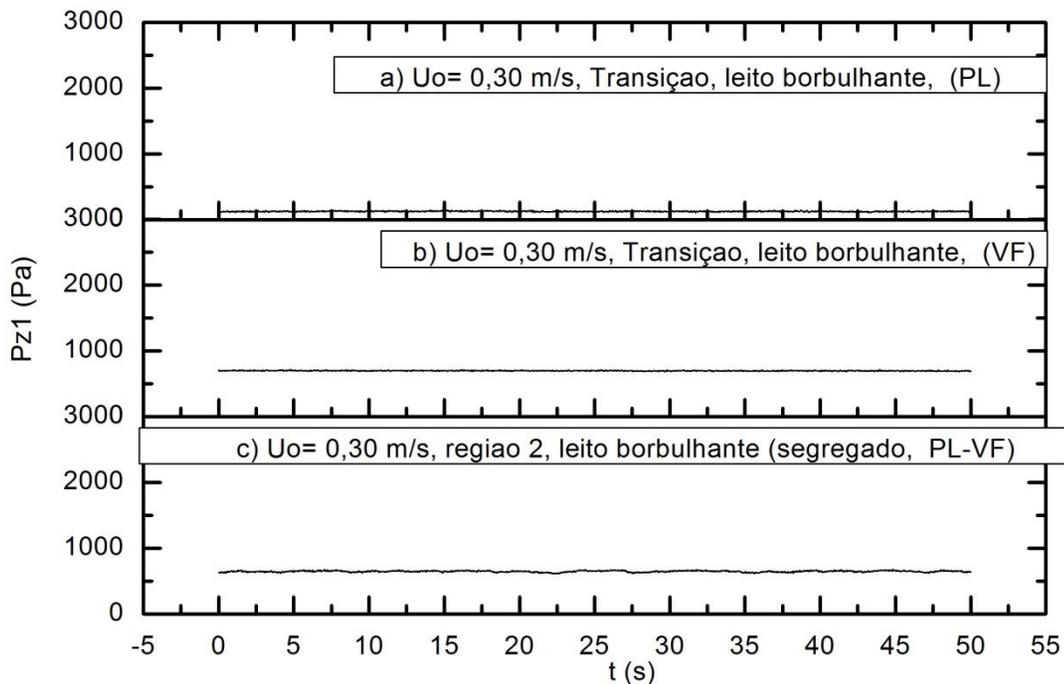


Figura 6.85 - Sinais de pressão medidos na posição  $z_2$  com os materiais isolados e com a mistura (*PL-VF*):  $U_o = 0,30$  m/s.

Os sinais correspondentes à região 2, onde o leito encontra-se segregado até a região 4, onde o leito está misturado, não apresentam uma variação significativa na pressão média, além do fato dos sinais apresentarem um aumento de amplitude de 50 para cerca de 100 Pa.

Com o aumento da velocidade do gás não foi observado um aumento significativo do valor da pressão média, mantendo o mesmo valor para a região 2, 3 e, para o plástico 200 Pa, para o vidro fino e a mistura 700 Pa, Fig. 6.86 e 6.87.

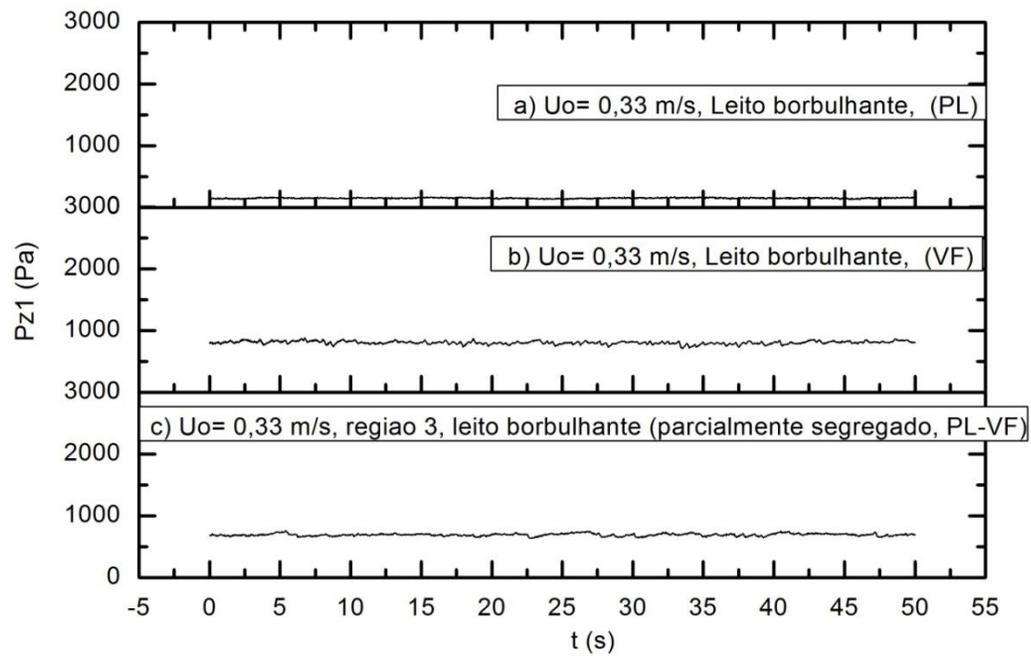


Figura 6.86 - Sinais de pressão medidos na posição  $z_2$  com os materiais isolados e com a mistura (PL-VF):  $U_o = 0,33$  m/s.

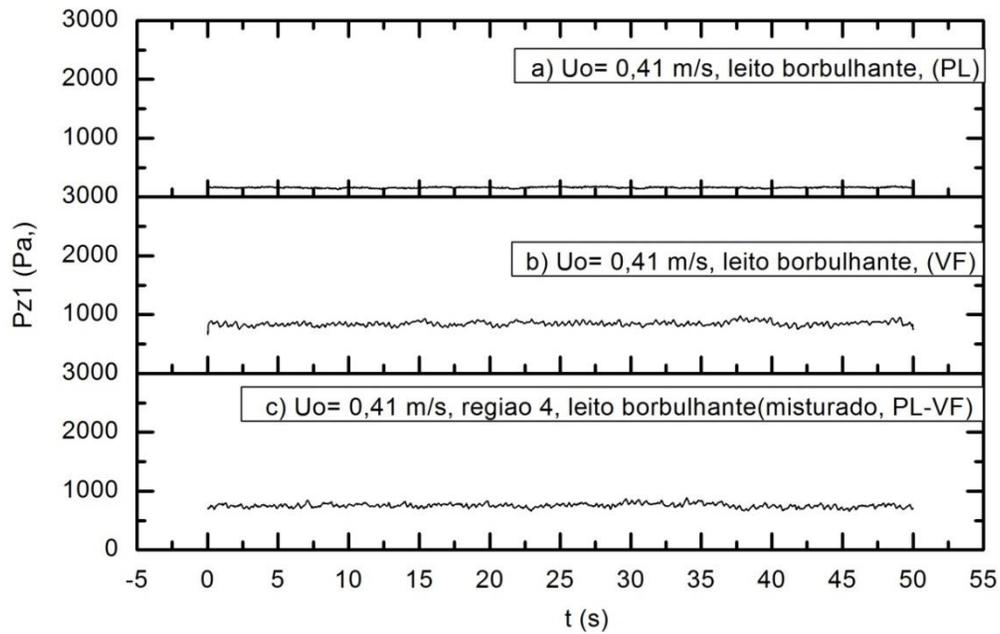


Figura 6.87 - Sinais de pressão medidos na posição  $z_2$  com os materiais isolados e com a mistura (PL- VF):  $U_o = 0,41$  m/s

Nesta posição  $z_2$ , o transdutor registra sinais que são gerados pelas bolhas que passam e estouram no topo do leito.

Na tabela 6.15 é mostrada a variação da pressão média com a velocidade do gás. Observa-se a redução do valor da pressão média em cada posição com o aumento na altura da tomada de pressão.

Tabela 6.15 - Pressões médias obtidas ao longo do processo de fluidização para catorze diferentes velocidades superficiais do gás (mistura  $(PL-VF)_I$ ).

$U_o$ (m/s)	$\bar{P}_{plenum}$ (Pa)	$\bar{P}_{z1}$ (Pa)	$\bar{P}_{z2}$ (Pa)	Regime
0,13	1366,60	736,23	200,7	Região 1, leito fixo segregado)
0,20	2140,00	1187,20	379,71	Região 1, leito fixo segregado)
0,27	2888,10	1599,40	589,58	Delimitação entre as regiões 1 e 2.
0,28	2963,70	1633,00	597,3	Delimitação entre as regiões 1 e 2
0,29	2984,50	1644,30	638,85	Região2, leito borbulhante segregado.
0,30	3020,50	1648,50	644,03	Região2, leito borbulhante segregado.
0,31	3025,10	1656,60	674,89	Delimitação entre as regiões 2 e 3
0,32	3054,40	1667,50	687,65	Delimitação entre as regiões 2 e 3
0,33	3068,70	1672,20	700,16	Leito borbulhante parcialmente segregado
0,34	3105,30	1683,90	709,47	Leito borbulhante parcialmente segregado
0,35	3119,00	1690,20	727,92	Delimitação entre as regiões 3 e 4
0,36	3166,60	1705,40	728,84	Delimitação entre as regiões 3 e 4;
0,37	3194,30	1711,20	756,23	Região 4, leito borbulhante, misturado.
0,41	3295,70	1732,70	788,01	Região 4, leito borbulhante, misturado.

Na tabela 6.16, podem ser comparadas e analisadas as diferenças entre os materiais isolados  $PL$  e  $VF$  e a mistura,  $(PL-VF)$ . A faixa de velocidades de operação entre o leito fixo e o leito borbulhante para o material  $PL$  é 0,13 – 0,40 m/s, faixa igual que a utilizada no vidro fino e na mistura  $(PL-VF)$ .

Na tabela 6.14, podem ser verificadas diferenças da velocidade superficial para cada regime de fluidização dos leitos compostos com os materiais isolados (*PL* e *VF*) e com a mistura (*PL-VF*). A faixa de velocidades de operação entre o leito fixo e o leito borbulhante para o vidro fino e o plástico é 0,13 a 0,20 m/s, igual que para a mistura.

Tabela 6.16 – Comparação de velocidades e regimes de fluidização com os materiais isolados (*PL* e *VF*) e com a mistura (*PL-VF*)<sub>1</sub>

<i>PL</i> <sub>1</sub>		<i>VF</i> <sub>1</sub>		<i>(PL-VF)</i> <sub>1</sub>	
<i>U</i> <sub>o</sub> (m/s)	<i>Regime</i>	<i>U</i> <sub>o</sub> (m/s)	<i>Regime</i>	<i>U</i> <sub>o</sub> (m/s)	<i>Regime</i>
0,13	Leito fixo	0,13	Leito fixo	0,13	Leito fixo
0,20	Leito fixo	0,20	Leito fixo	0,20	Leito fixo
0,30	Transição	0,3	Transição	0,30	Regime borbulhante
0,31	Transição	0,31	Transição	0,31	Regime borbulhante
0,36	Regime borbulhante	0,37	Regime borbulhante	0,37	Regime borbulhante
0,41	Regime borbulhante	0,40	Regime borbulhante	0,41	Regime borbulhante

## 6.5 Análise geral dos sinais de pressão no domínio do tempo

O uso dos gráficos do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão *versus* a velocidade superficial, apresentadas no item 6.2.1, mostrou-se uma alternativa recomendável para a determinação da faixa de velocidades onde ocorre o fenômeno da segregação. Esse procedimento é feito através da identificação de picos no gráfico os quais determinam as linhas de transição entre regiões com comportamento fluidodinâmico diferente. As figuras construídas mostraram que há concordância de resultados para os três ensaios realizados para cada mistura testada, o que permite que este tipo de análise seja realizado. Isto é, para as três repetições, os “picos” de desvio padrão ocorrem com os mesmos valores de velocidade superficial para cada posição da tomada de pressão (*plenum*,  $z_1$  e  $z_2$ ), o que pode ser constatado comparando-se, por exemplo, as Figs. C.17, C.20 e C.23 do Apêndice C para a mistura *VF-VG* e sinais registrados no *plenum*. Evidentemente, a concordância geral dos dados também pode ser atestada através das tabelas no Apêndice B. Portanto, há forte indicação de que tal análise independe se realizada a partir de sinais no *plenum*, em  $z_1$  ou em  $z_2$ .

As tabelas 6.17 e 6.18 apresentam as velocidades que foram selecionadas para este estudo, onde é possível observar que os valores diferem para cada material em função das propriedades de cada partícula. Conforme comentado anteriormente, elas foram escolhidas pelo fato de estarem relacionadas a cada regime de interesse: leito fixo, transição e leito borbulhante, em materiais isolados, e para as misturas por estarem relacionadas com as regiões características do estudo da segregação além das delimitações entre elas.

Tabela 6.17 -Velocidade superficiais do gás selecionadas em cada regime para a análise dos sinais de pressão para os três materiais testados.

<i>Regime</i>	<i>VF</i>	<i>VG</i>	<i>PL</i>
Leito fixo	0,13 e 0,20 m/s	0,13 e 0,51 m/s	0,13 e 0,21 m/s
Transição	0,30 e 0,31 m/s	0,61 e 0,63 m/s	0,31 e 0,32 m/s
Leito borbulhante	0,37 e 0,40 m/s	0,75 e 0,88 m/s	0,36 e 0,40 m/s

Tabela 6.18 -Faixas de velocidade superficial do gás em cada regime para as três misturas testadas.

<i>Regime</i>	<i>VF-VG</i>	<i>PL-VG</i>	<i>PL-VF</i>
Região 1, leito fixo segregado)	0,13 e 0,33 m/s	0,13 e 0,33 m/s	0,13 e 0,20 m/s
Delimitação entre as regiões 1 e 2	0,41 e 0,53 m/s	0,41 e 0,53 m/s	0,27 e 0,28 m/s
Região2, leito borbulhante segregado.	0,56 e 0,59 m/s	0,56 e 0,59 m/s	0,29 e 0,30 m/s
Delimitação entre as regiões 2 e 3	0,62 e 0,66 m/s	0,62 e 0,66 m/s	0,31 e 0,32 m/s
Leito borbulhante parcialmente segregado	0,69 e 0,72 m/s	0,69 e 0,72 m/s	0,33 e 0,34 m/s
Delimitação entre as regiões 3 e 4;	0,76 e 0,78 m/s	0,76 e 0,78 m/s	0,35 e 0,36 m/s
Região 4, leito borbulhante, misturado.	0,82 e 0,89 m/s	0,82 e 0,89 m/s	0,37 e 0,41 m/s

Comparações entre os dados da Tabela 6.17, para os materiais isolados, e dos dados da Tabela 6.18, para as misturas, permitiram observar que as faixas de velocidade superficial para as misturas em regime de leito fixo ficam contidas entre o limite inferior determinado pelo material isolado de menor concentração na mistura e o limite superior pelo material de maior concentração. Em outras palavras, como as partículas mais finas tem velocidade mínima de fluidização mais baixa, sua adição provocou uma redução da velocidade de início da fluidização cujo limite é dado pela própria velocidade do material isolado com tendência a flutuar. Porém, a partir do início da fluidização, a segregação estabelece um comportamento diferenciado da mistura em relação ao leito de mesma altura composto pelos materiais isolados. Observa-se que o início da fluidização na mistura se deu numa velocidade superficial, igual a 0,33 m/s, superior ao do material isolado *flotsam* que é igual a 0,20 m/s.

Como análise complementar, foi observado em todos os materiais e em todas as misturas que para a condição de leito fixo as amplitudes das flutuações de pressão foram pequenas como consequência da ausência de bolhas de ar. As pequenas flutuações de pressão observadas em regime de leito fixo foram causadas pela vibração de algumas partículas durante a passagem do

gás através do leito. Por outro lado, no regime borbulhante, as amplitudes das flutuações de pressão aumentaram com o diâmetro das partículas e com a velocidade do gás. Estas observações também foram feitas por BI (2007) e SVOBODA *et al.* (1984). Em leito fluidizado, o espectro de amplitudes possui valores mais altos de amplitude que o obtido para o regime de leito fixo.

Também foi observado, para os três matérias e as três misturas, através da análise dos sinais de pressão obtidos nas três posições da coluna principal (*plenum*,  $z_1$  e  $z_2$ ) que as amplitudes dos sinais adquiridos acima da placa distribuidora são bem menores que os sinais do *plenum*, fato atribuído ao amortecimento gerado pela placa porosa.

O comportamento dos sinais de pressão em alturas diferentes da coluna do leito foi influenciado pela passagem de bolhas e pela eclosão das bolhas na superfície do leito. Os sinais medidos em  $z_2$ , local próximo à superfície do leito, apresenta maiores amplitudes e menor homogeneidade em virtude da proximidade com a região onde as bolhas emergem na superfície do leito.

Os gráficos dos sinais de flutuações de pressão para cada material e cada mistura utilizados nesta pesquisa, para as medidas de  $P_{plenum}$ ,  $P_{z_1}$  e  $P_{z_2}$ , apresentam o comportamento da pressão em cada instante de tempo. Dependendo da característica da curva é possível prever o regime de fluidização presente em cada velocidade superficial do gás. Assim as flutuações com amplitudes longas espaçadas e bem definidas indicam a presença de bolhas no leito.

Em comparação entre os dois transdutores localizados acima da placa distribuidora, o sinal de pressão em  $z_1$  apresenta uma maior pressão média do que em  $z_2$ , mas os sinais correspondentes ao transdutor em  $z_2$  apresentam maior amplitude nas flutuações do sinal. Esse fato é devido a que o transdutor localizado em  $z_2$  mede flutuações provocadas por bolhas de maior tamanho, além das mudanças de pressão geradas quando as bolhas emergem na superfície do leito. Este comportamento foi observado nos testes com partículas de vidro fino, vidro grosso, e com as misturas (*VF-VG*) e (*PL-VG*).

Nos gráficos dos sinais de pressão para a condição de leito fixo verifica-se que os sinais de pressões medidos nas posições  $z_1$  e  $z_2$  acusaram flutuações quase que imperceptíveis. Verificou-se durante a obtenção desta série de tempo a ausência de bolhas de ar e apenas uma tênue vibração das partículas.

Para o transdutor do *plenum* que é o transdutor que capta maiores flutuações nos sinais de pressão, os maiores valores de pressões absolutas foram obtidos para as partículas de vidro grosso

e para a mistura (VF-VG), enquanto que os menores foram obtidas para o leito contendo partículas de plástico e para a mistura (PL-VF).

Os ensaios com partículas de plástico apresentaram variações de pressão quase imperceptíveis quando se mantém a amplitude do sinal numa escala igual à utilizada para o vidro grosso, pelo fato de precisar menor velocidade do gás para fluidizar. Os sinais de pressão do plástico apresentam poucas flutuações, com amplitudes pequenas, isto também é perceptível na mistura (PL-VG).

O plástico e o vidro fino apresentaram fluidização característica de material do tipo B de Geldart com distribuição de bolhas praticamente uniforme e sem apresentar o efeito de pistão.

O vidro grosso que possui partículas do tipo D na classificação de Geldart não apresenta períodos longos nos sinais de pressão no plenum, indicando que o regime de leito pistonado não foi atingido. Isto também foi observado nas misturas de (PL-VG) e de (VF-VG).

Neste capítulo foram apresentados os resultados correspondentes ao primeiro teste de cada mistura e para cada material isolado, a concordância dos resultados pode ser verificada nos apêndices B e C, onde são apresentados os resultados obtidos nas repetições 2 e 3 tanto para os materiais isolados como para as misturas.

A velocidade de mínima fluidização foi determinada pelos dois métodos explicados nos capítulos 2 e 3 verificando-se que houve uma boa repetitividade dos resultados tanto para o método que envolve a medida da queda de pressão no leito (método tradicional) como para o método que envolve a determinação do desvio padrão das flutuações de pressão no *plenum*.

A determinação de  $U_{mf}$  da mistura através da medida do desvio padrão é dependente da localização da tomada de pressão e da região considerada no ajuste da reta (fato verificado para a medida a partir do *plenum*), conforme mostrado nas Tabs. 6.5, 6.9 e 6.13. A melhor aproximação entre os resultados obtidos entre esse método e o método tradicional ocorreu para a medida considerando apenas a região 2. Salienta-se que para a mistura PL-VF, aproximação igual à obtida considerando apenas os pontos da região 2, foi encontrada considerando-se todos os pontos levantados, ou seja, considerando-se as regiões 2, 3 e 4.

A comparação entre os resultados obtidos para  $U_{fi}$ ,  $U_S$  e  $U_{fc}$  mostrou que essas velocidades, características do processo de segregação, podem ser obtidas em qualquer uma das localizações das tomadas de medidas estudadas. Os desvios obtidos entre as medidas foram inferiores a 5%.

Outro método de identificação do início do fenômeno da segregação pode ser realizado comparando-se, através da análise das Tabs. 6.7 e 6.11, as pressões médias no fundo do leito (posição  $z_1$ ), onde o início da segregação é detectado pelo aumento da pressão média (misturas *VF-VG* e *PL-VG*) com a redução da velocidade do gás. Esse fato pode ser atribuído à movimentação das partículas menores ou mais leves para o topo do leito deixando maior quantidade de espaços vazios no fundo e, conseqüentemente, fazendo com que maior massa de partículas esteja acima da posição da tomada de pressão localizada nesse ponto. Para a mistura *PL-VF*, esse aumento não foi observado, pois, provavelmente, a movimentação das partículas de plástico para o topo levou à movimentação de partículas de *VF*, com menor diâmetro e maior densidade, para o fundo, reduzindo a porosidade do leito próximo à placa distribuidora. Como consequência, o aumento da pressão média não foi observado no ponto de início da segregação para essa mistura. Logo, conclui-se que a detecção do início da segregação do leito contendo misturas binárias também pode ser feita pela análise dos valores de pressão média do leito em função da velocidade do gás, desde que o transdutor de pressão esteja instalado no fundo do leito, acima da placa distribuidora, e que as partículas com tendência a flutuar (flotsam) possuam tamanho igual ou inferior às partículas com tendência a afundar (jetsam).

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ANÁLISES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Neste capítulo, para as análises no domínio da frequência, são apresentados os dados da primeira corrida experimental com cada mistura, além dos resultados obtidos nos testes com os materiais isolados.

As análises no domínio da frequência para as misturas  $(VF-VG)_I$ ,  $(PL-VG)_I$  e  $(PL-VF)_I$  são apresentadas a seguir. Para elas, foram avaliados os espectros de amplitude obtidos a partir de uma mesma condição experimental, em regime permanente de operação, com as aquisições dos sinais de flutuação de pressão efetuadas, simultaneamente, em diferentes posições no leito: *plenum*,  $z_1$  e  $z_2$ .

Não foram obtidos espectros, para as partículas de plástico isolado e vidro fino, em velocidades superiores a 0,41m/s, pois nesta velocidade o leito contendo essas partículas já se encontrava completamente fluidizado e misturado. Como já descrito no capítulo de revisão de literatura, os estudos de segregação de partículas são realizados em faixas de velocidade do gás abrangendo desde a condição onde se observa o início da movimentação das partículas até a velocidade de fluidização completa da mistura (FORMISANI *et al.*, 2001).

Salienta-se que neste capítulo optou-se por apresentar faixas variáveis da amplitude da transformada de Fourier, visando a identificação da amplitude das frequências dominantes. Portanto, é importante observar que para as menores velocidades do gás testadas (regimes de leito fixo e de transição para o início da fluidização) os eixos das ordenadas apresentam faixas menores que para os demais regimes de contato gás-sólido estudados.

### 7.1. Mistura de microesferas de vidro fino e vidro grosso (VF-VG)

Para os espectros de amplitude dos sinais de pressão da posição  $z_1$  e  $z_2$ , foi utilizada faixa do eixo vertical menor do que a utilizada no plenum, visando à identificação de alterações nas amplitudes das componentes de frequências nos espectros. A faixa adotada para os espectros dos sinais medidos na posição  $z_1$  e  $z_2$  foi de 0 a 30 Pa, valor que representa um quinto da faixa adotada para as medidas no plenum em velocidades superiores ao início da movimentação das partículas (regiões 2, 3 e 4). Esta faixa também foi utilizada nos gráficos dos espectros das outras misturas (PL-VG) e (PL-VF). A escala adotada do eixo vertical na figura 7.1, correspondentes à região 1 e à delimitação entre a região 1 e 2 foi de 0 a 10 Pa para melhorar a observação das componentes do espectro de amplitudes, conforme salientado anteriormente..

Os espectros de amplitude obtidos pelo transdutor de pressão localizado no *plenum*, para 14 velocidades superficiais do gás diferentes, são apresentados na Fig. 7.1.

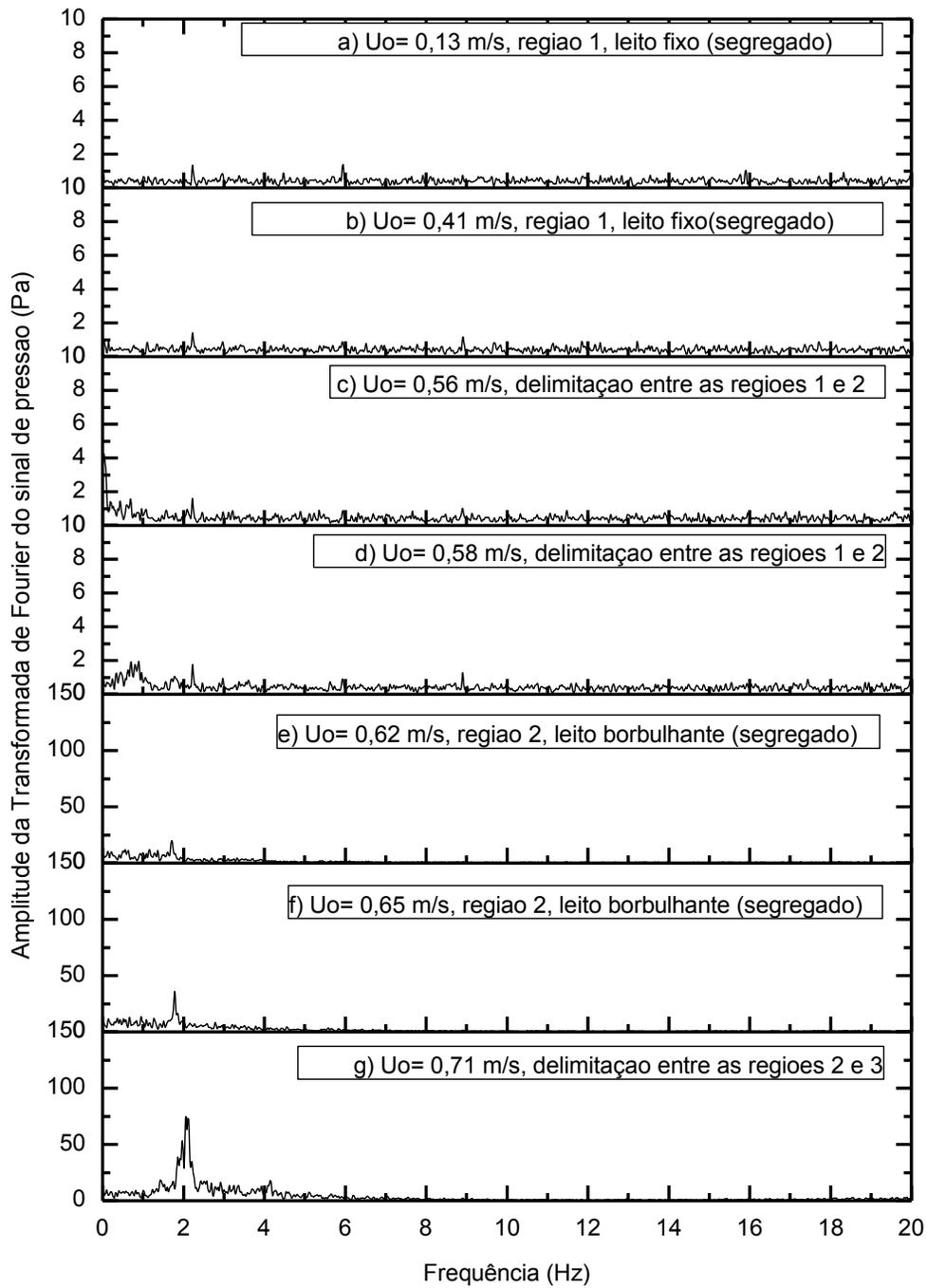


Figura 7.1– Espectros de amplitude dos sinais de pressão no *plenum* para mistura  $(VF-VG)_1$

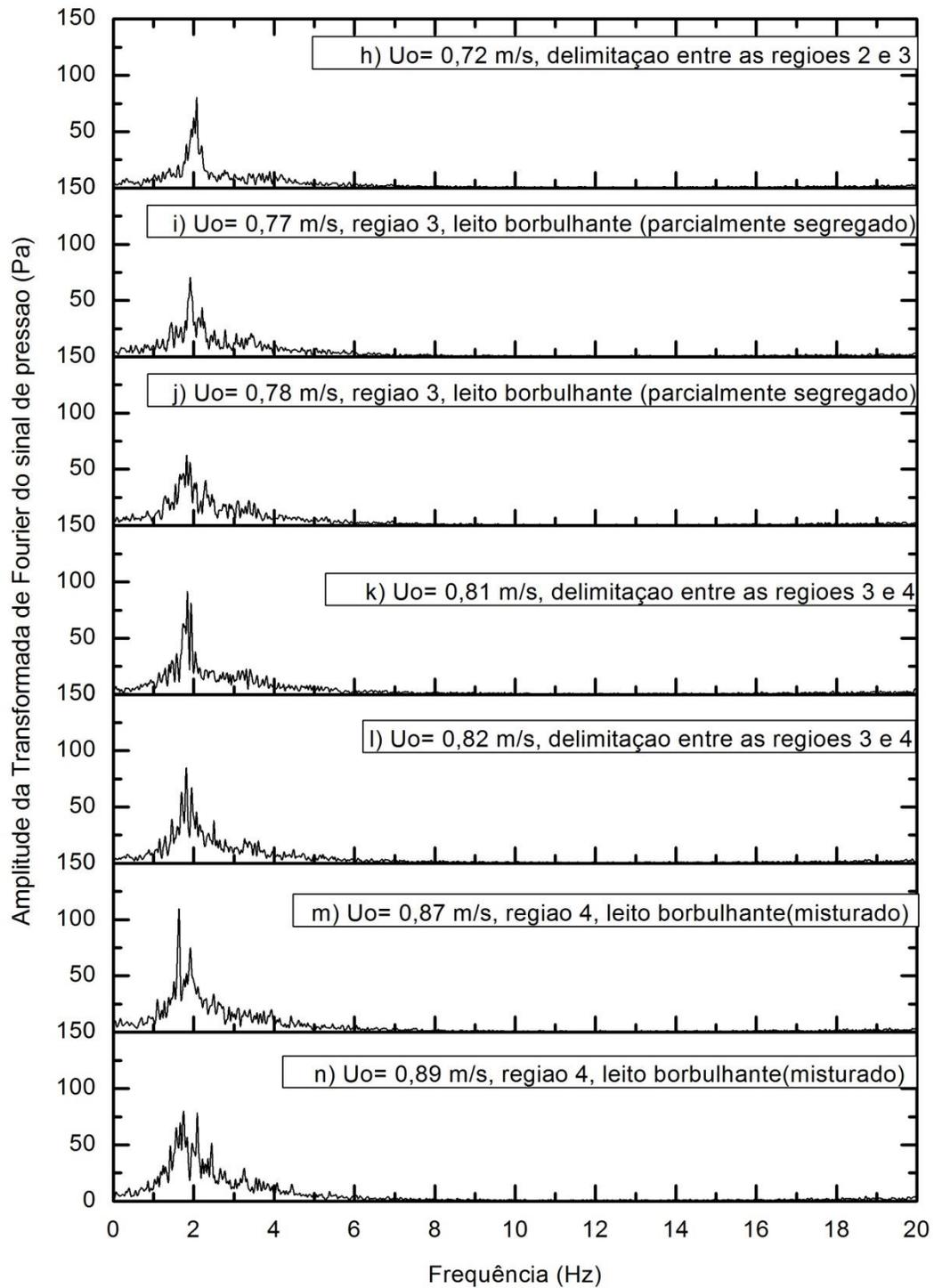


Figura 7.1 (cont.) – Espectros de amplitude dos sinais de pressão no *plenum*, para a mistura  $(VF-VG)_I$ .

De forma geral, entre os espectros das Figs. 7.1(a) a 7.1(n) percebe-se que, em regime borbulhante, os sinais apresentam valores mais altos de amplitude e banda mais larga de frequência em comparação com o caso do regime de leito fixo, quando todos os espectros não mostram, sequer a presença de uma componente dominante, na mesma faixa de 0 a 20 Hz.

Mais especificamente, em regime de leito fixo e na faixa de pressões dos gráficos de 0 a 150 Pa, as componentes são imperceptíveis já que sua amplitude está na faixa de 0 a 5 Pa. Este comportamento é observado até o regime leito borbulhante, isto é, para quando as velocidades superficiais do gás são maiores do que 0,62 m/s, Figs. 7.1(e) e 7.1(f). Em regime de leito borbulhante e independente de cada região, pode-se identificar uma frequência dominante em torno de 2 Hz, cuja amplitude, em geral, aumenta com a velocidade superficial do gás  $U_o$ .

A partir dos gráficos para a região 2, identifica-se uma componente dominante com frequência de 1,8 Hz e amplitude de 40 Pa [Fig. 7.1(f)]. Para a região 3 a frequência é de 2,0 Hz e amplitude de 75 Pa, e para a região 4 uma componente dominante de mesma frequência, porém, com amplitude de 100 Pa [Fig. 7.1(m)].

Os espectros dos sinais na região 2 de leito segregado [Figs. 7.1(e) e 7.1(f)] são uma consequência do movimento das partículas de vidro fino no topo do leito e à vibração de partículas de vidro grosso. Na região 3 [Figs. 7.1(i) e 7.1(j)], o leito apresenta-se em estado parcialmente fluidizado, que gera um espectro com uma componente dominante de frequência de cerca de 2 Hz, como dito anteriormente.

Os espectros de amplitude dos sinais na transição entre o leito fixo e o leito borbulhante [Figs. 7.1(c) e 7.1(d)], apresentam um comportamento característico de uma condição de mínima fluidização, neste caso gerado pela movimentação do vidro fino no topo do leito por ação do gás. Os sinais não permitiram a identificação de uma componente dominante.

Na transição entre as regiões 2 e 3, Figs. 7.1(g) e 7.1(h), a amplitude da componente dominante diminuiu de 75 Pa, para cerca de 65 Pa. Esta mudança de amplitude da componente dominante é devido ao comportamento do leito, o qual se apresenta com bolhas que diminuem de tamanho não só pela redução da vazão de gás, mas também pela interação das partículas finas com as de maior diâmetro, as quais iniciam o processo de segregação formando uma camada no topo do leito.

A fim de realizar comparações entre o comportamento das misturas e dos materiais isolados foram comparados os espectros dos materiais isolados e das misturas, obtidos, numa mesma velocidade do gás (Fig. 7.2).

Nas análises do vidro grosso isolado, (*VG*), avaliaram-se os espectros de amplitude obtidos numa mesma condição experimental (regime permanente) com sinais de pressão adquiridos simultaneamente em diferentes alturas do leito, (*plenum*,  $z_1$  e  $z_2$ ). Já nas análises do vidro fino isolado (*VF*), a máxima velocidade superficial ensaiada foi de 0,41m/s, condição em que o leito já se encontrava com velocidade bem acima da condição de mínima fluidização.

A identificação da mudança do regime borbulhante para o regime de leito fixo pode ser observada visualmente durante o processo de levantamento da curva fluidodinâmica e também pode ser observado através da análise do espectro de amplitude a cada redução da velocidade do fluido, uma vez que na condição de leito fixo não ocorrem variações no espectro de amplitude dos sinais de pressão em função da frequência.

Na figura 7.2(a), é possível observar que o espectro obtido para o vidro fino apresenta uma componente dominante com frequência de 2 Hz e amplitude de 60 Pa para o regime borbulhante com  $U_o = 0,40$  m/s. Nesta mesma velocidade o vidro grosso e a mistura (*VF-VG*) apresentam um comportamento de leito fixo [Figs. 7.2(b) e 7.2(c)]. A Fig. 7.2 tem a escala de 0 a 10 Pa no eixo vertical para poder mostrar a inexistência de uma componente dominante para o espectro correspondente à velocidade de 0,41m/s, onde o vidro grosso e a mistura apresentam um comportamento de leito fixo.

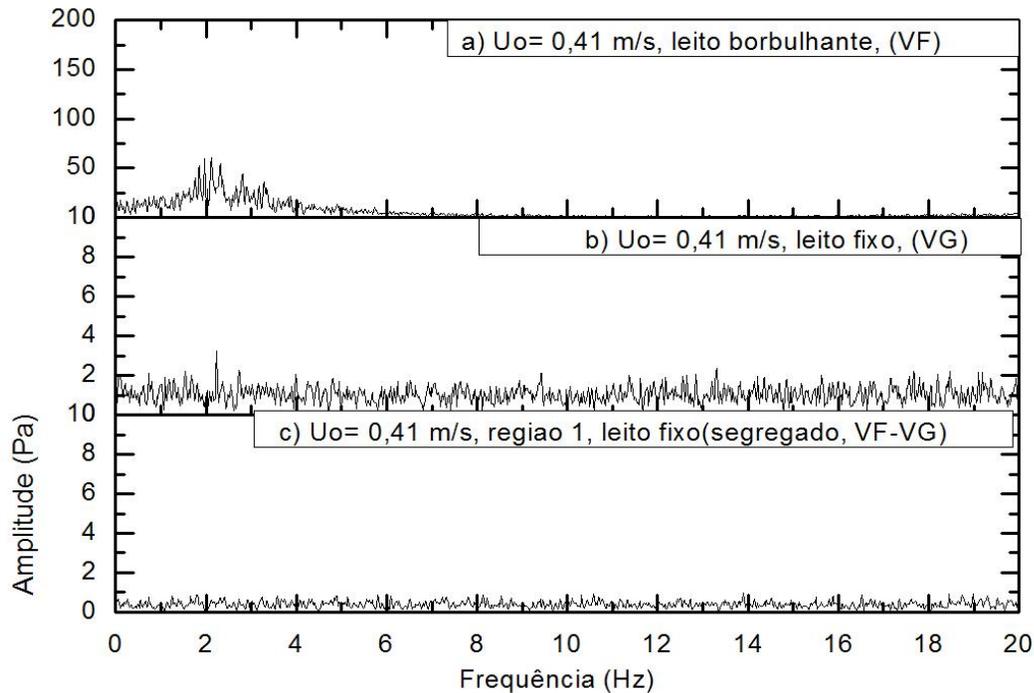


Figura 7.2 – Espectros de amplitude dos sinais no *plenum* para os materiais isolados e com a mistura (VF- VG)<sub>1</sub>:  $U_o = 0,41$  m/s

Como pode ser visto na Fig. 7.3, não foi apresentada a figura correspondente ao material vidro fino para  $U_o = 0,62$  m/s, pois trata-se de uma velocidade bem superior à  $U_{mf}$  desse material. Nesta velocidade, o ensaio com vidro grosso, Fig. 7.3(a), apresenta um espectro onde não se percebe componente dominante, que é uma característica do regime de leito fixo. Por outro lado para a mistura, o vidro fino apresenta movimento e pequenas bolhas no topo do leito podem ser visualizadas. O vidro grosso está em constante vibração, no espectro de amplitudes da mistura não se identifica uma componente dominante como é apresentado na Fig. 7.3(b).

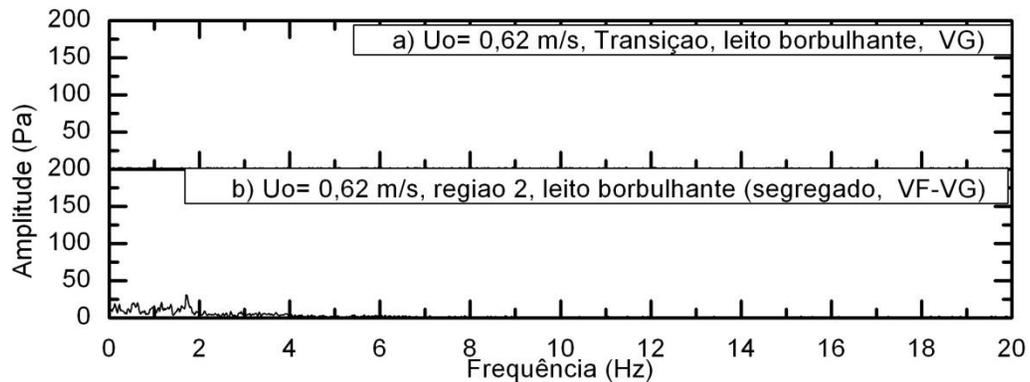


Figura 7.3 – Espectros de amplitude dos sinais no *plenum* para o vidro grosso (VG)<sub>1</sub> e com a mistura (VF- VG)<sub>1</sub>:  $U_o = 0,62$  m/s

Na figura 7.4, o vidro grosso e a mistura já na região 3 tem  $U_o = 0,78$  m/s, sendo que os dois apresentam componentes dominantes com frequência de 1,8 Hz e amplitude de 100 Pa, os dois materiais apresentam espectros característicos de regime borbulhante. O comportamento do espectro de amplitude dos sinais da mistura apresenta banda mais larga do que do espectro do vidro grosso, o que mostra que as flutuações de pressão são afetadas pela presença do vidro fino, que gera maior vibração de partículas e formação de bolhas com maior diversidade de tamanhos e velocidade de elevação.

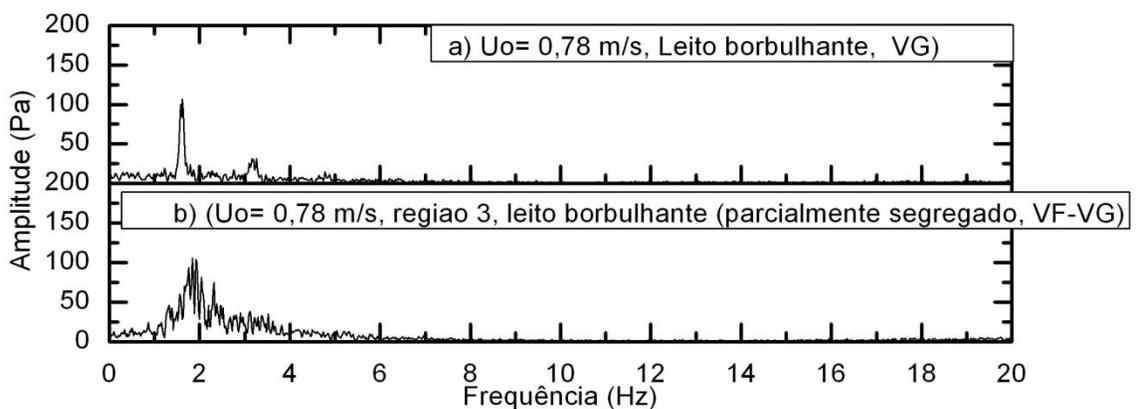


Figura 7.4 – Espectros de amplitude dos sinais no *plenum* para o vidro grosso (VG)<sub>1</sub> e com a mistura (VF- VG)<sub>1</sub>:  $U_o = 0,78$  m/s

Na figura 7.5, os espectros para a  $U_o = 0,89$  m/s do VG e da mistura (VF-VG) são característicos de leitos fluidizados borbulhantes com diferenças bastante sutis entre eles. A mistura apresenta um espectro com componentes dominantes que tem amplitude de 150 Pa, maior que o apresentado pelo vidro grosso (125 Pa), na frequência de 1,8Hz. Esse comportamento é atribuído ao processo de fluidização e quantidade de bolhas que na mistura é maior pela interação das partículas de vidro fino com o vidro grosso. As repetições realizadas para este teste mostraram resultados semelhantes.

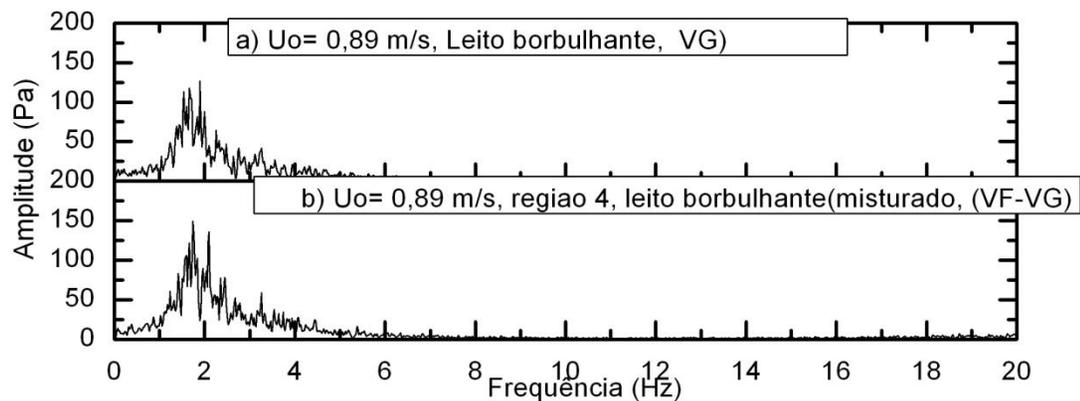


Figura 7.5 – Espectros de amplitude dos sinais no *plenum* para o vidro grosso (VG)<sub>1</sub> e com a mistura (VF- VG)<sub>1</sub>:  $U_o = 0,89$  m/s.

Os espectros de amplitude obtidos pelo transdutor de pressão localizado em  $z_I$ , para 14 velocidades superficiais do gás diferentes, são apresentados na Fig. 7.6.

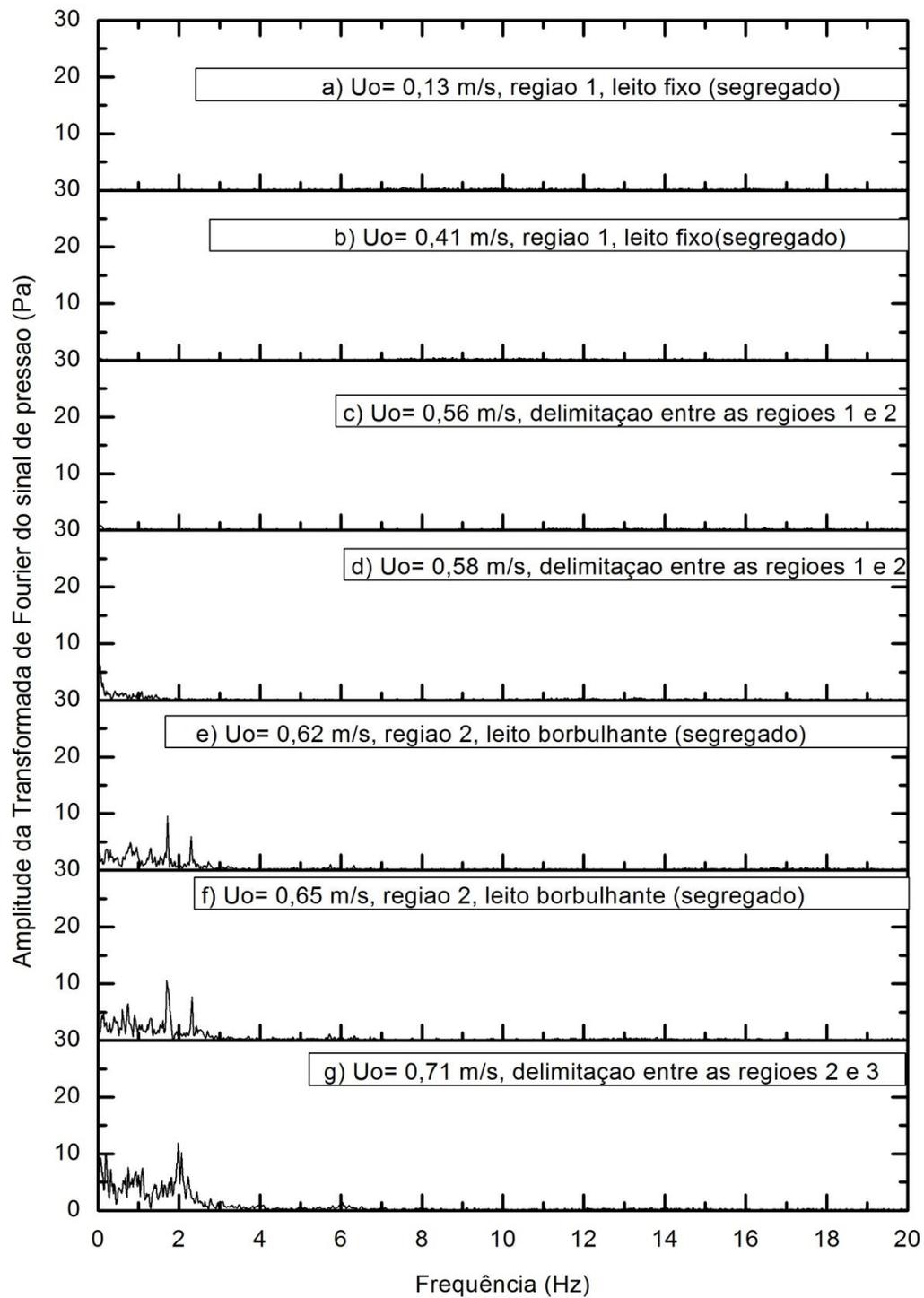


Figura 7.6 – Espectros de amplitude dos sinais de pressão em  $z_I$  para a mistura  $(VF-VG)_I$ :



Pode-se observar que, se comparados os espectros de amplitudes da Fig. 7.6 correspondentes aos sinais adquiridos com o transdutor em  $z_1$  com aqueles espectros dos sinais no *plenum*, mostrados na Fig. (7.1), percebe-se que as componentes de frequência mais baixa não estão presentes nos espectros do *plenum*. Isto também foi observado para os espectros dos sinais dos materiais isolado, o que indica que a placa distribuidora apresenta comportamento semelhante ao de um filtro passa-baixas removendo componentes abaixo de cerca de 1 Hz.

Os dados obtidos no *plenum* e na posição  $z_1$  forneceram espectros diferentes. Os espectros de amplitudes dos sinais no plenum destacam-se por apresentar características como banda mais larga e amplitudes maiores do que os espectros dos sinais em  $z_1$ .

Na posição  $z_1$  verifica-se que a identificação de uma componente dominante do espectro é mais difícil de ser visualizada em comparação com os espectros obtidos com o transdutor no *plenum*. Observa-se que na faixa de 0 a 2 Hz a amplitude das componentes do espectro são da ordem de 5 Pa na região de transição entre o regime de leite fixo e o regime de leite segregado. Essa amplitude é da ordem de 20 Pa, na região 4, onde o leite está misturado.

O espectro de amplitudes do sinal do *plenum* se destaca por apresentar características como banda mais larga e amplitudes maiores que os espectros dos sinais em  $z_1$  e  $z_2$  os quais serão apresentados posteriormente, nas Figs. 7.11 a 7.15. Estas amplitudes se apresentam como as maiores registradas em comparação com os sinais obtidos para o vidro fino e para o plástico.

Na figura 7.7, o espectro do vidro fino apresenta um comportamento de leite borbulhante com uma componente dominante em 0,2 Hz e com amplitude de 11 Pa. Por outro lado, para o vidro grosso e para a mistura, um comportamento de leite fixo é observado.

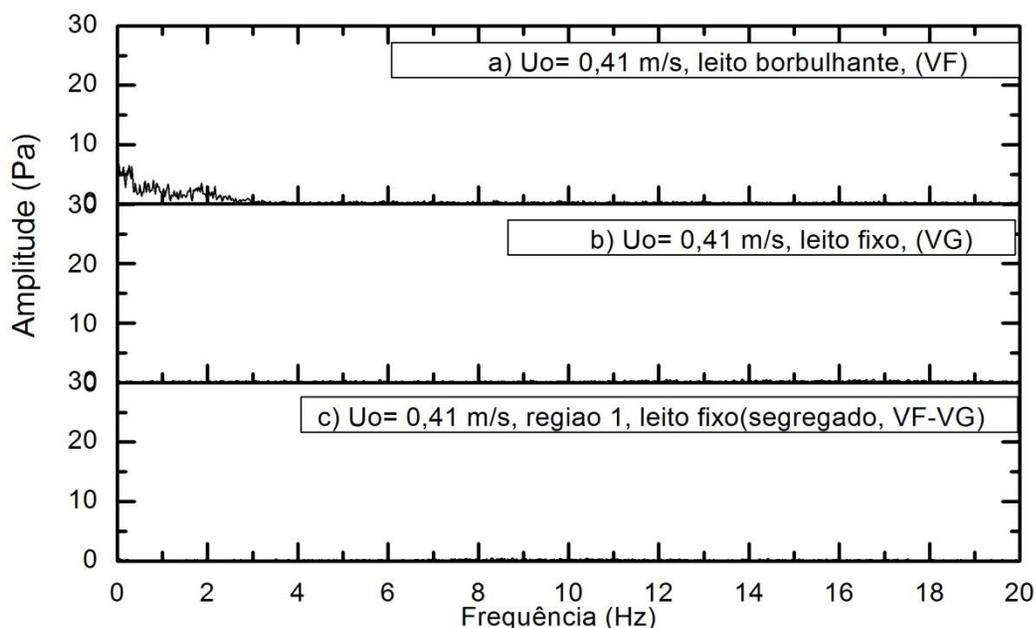


Figura 7.7 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_I$  para os materiais isolados e para a mistura (VF- VG)<sub>I</sub>:  $U_o = 0,41$  m/s.

Com  $U_o = 0,62$  m/s, não se observa componente dominante no espectro de amplitude obtido para o vidro grosso [Fig. 7.8(a)]. Já para a mistura, a frequência da componente dominante está em 1,8 Hz com amplitude de 10 Pa, Fig.7.8 (b), identificando-se um comportamento de um leito borbulhante, devido à presença de partículas de vidro fino que encontram-se fluidizadas no topo do leito.

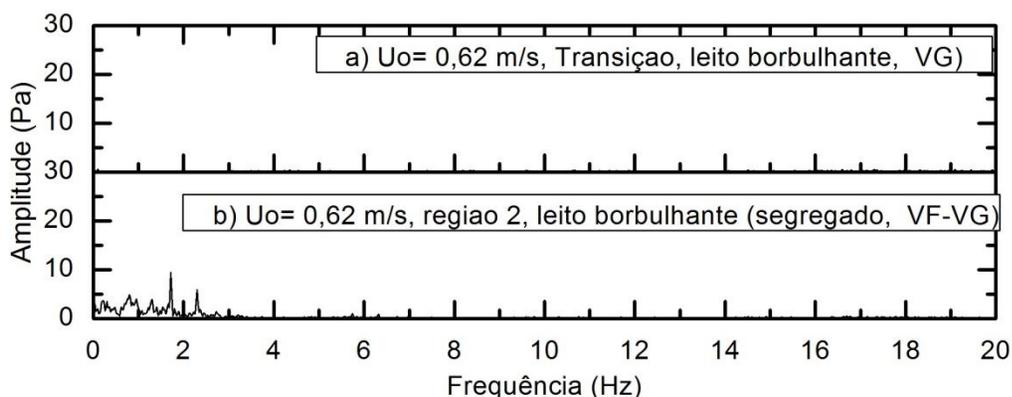


Figura 7.8 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_I$  para o vidro grosso (VG)<sub>I</sub> e para a mistura (VF- VG)<sub>I</sub>:  $U_o = 0,62$  m/s

Na figura 7.9(b) com  $U_o = 0,78$  m/s a mistura encontra-se na região 3. Nesta velocidade, a amplitude da componente dominante foi de 10 Pa e sua frequência de 1,7 Hz. O espectro apresenta-se “achatado” devido à turbulência que é característico do comportamento de leito fluidizado, com uma faixa, onde não se pode localizar a componente dominante. O espectro do vidro grosso apresenta uma componente dominante destacada, na frequência de 1,8 Hz com amplitude foi de 25 Pa, e que está associada à frequência das bolhas através do leito borbulhante.

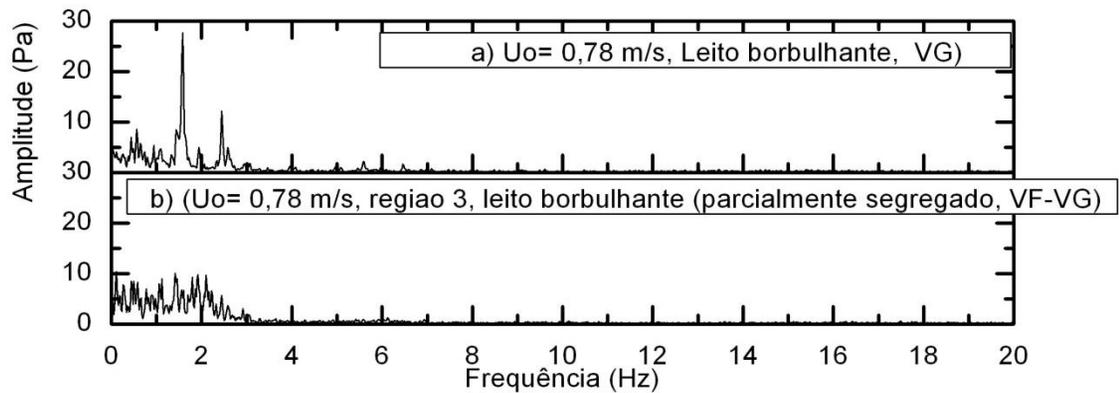


Figura 7.9 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_I$  para o vidro grosso  $(VG)_1$  e para a mistura  $(VF- VG)_I$ :  $U_o = 0,78$  m/s.

Para o leito misturado na Fig. 7.10(b), o comportamento dos espectros de amplitudes foi similar para os sinais de pressão do vidro grosso, com componentes dominantes em 1,8 Hz e amplitude de 15 Pa para o vidro grosso e de 19 Pa para a mistura.

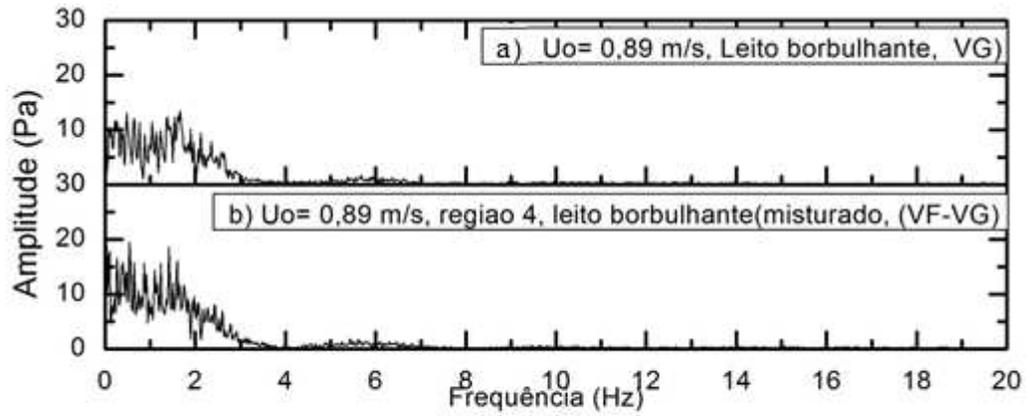


Figura 7.10 - Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_1$  para o vidro grosso  $(VG)_1$  e para a mistura  $(VF- VG)_1$ :  $U_o= 0,89$  m/s

Os espectros de amplitude obtidos pelo transdutor de pressão localizado em  $z_2$ , para 14 velocidades superficiais do gás diferentes, são apresentados na Fig. 7.11.

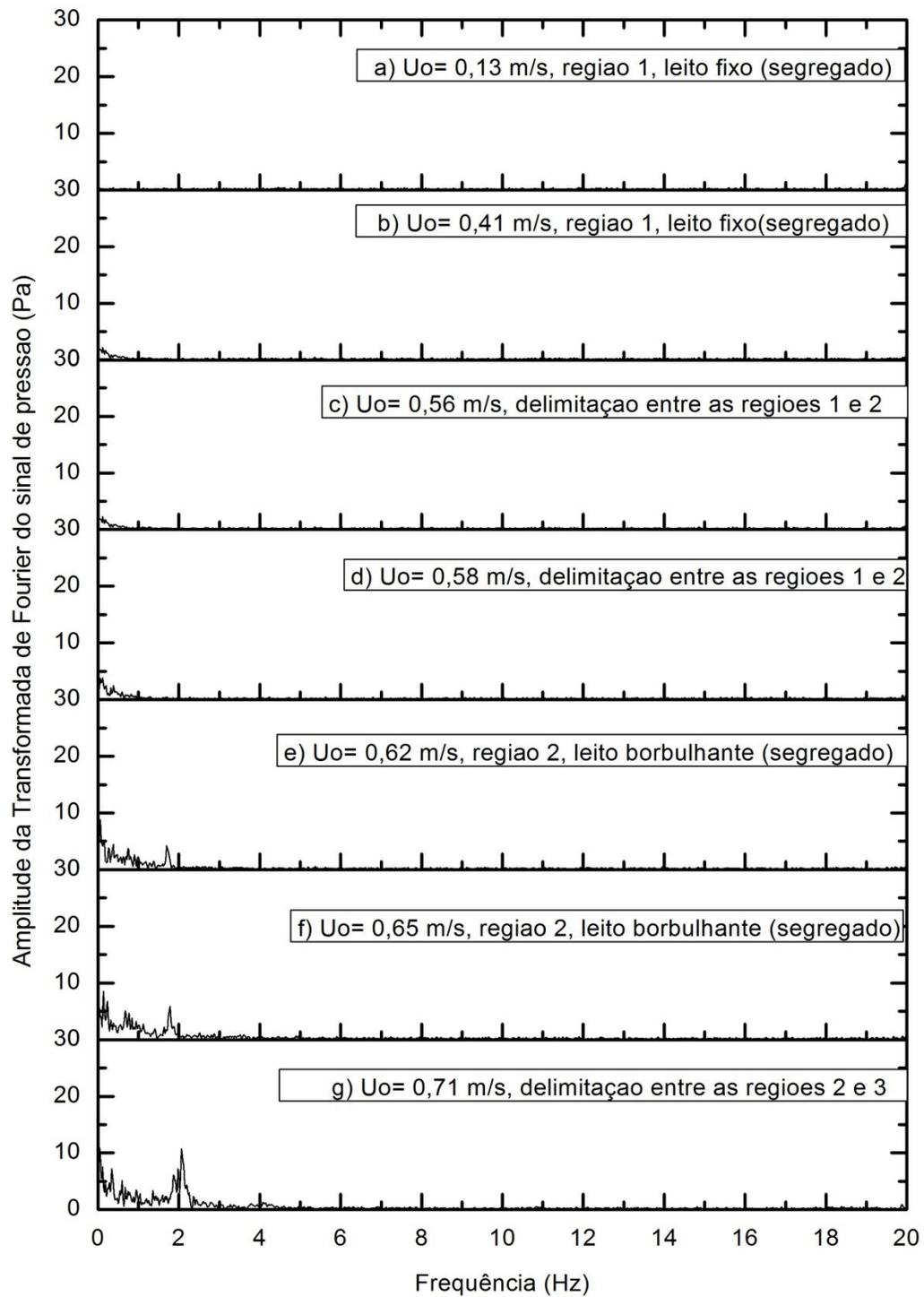


Figura 7.11 – Espectros de amplitude dos sinais de pressão em  $z_2$  para a mistura  $(VF-VG)_I$ :

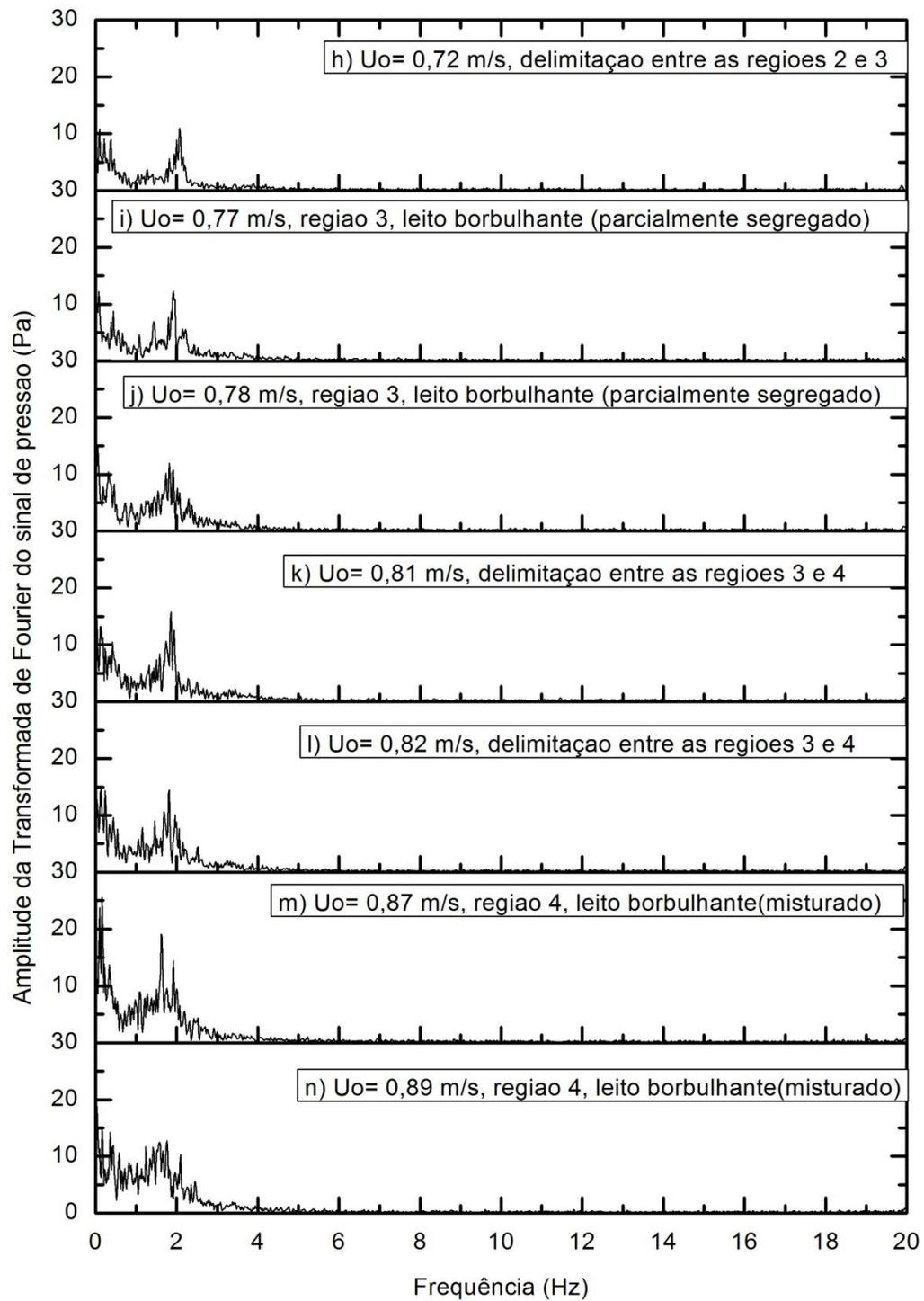


Figura 7.11 (cont.) – Espectros de amplitude dos sinais de pressão em  $z_2$  para a mistura  $(VF-VG)_I$ :

Da mesma forma que na análise dos espectros de amplitude dos sinais em  $z_1$ , Fig. 7.6, pode-se observar que, comparando-se os espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  [Fig. 7.11] e com aqueles espectros dos sinais no *plenum*, Fig. 7.1, percebe-se que as componentes de frequência mais baixa não estão presentes nos espectros do *plenum*. Isto também foi observado para os espectros dos sinais dos materiais isolados.

Os espectros de amplitudes de  $P_{z2}$ , na região 1, apresentam-se com característica de regime de leito fixo. Este comportamento também foi observado nos espectros de  $P_{plenum}$  e  $P_{z1}$ .

As componentes mais importantes dos espectros de amplitudes para cada região estudada estão na faixa de 0 a 2 Hz com amplitudes que vão de 5 Pa para a transição entre o regime de leito fixo e o regime de leito segregado [Figs. 7.11(c) e 7.11(d)] até 20 Pa nos espectros da região 4 de leito misturado [Fig. 7.11(n)]. Este comportamento também foi observado nos espectros dos sinais de pressão na posição  $z_1$ .

Na transição da região 2 para a 3 [Fig. 7.11(g) e 7.11(h)] pode-se observar um pequeno aumento na amplitude da componente dominante de 10 a 13 Pa, cujo valor não sofre grande alteração no espectro da região 3 [Fig. 7.11(i)] que também tem uma frequência de 1,8 Hz.

Na passagem da região 3 para a região 4, evidencia-se um pequeno aumento na amplitude da componente dominante de 10 Pa para 15 Pa. Este aumento é consequência do aumento da velocidade do ar e o aumento das bolhas em tamanho e velocidade com que sobem ao topo do leito.

Nos espectros de amplitude da Fig. 7.12, o vidro fino apresenta um espectro característico de leito borbulhante com uma componente dominante com frequência em torno de 0,2 Hz e amplitude de 18 Pa, enquanto o vidro grosso e a mistura apresentam comportamento de leito fixo.

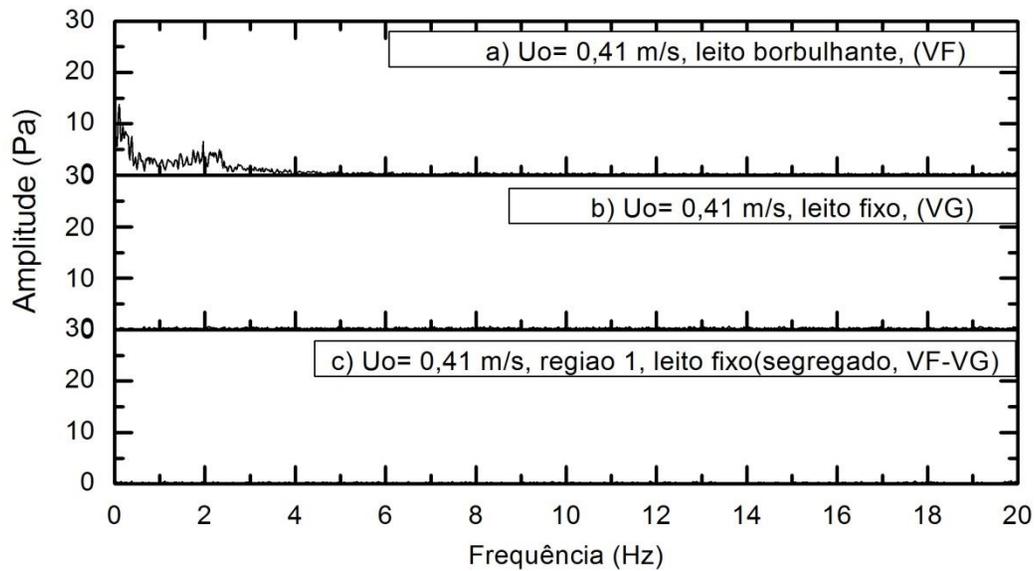


Figura 7.12 – Espectros de amplitude dos sinais em  $z_2$  para os materiais isolados e para a mistura  $(VF - VG)_1$ :  $U_o = 0,41$  m/s

Na figura 7.13, o espectro de amplitudes do vidro grosso não apresenta componentes dominantes, o vidro grosso está no regime de leito fixo, enquanto a mistura está num estado de leito parcialmente fluidizado com movimentação das partículas de vidro fino e componente dominante com frequência em torno de 1,8 Hz com uma amplitude de 5 Pa.

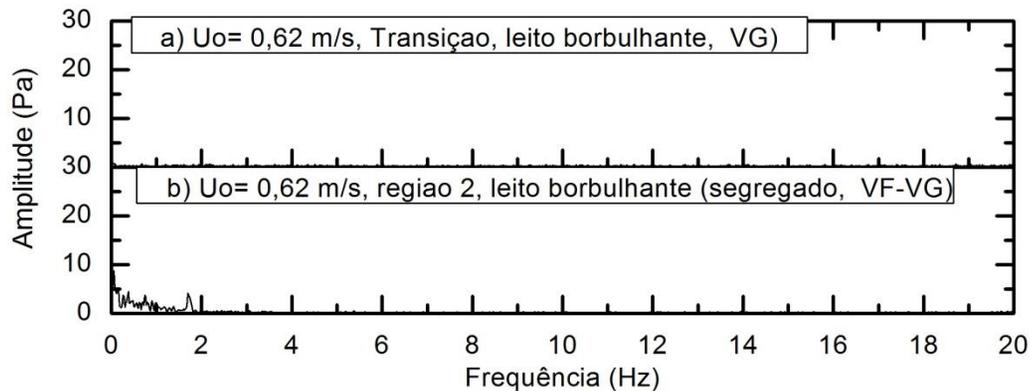


Figura 7.13 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  para o vidro grosso  $(VG)_1$  e para a mistura  $(VF - VG)_1$ :  $U_o = 0,62$  m/s

Nas figuras 7.14 e 7.15, pode-se observar que a componente dominante com frequência em torno de 1,8 Hz ocorre tanto para o vidro grosso quanto para a mistura, evidenciando o domínio do comportamento da mistura pelo vidro grosso. Entretanto, a largura da banda de frequências é maior na mistura devido à interação do vidro fino com o vidro grosso, aumentando a quantidade e diminuindo o tamanho das bolhas.

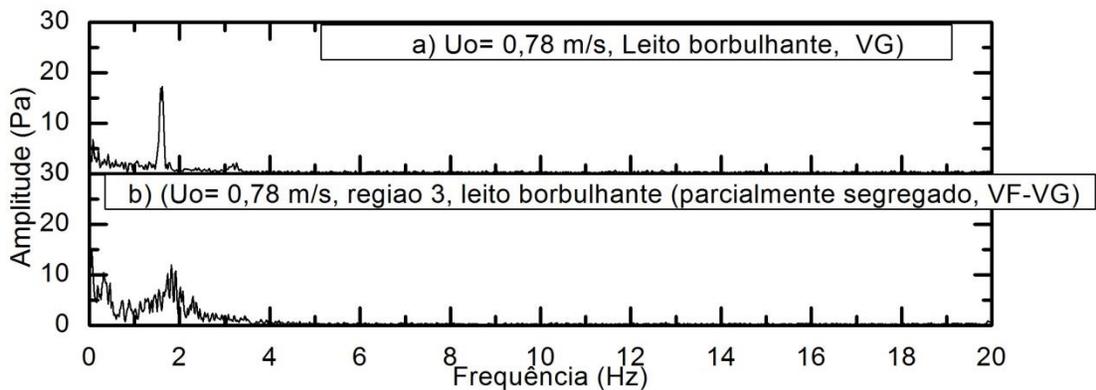


Figura 7.14 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  para o vidro grosso ( $VG_1$ ) e para a mistura ( $VF- VG_1$ ):  $U_o= 0,78$  m/s,

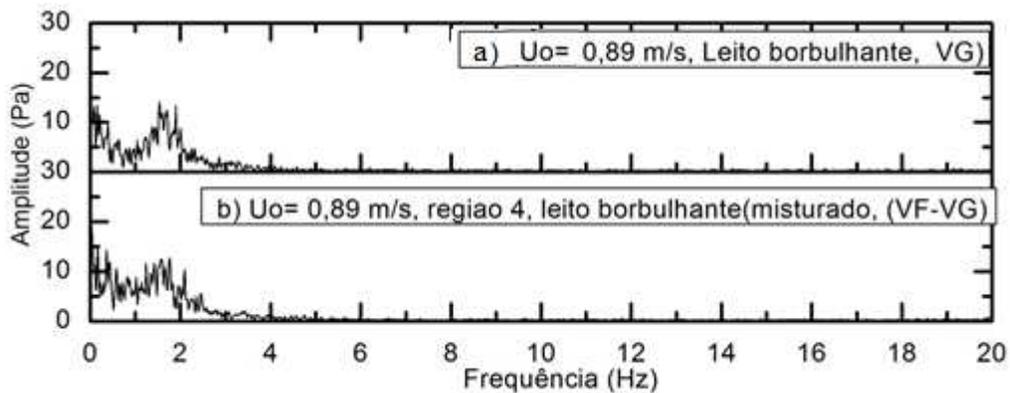


Figura 7.15 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  para o vidro grosso ( $VG_1$ ) e com a mistura ( $VF- VG_1$ ):  $U_o= 0,89$  m/s

## 7.2. Mistura de microesferas de plástico e vidro grosso (*PL-VG*)

Os espectros de amplitude obtidos pelo transdutor de pressão localizado no *plenum*, para 14 velocidades superficiais de gás diferentes, são apresentados na Fig. 7.16, enquanto que os espectros obtidos pelos transdutores localizados em  $z_1$  e em  $z_2$  são mostrados nas Figs. 7.21 e 7.26, respectivamente.

Para os espectros de amplitude dos sinais de pressão da posição  $z_1$  e  $z_2$ , foi utilizada uma escala no faixa do eixo vertical igual à utilizada na mistura (*VF-VG*). A escala adotada do eixo vertical na figura 7.16, correspondentes à região 1 e à delimitação entre a região 1 e 2 foi de 0 a 10 Pa para melhorar a observação das componentes do espectro de amplitudes.

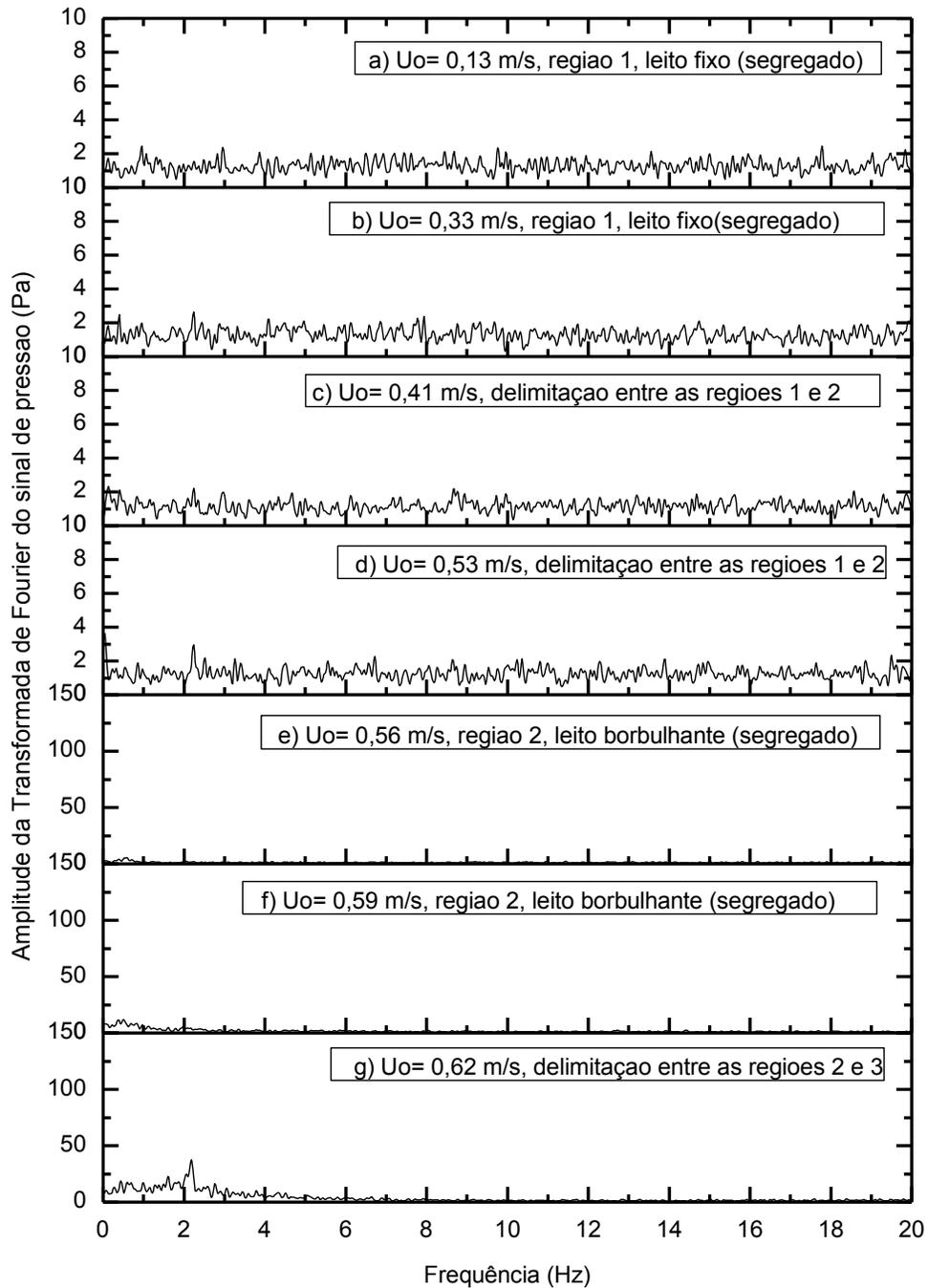


Figura 7.16 – Espectros de amplitude dos sinais de pressão no *plenum* para mistura (PL-VG).

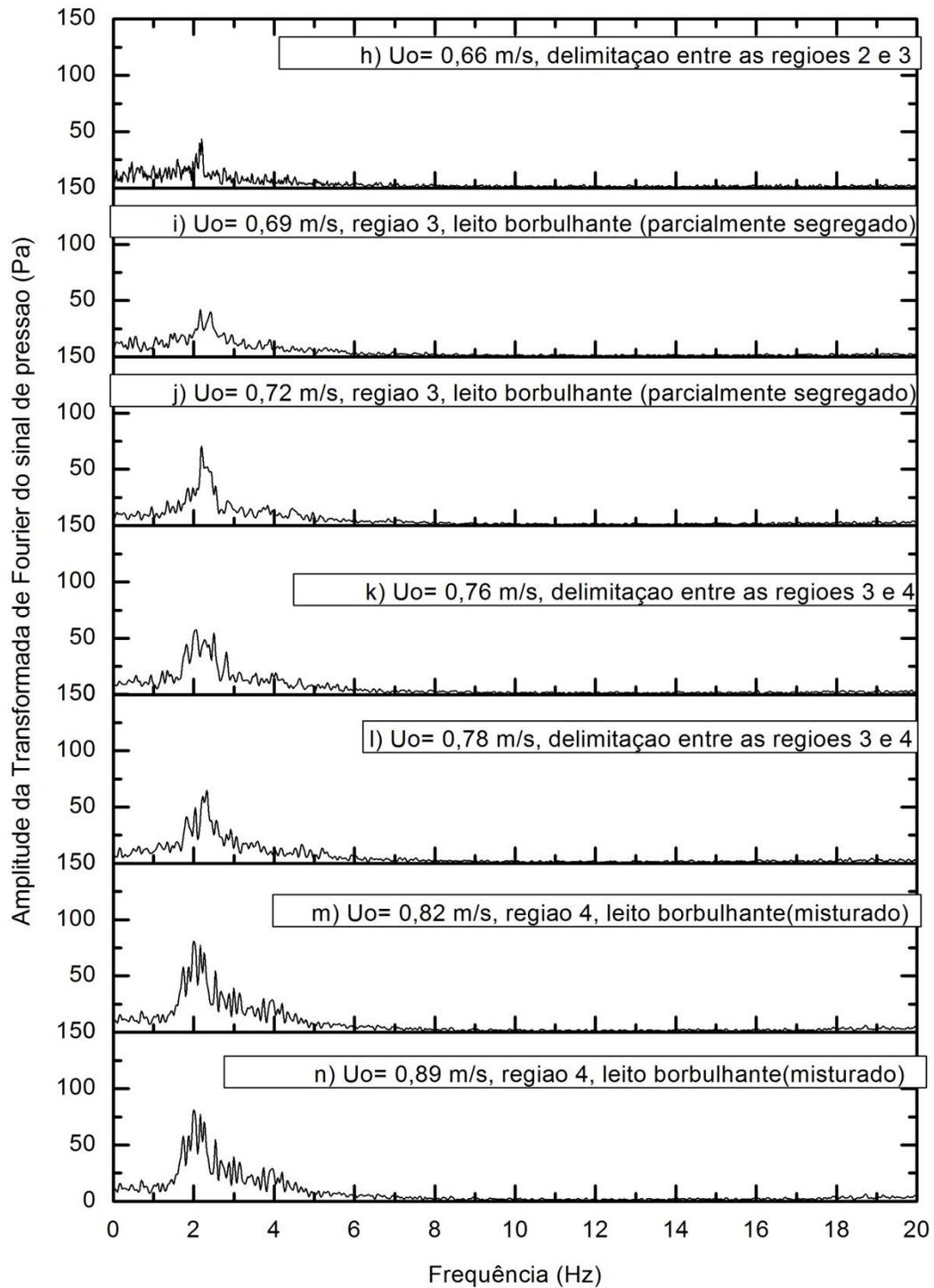


Figura 7.16 (cont.)– Espectros de amplitude dos sinais de pressão no *plenum* para mistura (PL-VG).

De forma geral, entre os espectros das Figs. 7.16(a) a 7.16(n), todos contidos na banda de 0 a 20 Hz, observa-se um comportamento similar à mistura (*VF-VG*) percebe-se que, em regime borbulhante, eles possuem valores mais altos de amplitude e banda mais larga de frequência em comparação com o caso do regime de leito fixo.

Em regime de leito fixo e na faixa de amplitude de 0 a 150 Pa, as componentes são imperceptíveis já que elas possuem amplitude na faixa de 0 a 5 Pa. Este comportamento é observado até a transição de regime de leito fixo para o regime de leito borbulhante [Fig. 7.16(e)], isto é, para quando as velocidades superficiais do gás são maiores do que 0,56 m/s. Em regime de leito borbulhante e independente de cada região, pode-se identificar uma componente dominante ao redor de 2 Hz, a qual aumenta ou diminui sua amplitude com o aumento da velocidade e do comportamento do leito. Na região 2 tal componente dominante possui amplitude de 15 Pa, enquanto que na região 4, apesar da frequência ser a mesma, a amplitude é de 90 Pa.

Os espectros dos sinais na região 2 de leito segregado [Fig. 7.16(e) e 7.16(f)] são consequência do movimento das partículas de plástico no topo do leito e à vibração de partículas de vidro grosso. Na região 3 [Fig. 7.16(h)] o leito se apresenta em um estado parcialmente fluidizado, cujos sinais possuem um espectro com uma componente dominante com frequência cerca de 2,2 Hz, como dito anteriormente.

Os espectros de amplitude na transição entre o leito fixo e o leito borbulhante, Fig. 7.16(e), não apresentam componentes dominantes, para a região 2 o espectro apresenta um comportamento característico da mínima fluidização, neste caso gerada pela movimentação do plástico no topo do leito por ação do gás.

A delimitação entre as regiões 2 e 3 [Figs. 7.16(g) e 7.16(h)] apresenta um aumento na amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes, assim, a componente dominante identificada em 2,2 Hz tem uma amplitude de 50 Pa, a qual aumenta para 75 Pa na região 3, Fig. 7.16(j).

A passagem entre as regiões 3 e 4, apresenta um aumento na amplitude da componente dominante, em 2,2 Hz, de 75 Pa para 90 Pa na região 4, Fig. 7.16(n).

Estas mudanças de amplitude das componentes dominantes dos espectros são devidas ao comportamento do leito onde ele está apresentando bolhas que aumentam de tamanho não só pelo aumento da vazão de gás, mas também pela interação das partículas leves de plástico (*PL*) com as de maior massa de vidro grosso (*VG*), e também ao aparecimento do fenômeno de segregação.

Na figura 7.17(a), o espectro para o plástico apresenta uma componente de frequência dominante para o espectro de amplitude do sinal do *plenum* em 0,2 Hz, e em 1 Hz, igual a 6 Pa e apresenta um comportamento de regime borbulhante com  $U_o = 0,41$  m/s.

Com a velocidade superficial  $U_o = 0,41$  m/s, o vidro grosso e a mistura (*VF-VG*) apresenta um comportamento de leito fixo.

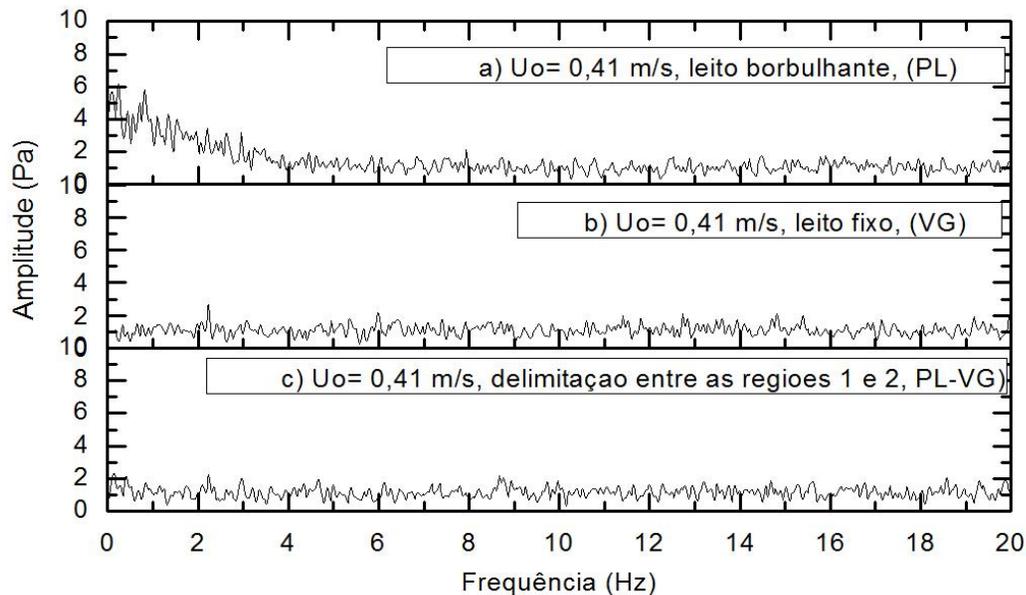


Figura 7.17 – Espectros de amplitude dos sinais no *plenum* para os materiais isolados e para a mistura (*PL- VG*)<sub>1</sub>:  $U_o = 0,41$  m/s

Para  $U_o = 0,56$  m/s, Fig. 7.18, não foram obtidos espectros para as partículas de plástico isolado, pois os testes relativos a este material foram avaliados em velocidade inferior a esse valor. Nessa velocidade as partículas de vidro grosso apresentam um espectro onde não se percebe componentes dominantes no espectro de amplitudes, que é característico de leito fixo. Por outro lado, para mistura o plástico apresenta movimento e pequenas bolhas no topo do leito com uma componente dominante de 7 Pa em 0,5 Hz, enquanto que o vidro grosso está em constante vibração.

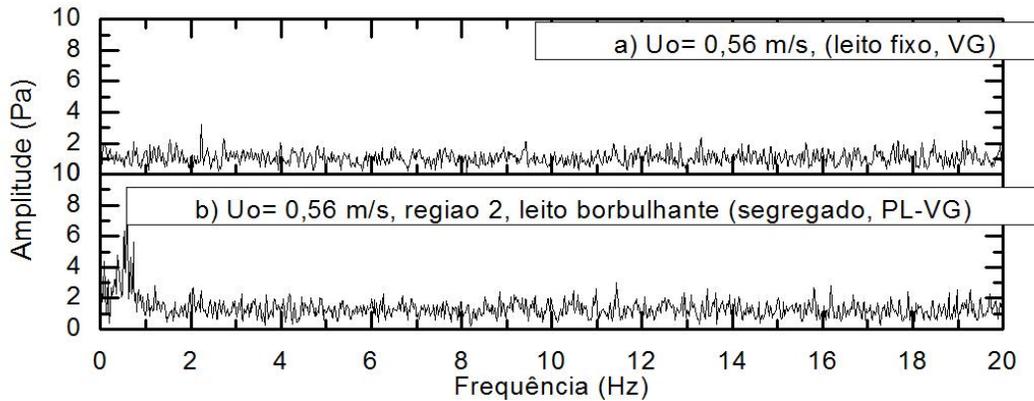


Figura 7.18 – Espectros de amplitude dos sinais no *plenum* com o vidro grosso (VG)<sub>1</sub> e com a mistura (PL- VG)<sub>1</sub>:  $U_o=0,56$  m/s

Na figura 7.19, o vidro grosso e a mistura estão fluidizados ( $U_o=0,72$  m/s) e apresentam componentes dominantes com frequências/amplitudes de 1,8 Hz/100 Pa e 2,2 Hz/80 Pa, respectivamente. Os dois materiais apresentam espectros característicos de regime borbulhante, sendo que o espectro da mistura tem banda mais larga do que o do vidro grosso, a mostra é afetada pela porcentagem de plástico, que gera maior vibração de partículas e quantidade de bolhas como foi observado no longo dos testes.

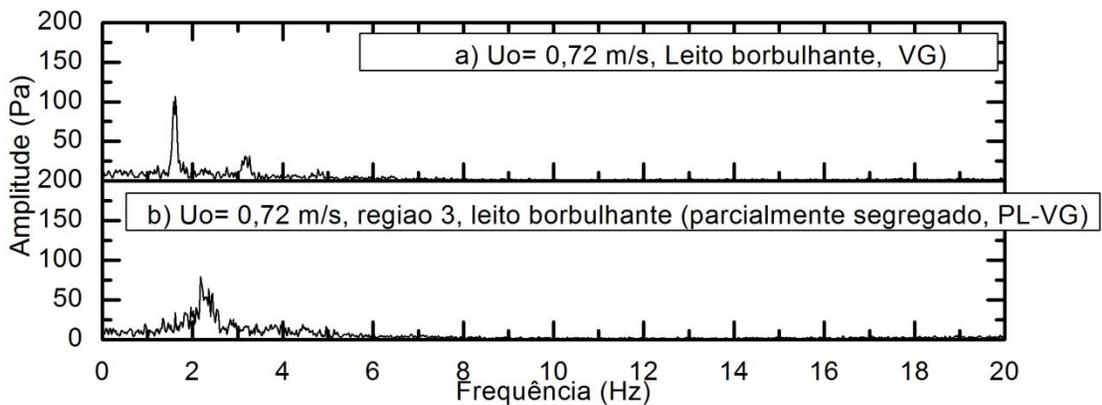


Figura 7.19 – Espectros de amplitude dos sinais no *plenum* para o vidro grosso (VG)<sub>os</sub> e para a mistura (PL- VG)<sub>1</sub>:  $U_o=0,72$  m/s

Na figura 7.20, os espectros de amplitudes dos sinais já com  $U_o = 0,82$  m/s tanto do *VG* e como da mistura (*PL-VG*) apresentam um espectro característico de um leito fluidizado, sendo que a mistura apresenta uma componente dominante com amplitude de 110 Pa, menor que para o vidro grosso que é de 125 Pa.

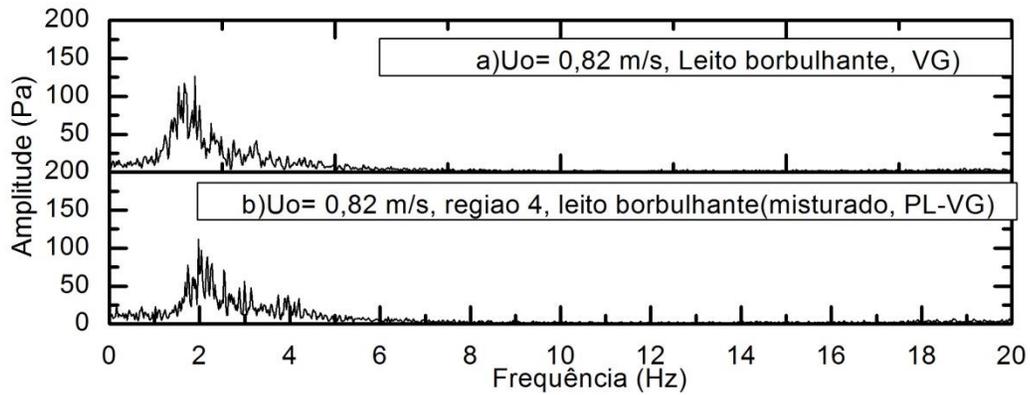


Figura 7.20 –Espectros de amplitude dos sinais no plenum para o vidro grosso ( $VG_1$ ) e para a mistura ( $PL- VG$ )<sub>1</sub>:  $U_o= 0,82$  m/s

Na figura. 7.21 são apresentados os espectros de amplitudes da Fig. 7.21, correspondentes aos sinais adquiridos em  $z_1$ .

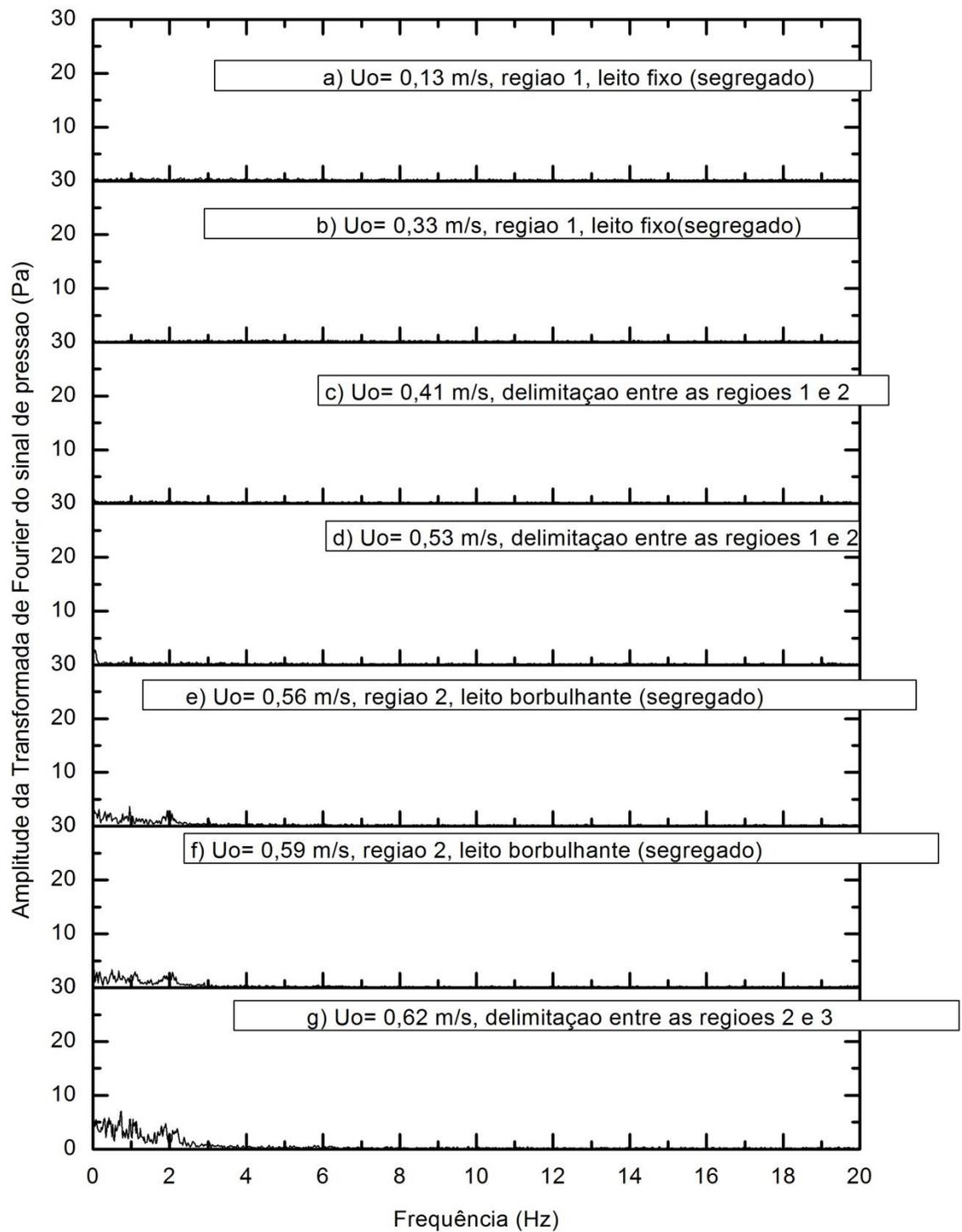


Figura 7.21– Espectros de amplitude dos sinais de pressão em  $z_I$  para mistura ( $PL-VG_I$ )

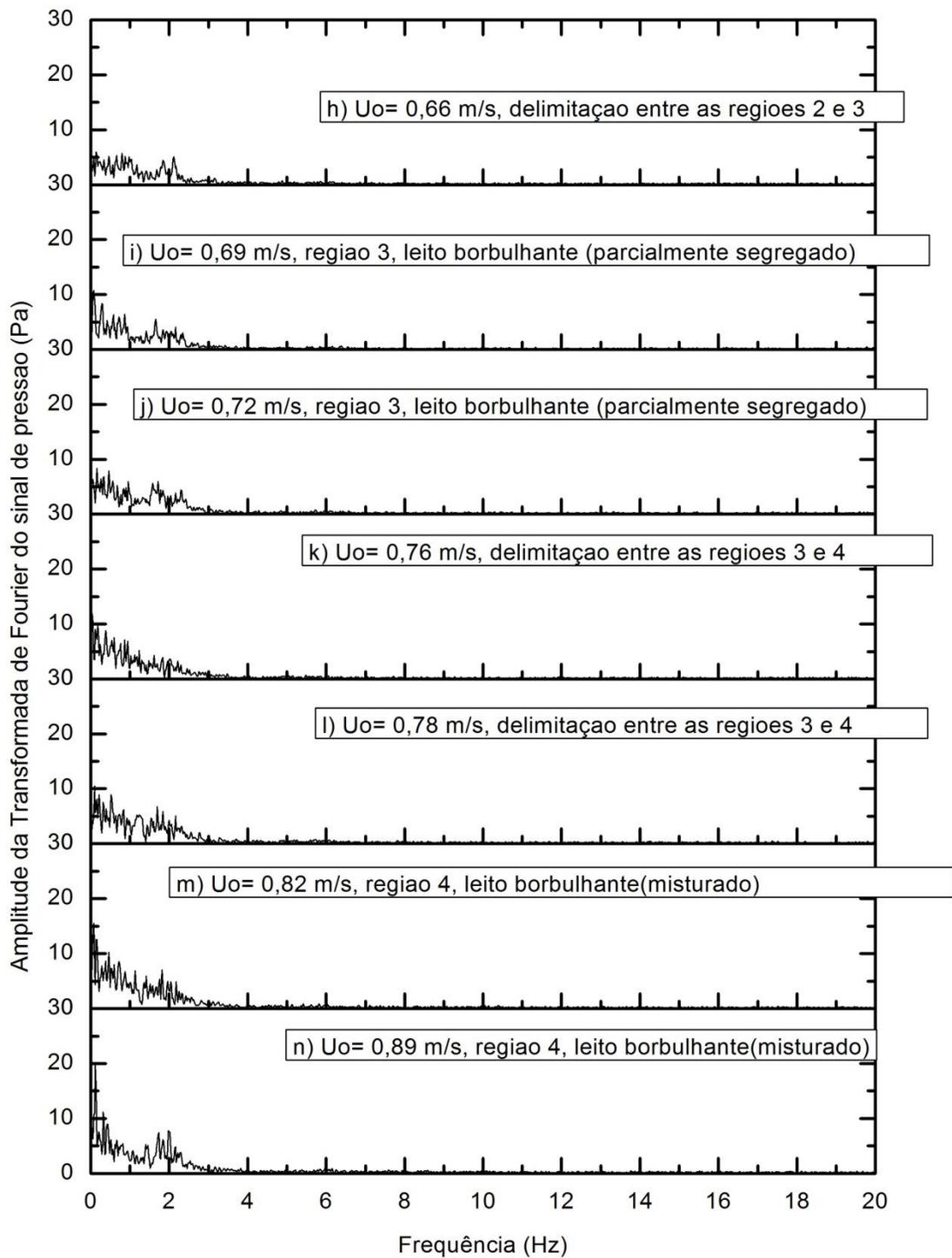


Figura 7.21 (cont.) – Espectros de amplitude dos sinais de pressão em  $z_I$  para mistura ( $PL-VG_I$ )

Comparando-se os espectros de amplitudes da Fig. 7.21, correspondentes aos sinais adquiridos em  $z_1$ , com aqueles espectros dos sinais no *plenum* [Fig. 7.16] observa-se que as componentes de frequência mais baixas não estão presentes nos espectros do *plenum*. Isto também foi observado para os espectros dos sinais dos materiais isolados. Acredita-se que esse resultado deve-se ao fato de que a placa distribuidora funciona como um filtro do tipo passa-baixa.

Na posição  $z_1$ , todos os espectros com  $U_0$  acima de 0,41 m/s apresentam componentes da frequência dominante, na faixa de 0 a 4 Hz, com amplitudes que vão de 5 Pa na transição entre o regime de leito fixo e o regime de leito segregado, Fig. 7.21(d), até os espectros que apresentam a região 4 de leito misturado com 20 Pa, Fig. 7.21(n).

A componente dominante dos espectros de amplitude dos sinais da posição  $z_1$ , apresentam a frequência em torno de 0,2 Hz, que é bem mais baixa dos que as observadas no *plenum*.

Na faixa de 0 a 30 Pa, os espectros de amplitudes dos sinais em  $z_1$  apresentaram componentes imperceptíveis na região 1, Fig. 7.22(a), característica por estar sob regime de leito fixo. Este comportamento também foi observado nos espectros do *plenum*.

Na figura 7.22, o espectro correspondente ao plástico apresenta um comportamento de leito borbulhante. Para o vidro grosso e a mistura identifica-se um comportamento de leito fixo.

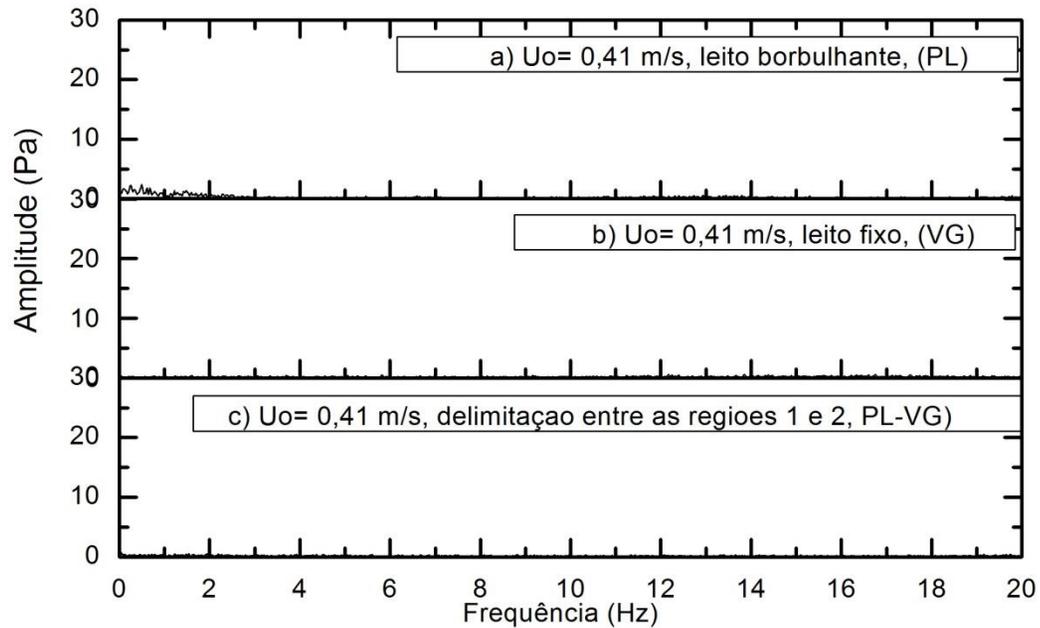


Figura 7.22 – Espectros de amplitude dos sinais em  $z_I$  para os materiais isolados e para a mistura  $(PL - VG)_I$ :  $U_o = 0,41$  m/s

Com  $U_o = 0,56$  m/s, o vidro grosso não apresenta componente dominante em seu espectro de amplitudes, já a mistura possui uma componente dominante em 0,2 Hz com amplitude de 5 Pa, identificando-se, neste caso, um comportamento de um leito borbulhante por conta do plástico que forma uma camada no topo do leito, com movimento causado pelo escoamento de ar que sobe entre as partículas de vidro.

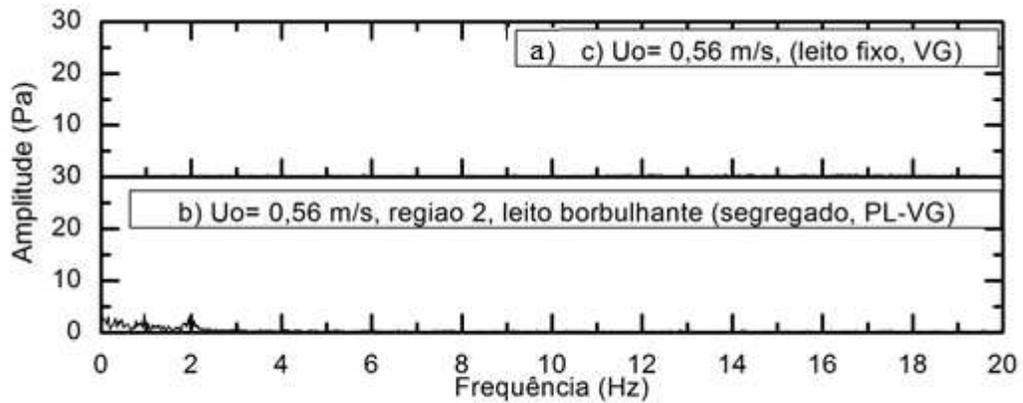


Figura 7.23 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_1$  para o vidro grosso  $(VG)_1$  e para a mistura  $(PL - VG)_1$ ,  $U_o = 0,56$  m/s

Na figura 7.24 para  $U_o = 0,72$  m/s, tanto o vidro grosso quanto a mistura apresentam um comportamento de leito já fluidizado, com uma banda de 0 a 4 Hz de 0 a 4 Hz onde se pode identificar componentes do espectro. O espectro do vidro grosso é característico da presença de bolhas maiores e regime borbulhante com sua componente dominante em 1,7 Hz com amplitude de 28 Pa. Já para a mistura a componente dominante foi de 10 Pa em 0,2 Hz.

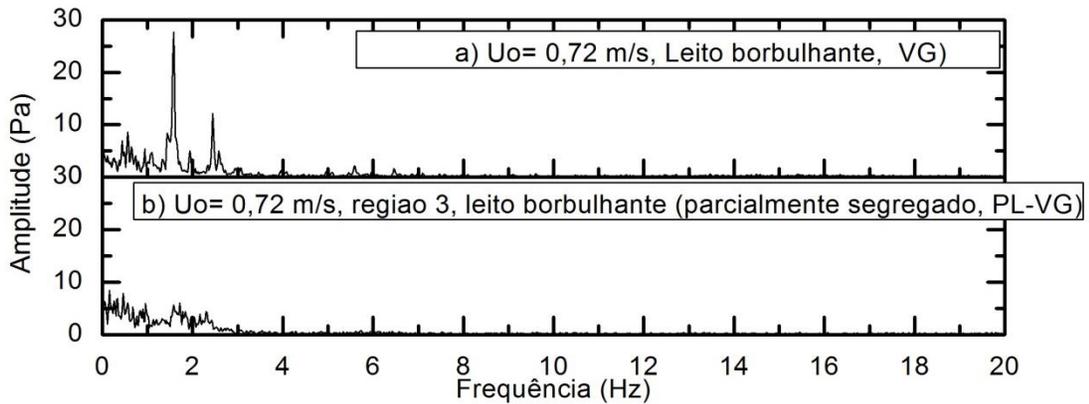


Figura 7.24 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_1$  para o vidro grosso  $(VG)_1$  e para a mistura  $(PL - VG)_1$ ,  $U_o = 0,72$  m/s.

Na figura 7.25(b), os espectros são característicos de um leito em regime borbulhante tanto para vidro grosso e a mistura, entretanto, mesmo com apenas 5% de plástico, percebe-se diferenças evidentes entre eles.

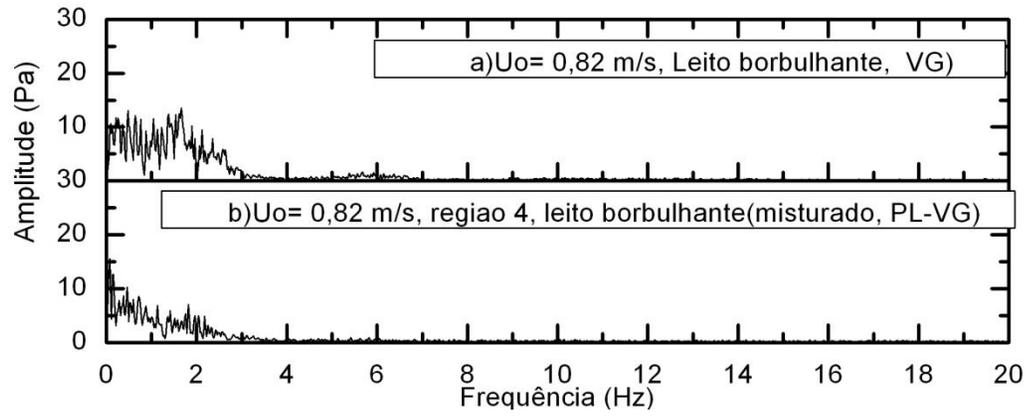


Figura 7.25 - Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_1$  para o vidro grosso  $(VG)_1$  e para a mistura  $(PL- VG)_1$ ,  $U_o = 0,82$  m/s

Na figura 7.26 são apresentados os espectros de amplitude dos sinais de pressão adquiridos em  $z_2$ .

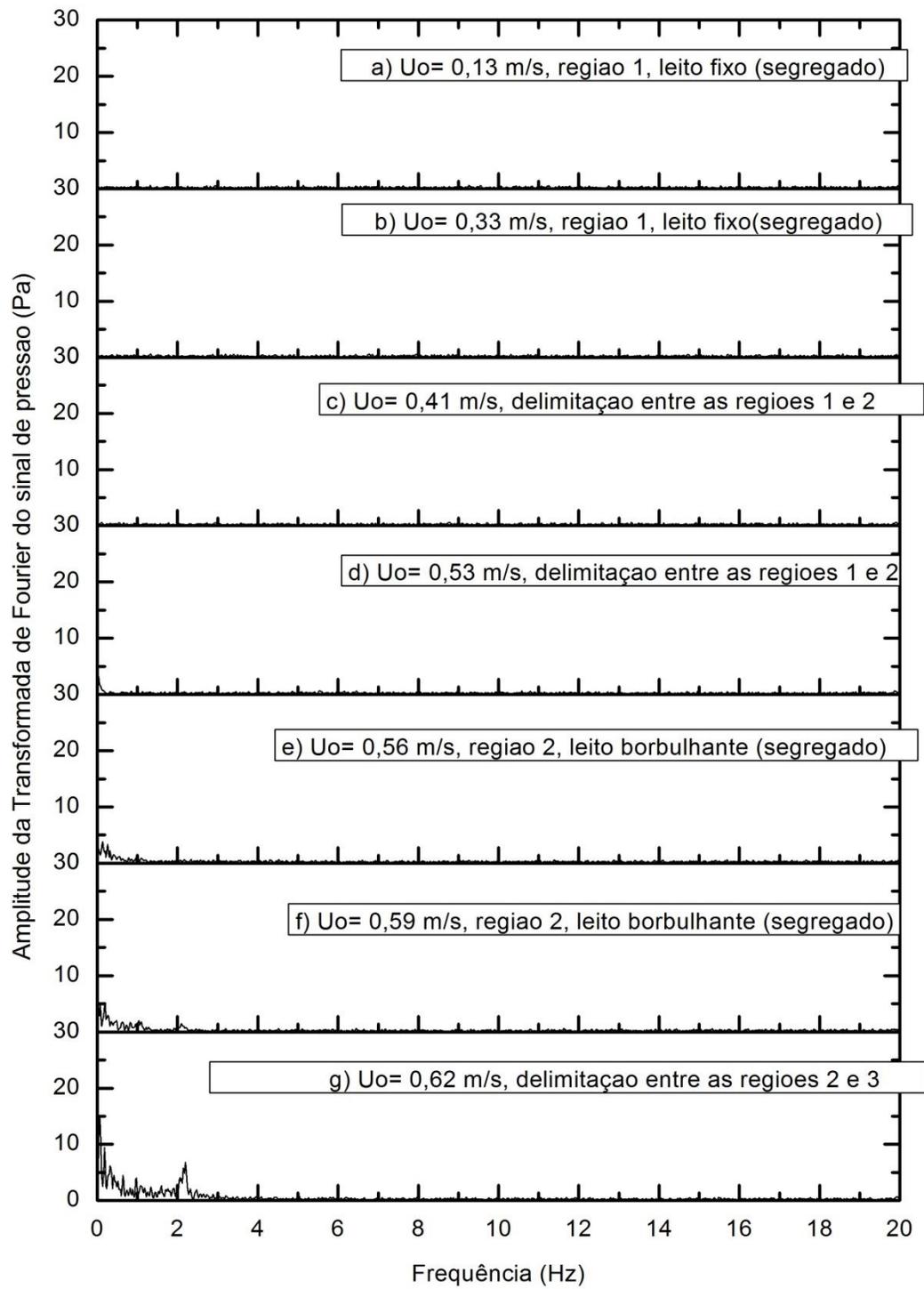


Figura 7.26 – Espectros de amplitude dos sinais de pressão em  $z_2$  para mistura  $(PL-VG)_1$

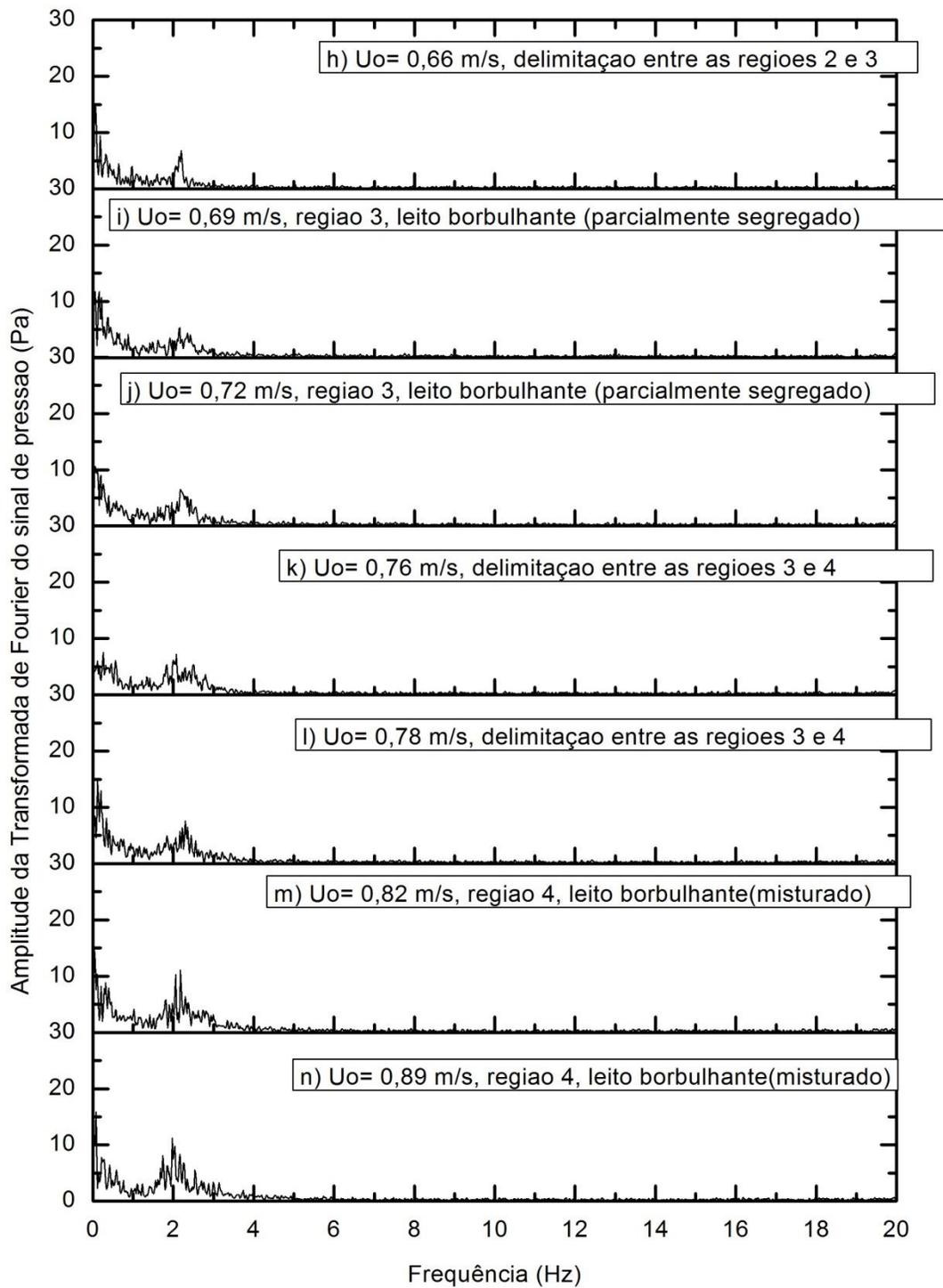


Figura 7.26 (cont.) – Espectros de amplitude dos sinais de pressão em  $z_2$  para mistura  $(PL-VG)_1$

O espectro de amplitude dos sinais em  $z_2$  destacam-se por apresentarem componentes dominantes com frequências de 0,2 ou 2,2 Hz.

Os espectros de amplitude dos sinais em  $z_2$  apresentaram componentes imperceptíveis na região 1 na faixa de 0 a 30 Pa do gráfico, que é uma característica do regime de leito fixo, Fig. 7.26(b). Este comportamento também foi observado nos espectros do  $P_{plenum}$  e  $P_{z1}$ .

Em todas as regiões de 1 a 4 desde leito fixo até leito misturado, as componentes dos espectros ficaram dentro da banda de 0 a 4 Hz, com amplitudes que vão de 8 Pa para a delimitação entre a região 1 e a região 2, até os espectros que apresentam a região 4, Fig. 7.26(n), de leito misturado com 16 Pa. Este comportamento foi também observado nos espectros dos sinais de pressão na posição  $z_1$ .

Na passagem da região 2 a 3, Fig. 7.26(h), pode encontrar-se uma componente dominante de 15 Pa de amplitude na região 2, que é menor na região 3 com valor de 10 Pa.

Na passagem da região 3 para a região 4, Fig. 7.26(l), se evidencia um aumento na amplitude da componente dominante de 9 Pa para 15 Pa. Este aumento das amplitudes é consequência do aumento da velocidade do ar e do aumento das bolhas em tamanho e velocidade com que sobem ao topo do leito.

Para os espectros de amplitude da Fig. 7.27 não é possível identificar componente dominante para os materiais, mas o plástico visualmente nos testes apresentou um comportamento característico de leito borbulhante, o vidro grosso e a mistura, eles apresentam um comportamento de leito fixo.

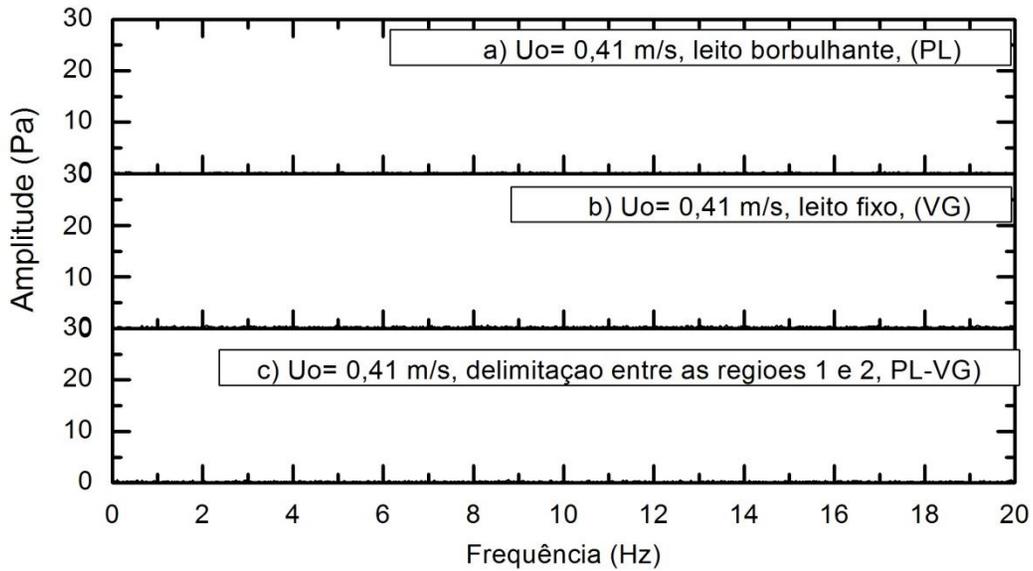


Figura 7.27 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  para os materiais isolados e para a mistura (PL-VG)<sub>1</sub>:  $U_o = 0,41$  m/s

Na figura 7.28, o espectro de amplitudes do vidro grosso não apresenta componentes perceptíveis na faixa de 0 a 30 Pa no espectro de amplitude, o vidro grosso encontra-se no regime de leito fixo, em quanto a mistura está num estado de leito parcialmente fluidizado com movimentação das partículas de plástico, sendo que, neste caso, a componente dominante tem uma frequência em torno de 0,2 Hz com uma amplitude de 4 Pa.

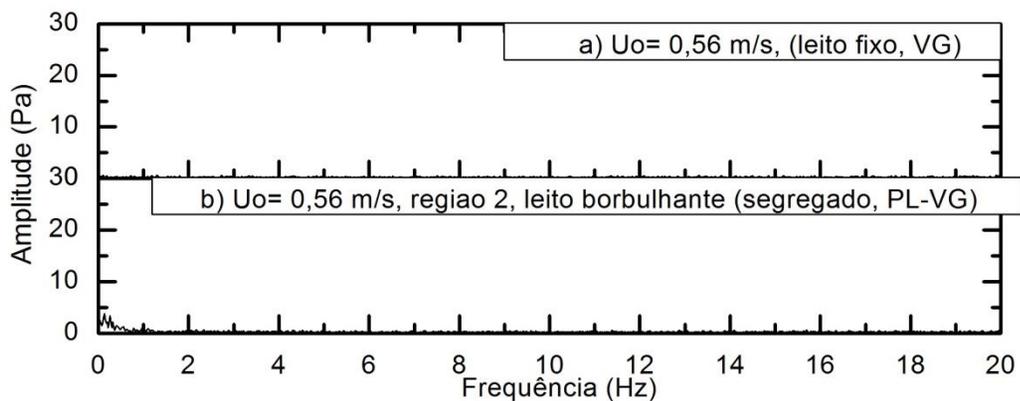


Figura 7.28 –Espectro de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  para o vidro grosso (VG)<sub>1</sub> e para a mistura (PL-VG)<sub>1</sub>:  $U_o = 0,56$  m/s.

Na figura 7.29 para  $U_o = 0,72$  m/s, é evidente uma componente de destaque no espectro do vidro grosso (VG) em torno de 1,7 Hz, enquanto que, para a mistura, há dois picos com a componente de maior amplitude numa frequência mais baixa em torno de 0,2 Hz. Novamente, é evidente que a presença do plástico na mistura provoca alterações importantes na fluidodinâmica do leito.

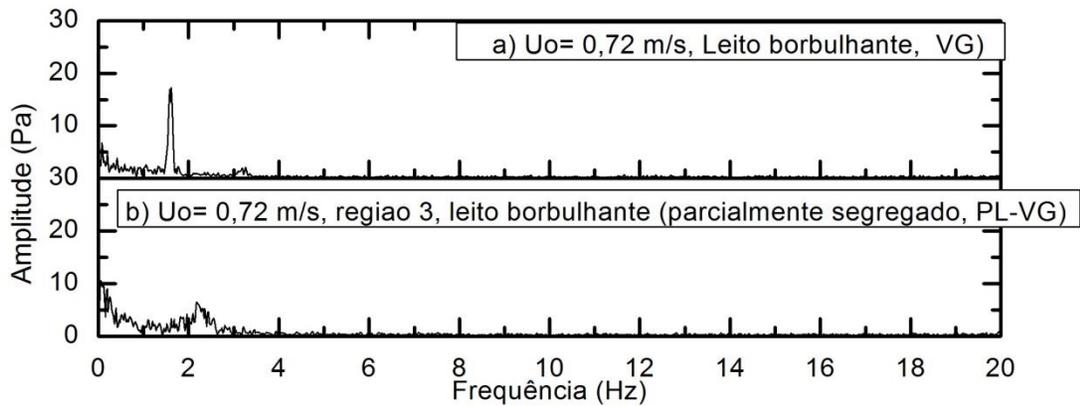


Figura 7.29 –Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  para o vidro grosso ( $VG_1$ ) e para a mistura ( $PL-VG$ ):  $U_o= 0,72$  m/s

Na figura 7.30, pode-se observar duas componentes dominantes em 0,2 e 1,8 Hz para o espectro do vidro grosso, enquanto que, para a mistura, as componentes dominantes podem ser observadas em 0,2 e 2,2 Hz.

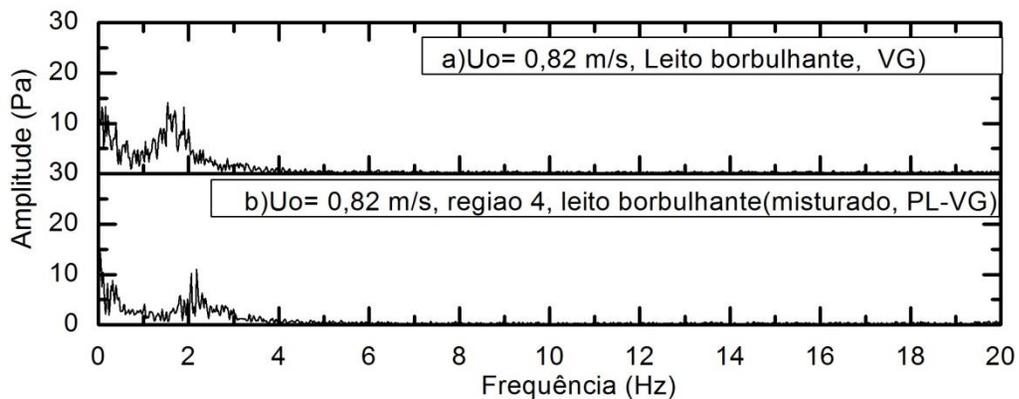


Figura 7.30 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  para o vidro grosso ( $VG_1$ ) e para a mistura ( $PL-VG$ ):  $U_o= 0,82$  m/s

O comportamento dos espectros do vidro grosso mostra tamanho de bolhas maiores e em maior quantidade, isto resultado de apresentar espectros com maiores amplitudes do que os da mistura.

### **7.3. Mistura de microesferas de plástico e vidro fino (*PL-VF*)**

Na figura 7.31 são apresentados os espectros de amplitudes dos sinais medidos no *plenum*, para 14 diferentes velocidades superficiais, correspondentes à mistura (*PL-VF*).

Os espectros obtidos a partir das medidas nas posições  $z_1$  (Fig. 7.36) e  $z_2$  são apresentados nas Figs 7.36 e 7.41, respectivamente.

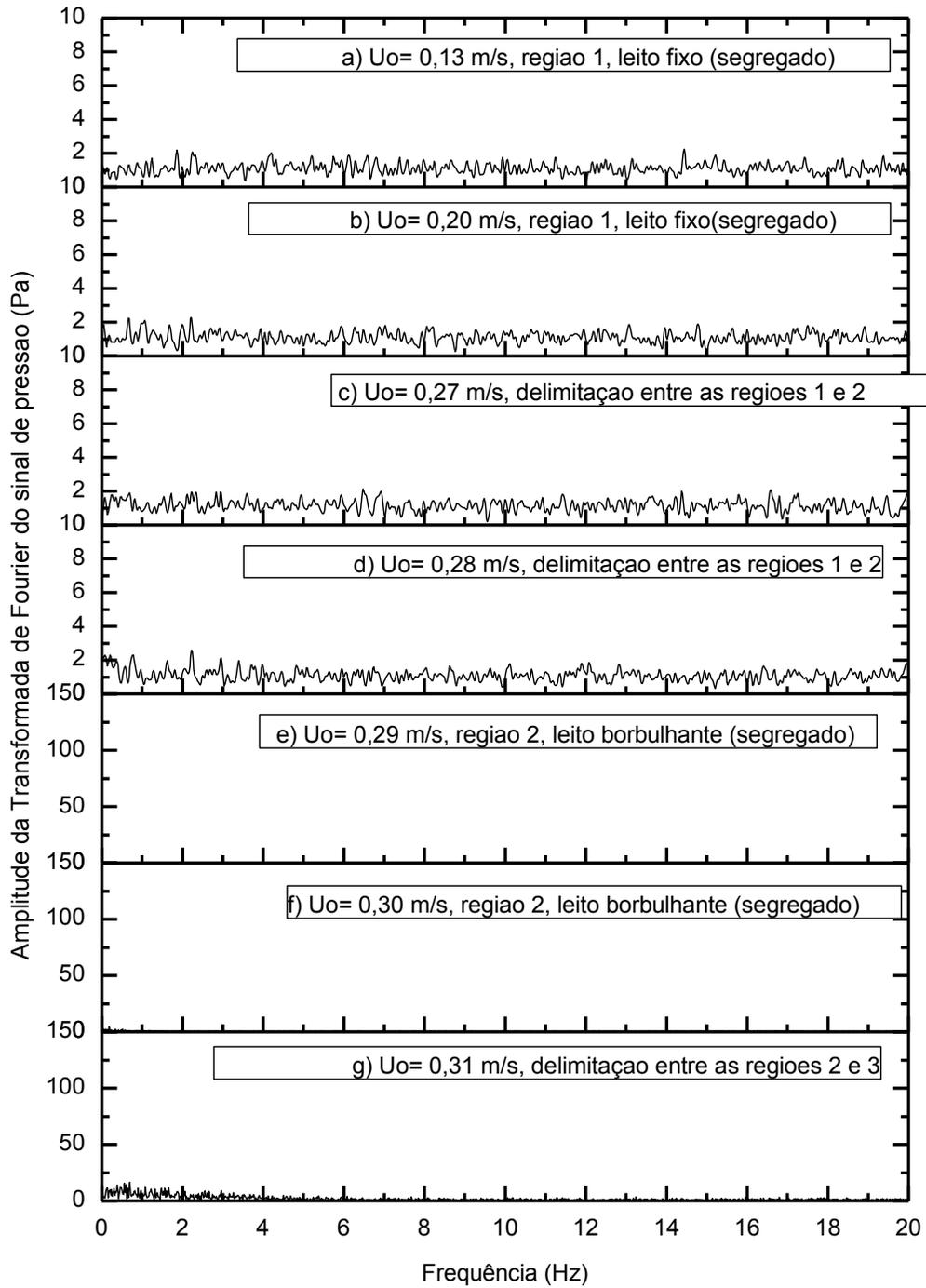


Figura 7.31 - Espectros de amplitude dos sinais de pressão no *plenum* para mistura  $(PL-VF)_1$

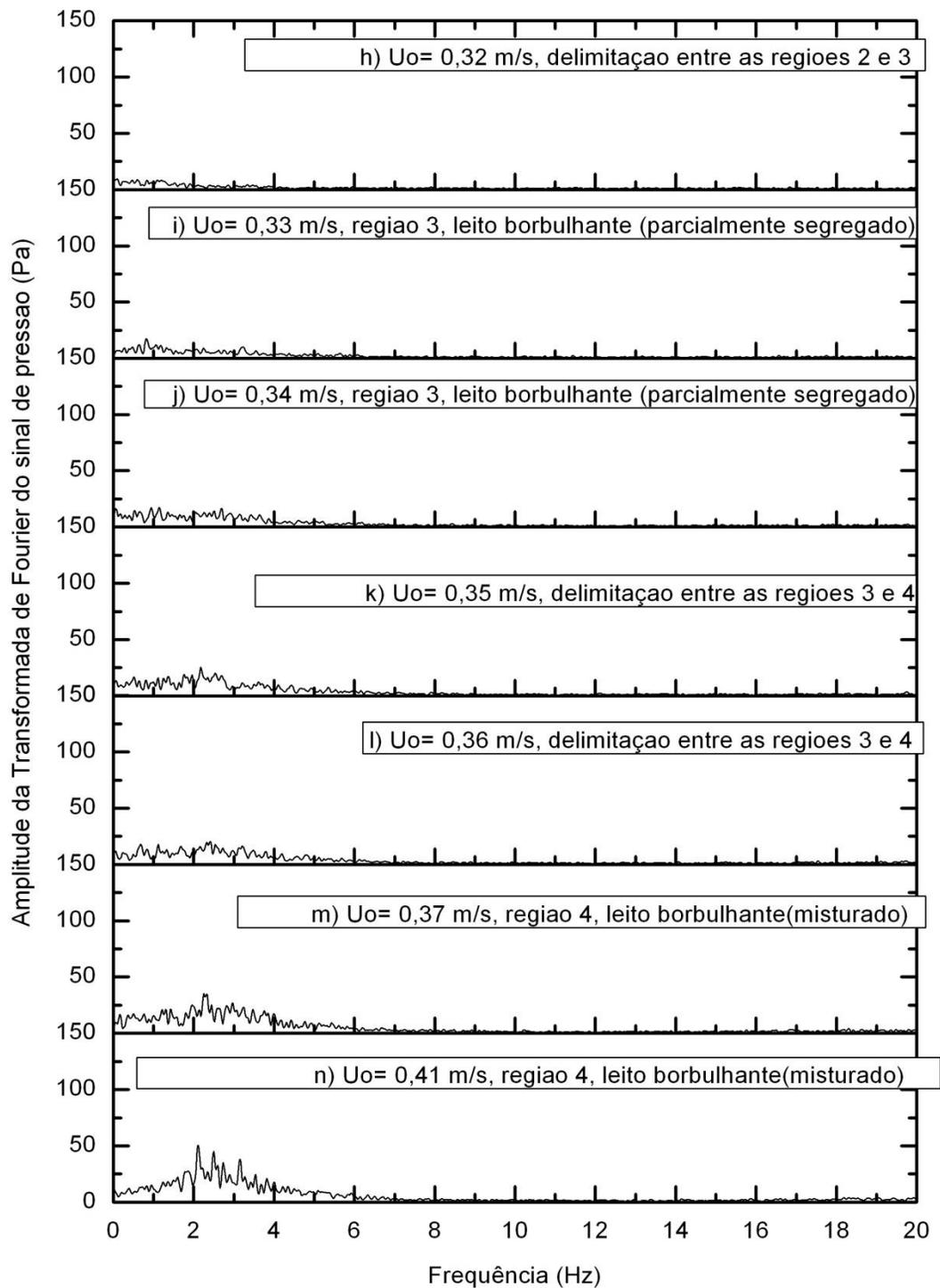


Figura 7.31 (cont.) – Espectros de amplitude dos sinais de pressão no *plenum* para mistura  $(PL-VF)_1$

De forma geral, entre os espectros das Figs. 7.31(a) a 7.31(n) observa-se que, em regime borbulhante, eles possuem valores mais altos de amplitude e banda mais larga de frequência em comparação com o caso do regime de leito fixo, quando todos os espectros não mostram, na mesma faixa, sequer a presença de uma componente dominante. Em regime de leito fixo, as componentes são imperceptíveis já que sua amplitude está na faixa de 0 a 5 Pa. Este comportamento é observado até o espectro da delimitação entre a região 2 e 3, Fig. 7.31(g), isto é, para quando as velocidades superficiais do gás são maiores do que 0,31 m/s. Vale destacar que estes dois materiais tem velocidades de mínima fluidização muito parecidas, sendo de 0,30 m/s para o plástico e de 0,31 m/s para o vidro fino. Em regime de leito borbulhante e independente de cada região, pode-se identificar a componente dominante na faixa da frequência entre 0 e 6 Hz, que aumenta ou diminui sua amplitude com o aumento da velocidade e do comportamento do leito, identificando-se para a região 3 Fig. 7.31(i), uma componente dominante com uma amplitude de 25 Pa. A região 4, Fig. 7.31(n), apresenta uma componente dominante com amplitude de 50 Pa, para a região 2, na faixa do gráfico, não é possível identificar uma componente dominante.

Os espectros de amplitude na delimitação entre a região 1 e 2, Fig. 7.31(d), não apresentam componentes perceptíveis. Na região 2, o espectro não apresenta uma componente dominante evidenciada no gráfico, entretanto, durante os testes foi observada movimentação de plástico no topo do leito por ação do gás.

A delimitação entre as regiões 2 e 3, Fig. 7.31(g), apresenta espectros do teste característicos de leito borbulhante. A amplitude da componente dominante é de 15 Pa e uma frequência identificada em 0,8 Hz.

A delimitação entre as regiões 3 e 4, apresenta um aumento na amplitude da componente dominante em 2,2 Hz com amplitude de 25 Pa, para 50 Pa na região 4, Fig. 7.31(n).

Estas mudanças nas componentes dos espectros são devido ao comportamento do leito, quando bolhas aumentam ou diminuem de tamanho não só pelo aumento da vazão de gás, mas também pela interação das partículas, sendo que as de plástico são maiores e mais leves, enquanto que as de vidro fino são menores e maior densas.

A transição na passagem da fluidização borbulhante para o leito fixo se apresenta de maneira contundente. A diminuição da incidência de bolhas ocasionou uma redução no conteúdo do espectro, bem como o desaparecimento de qualquer frequência dominante além daquela em

0Hz a qual foi previamente removida. A partir do ponto em que realmente não se formaram mais bolhas, a única movimentação percebida foi a vibração das partículas.

De forma geral, os espectros de amplitude dos sinais para o material plástico isolado, apresentados nas Figs 7.32 a 7.44, correspondem aos sinais obtidos acima da placa distribuidora e que apresentam para o regime borbulhante, um espectro com uma distribuição de frequência destacáveis nos primeiros 2 Hz.

No *plenum*, mesmo em regime borbulhante, a intensidade das flutuações de pressão foram insuficientes para atravessarem a placa distribuidora e incidirem sobre esta região, o que ocorre devido principalmente à mais baixa massa específica do plástico.

Por outro lado, sinais característicos do fenômeno do borbulhamento puderam ser mais bem registrados pelos sensores instalados acima da placa distribuidora em  $z_1$  e  $z_2$ .

Para as análises do vidro fino (*VF*), foram avaliados os espectros de amplitude obtidos a partir de uma mesma condição experimental (regime permanente) com os sinais de pressão adquiridos, simultaneamente, em diferentes alturas do leito: *plenum*,  $z_1$  e  $z_2$ .

Em regime borbulhante, os espectros de amplitude possuem valores mais altos de amplitude e conteúdo de frequência que no regime de leito fixo.

Na figura 7.32, nos espectros de amplitude para os materiais isolados (vidro fino e plástico), assim como para a mistura (*PL-VF*) não se identifica componentes perceptíveis na faixa de 0 a 200 Pa, sendo que o comportamento é característico do regime de leito fixo para velocidade superficial do gás de 0,13 m/s.

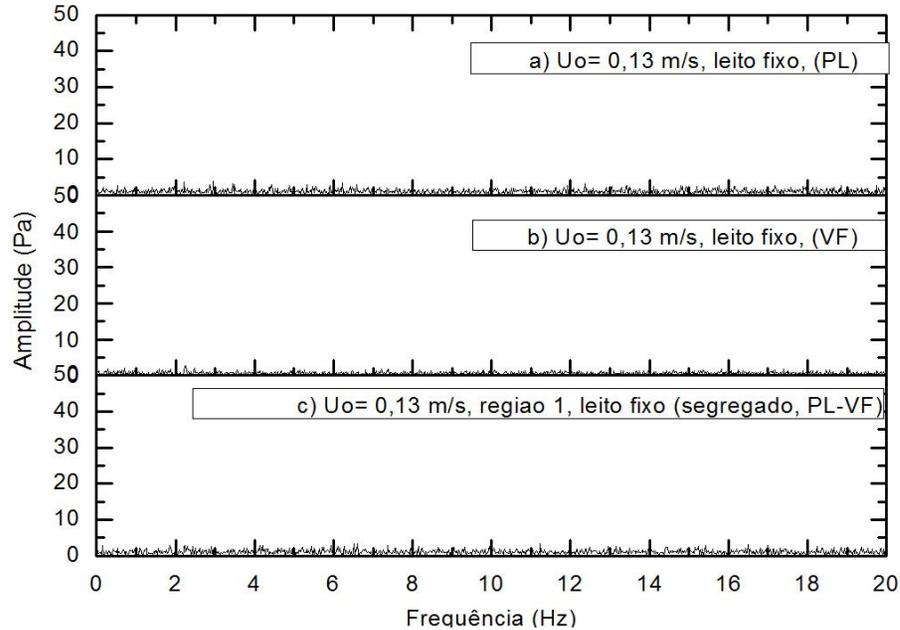


Figura 7.32 – Espectros de amplitude dos sinais no *plenum* para os materiais homogêneos e para a mistura  $(PL- VF)_I$ ,  $U_o = 0,13$  m/s.

Para uma  $U_o = 0,30$  m/s, o vidro fino e o plástico, quando estudados isoladamente, não apresentam componentes perceptíveis em seus espectros de amplitudes na faixa do gráfico de 0 a 30 Pa. Eles apresentaram um estado de transição entre o regime de leito fixo e o leito borbulhante. A mistura apresenta movimento devido à passagem de pequenas bolhas através do material plástico situado no topo do leito. Também o vidro fino está em constante vibração nesta velocidade. No espectro de amplitudes da mistura, identifica-se uma componente dominante em 0,8 Hz de 5 Hz, como pode ser visualizado na Fig. 7.33(c).

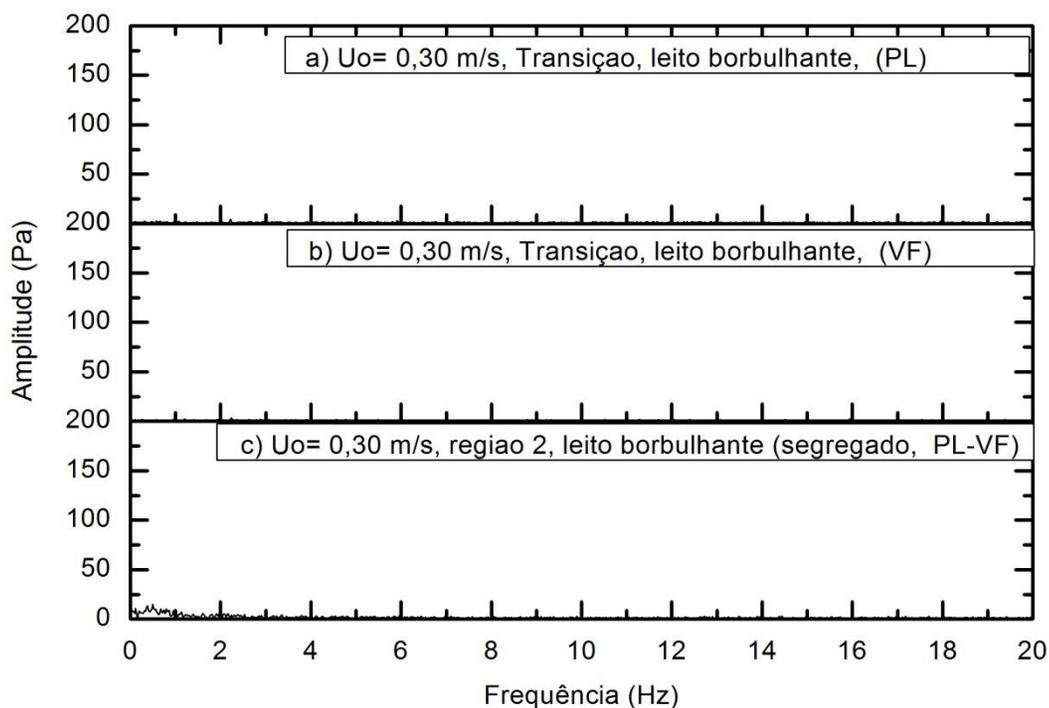


Figura 7.33 – Espectros de amplitude dos sinais no *plenum* para os materiais isolados e para a mistura  $(PL-VF)_1$ :  $U_o = 0,30$  m/s

Na figura 7.34 com  $U_o = 0,33$  m/s, na região 3 da mistura, em (c), o sinal apresenta componente dominante com frequência de 2,2 Hz e 50 Pa de amplitude. Para os materiais isolados em (a) e (b) os espectros são característicos da transição de leito fixo para leito fluidizado.

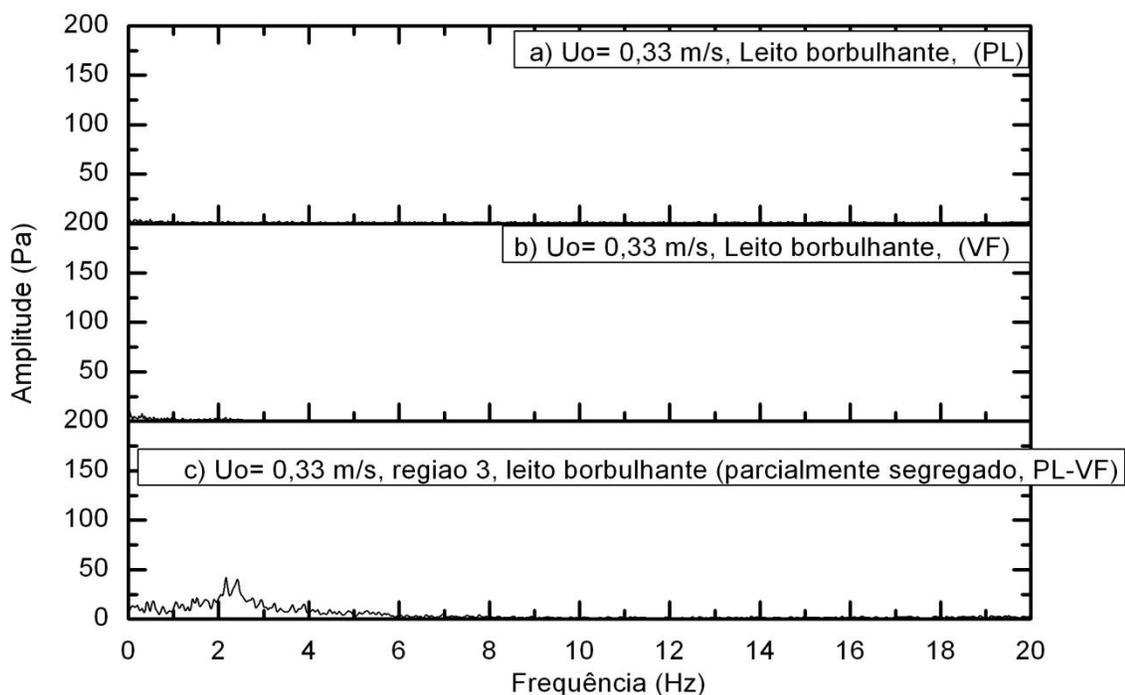


Figura 7.34 – Espectros de amplitude dos sinais no *plenum* com os materiais isolados e com a mistura  $(PL-VF)_1$ :  $U_o=0,33$  m/s

Na figura 7.35 para  $U_o = 0,41$  m/s, o espectro do plástico apresenta um espectro carente de componentes na faixa de 0 a 30 Pa do gráfico, porém foi observado que ele já apresentava um comportamento completamente fluidizado e característico de um leito borbulhante.

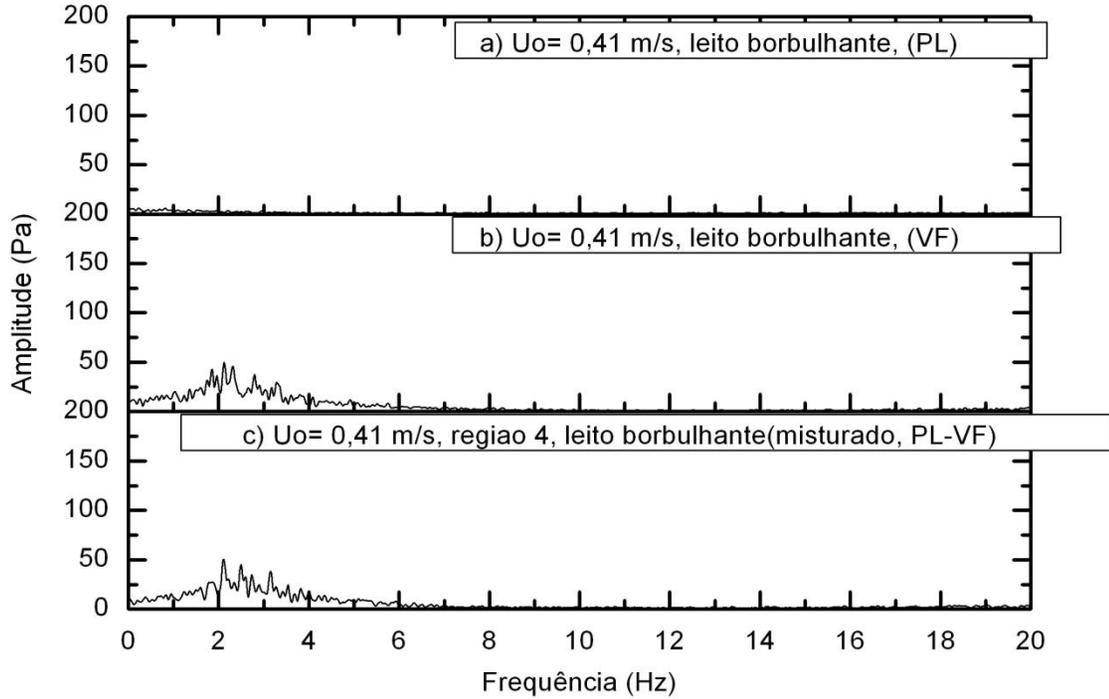


Figura 7.35 – Espectros de amplitude no *plenum* para os materiais isolados e para a mistura (*PL-VF*):  $U_o = 0,41$  m/s

O vidro fino e a mistura apresentam um espectro característico de um leito fluidizado, a mistura apresenta um espectro com uma componente dominante que tem amplitude de 50 Pa, igual que para o vidro fino.

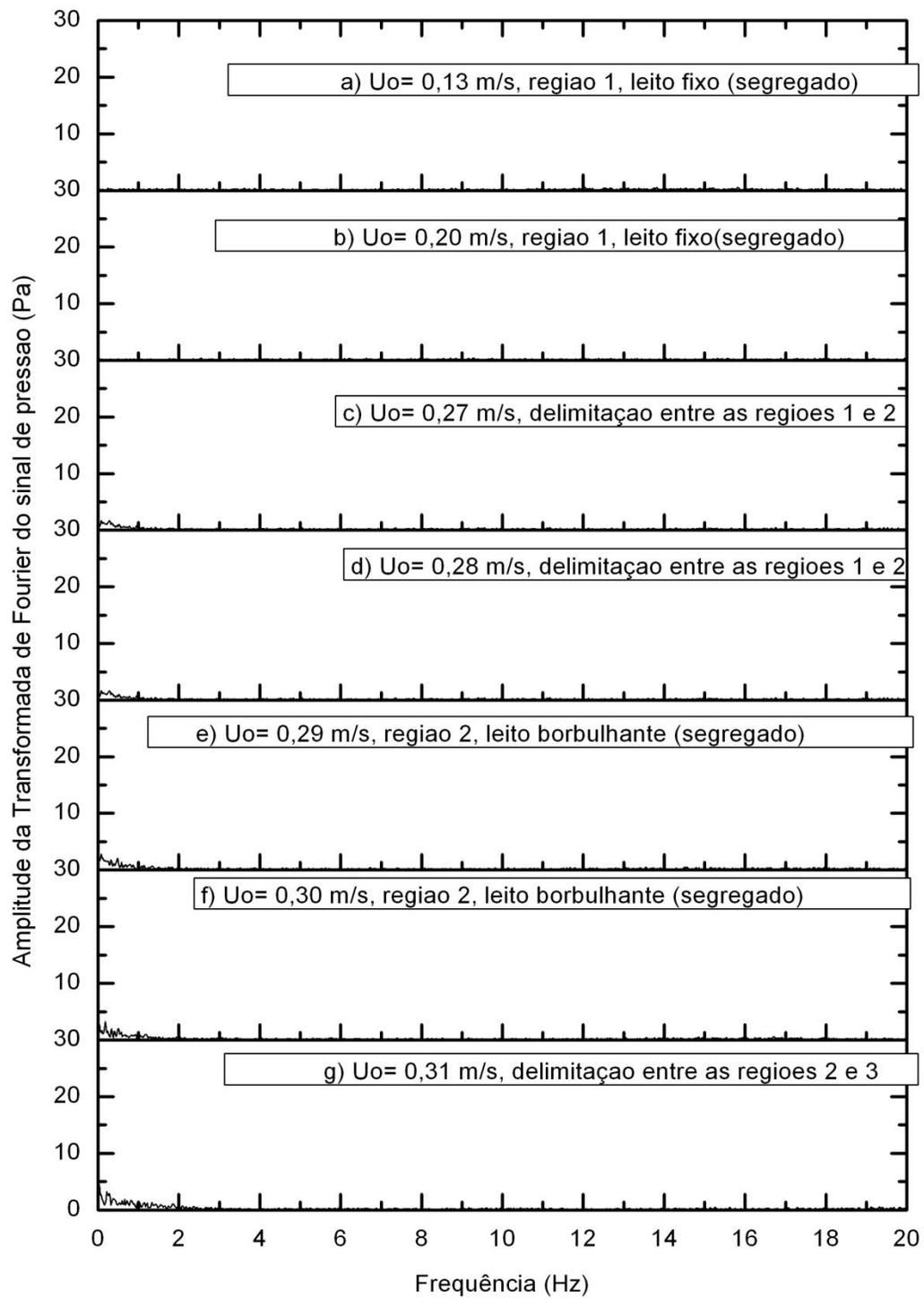


Figura 7.36 – Espectros de amplitude dos sinais de pressão em  $z_1$  para mistura  $(PL-VF)_1$

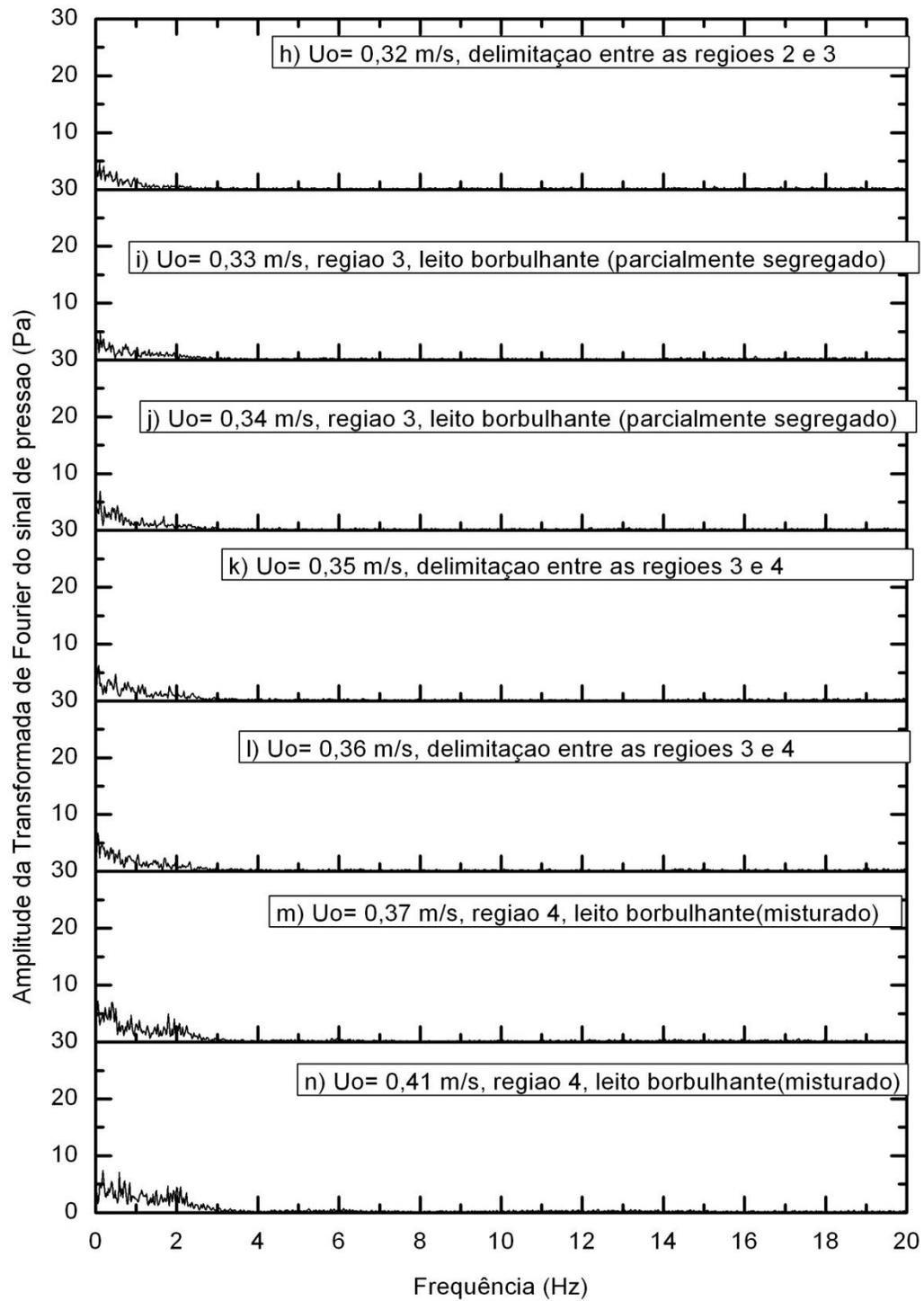


Figura 7.36 (cont.) – Espectros de amplitude dos sinais de pressão em  $z_1$  para a mistura  $(PL-VF)_1$

Comparando-se os espectros de amplitudes da Fig. 7.36 correspondentes aos sinais adquiridas com o transdutor em  $z_1$ , com aqueles espectros dos sinais no *plenum*, Fig. 7.31, se observa que as componentes de frequência mais baixa não estão presentes nos espectros do *plenum*. Isto também foi observado para os espectros dos sinais dos materiais isolado (*VF*, *VG* e *PL*) e para as mistura (*VF-VG*) e (*PL-VG*), como discutido nos itens anteriores.

Os dados obtidos no *plenum* e na posição  $z_1$  forneceram espectros diferentes. O espectro de amplitudes dos sinais no *plenum* destacam-se por apresentar características como banda mais larga de 0 a 8 Hz e amplitudes maiores do que os espectros dos sinais em  $z_1$ .

Para posição  $z_1$ , todos os espectros mostram a presença de componentes da frequência dominante, na faixa de 0 a 3 Hz. com amplitudes que vão de 3 Pa para delimitação entre a região 1 e 2, até os espectros que apresentam a região 4 de leito misturado com 8 Pa.

Os espectros de amplitudes dos sinais em  $z_1$  apresentaram frequências imperceptíveis na região 1, que é uma característica do regime de leito fixo. Este comportamento também foi observado nos espectros do *plenum*.

Na figura 7.37, os espectros correspondem a um comportamento de leito fixo em que estão os materiais isolados e a mistura.

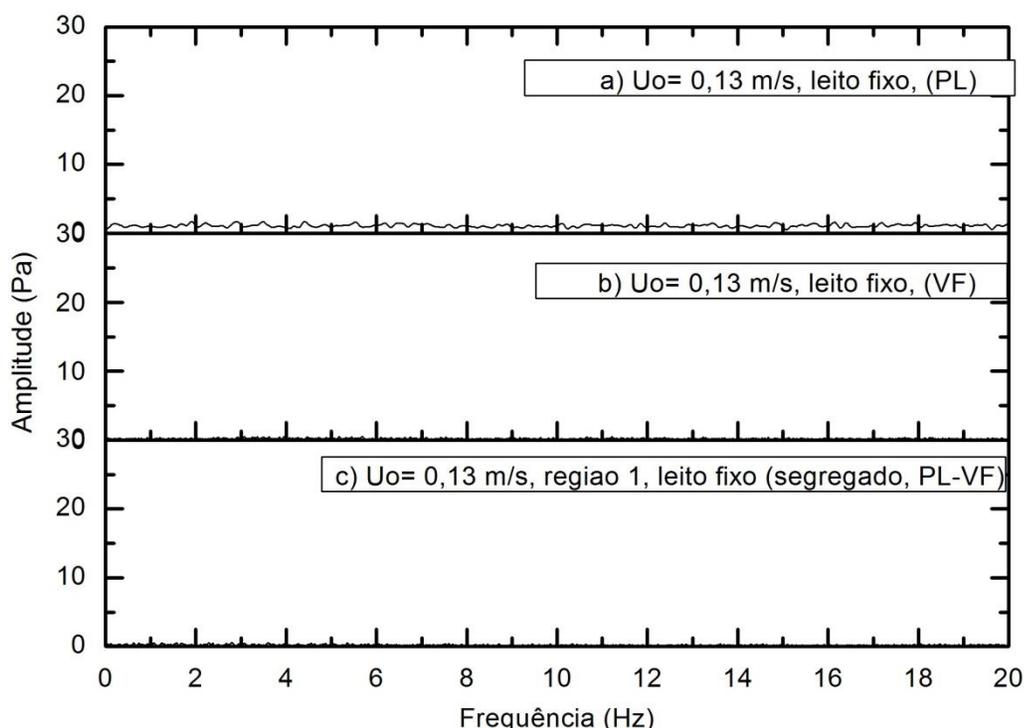


Figura 7.37 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_I$  para os materiais isolados e para a mistura  $(PL-VF)_I$ :  $U_o= 0,13$  m/s

Para a  $U_o = 0,30$  m/s, o plástico apresenta espectro com um componente dominante quase imperceptível na frequência de 0,2 Hz e amplitude de cerca de 1 Pa. Por outro lado, nesta velocidade superficial, os espectros do vidro fino e da mistura são mais espalhados na faixa de 0 a 20 Pa dos gráficos, e apresentam uma componente dominante em 2 Hz, com amplitude de cerca de 3 Pa, identificando-se um comportamento de um leito borbulhante. Isto ocorre na mistura por conta do plástico, com movimento causado pelo gás que passa através do vidro fino.

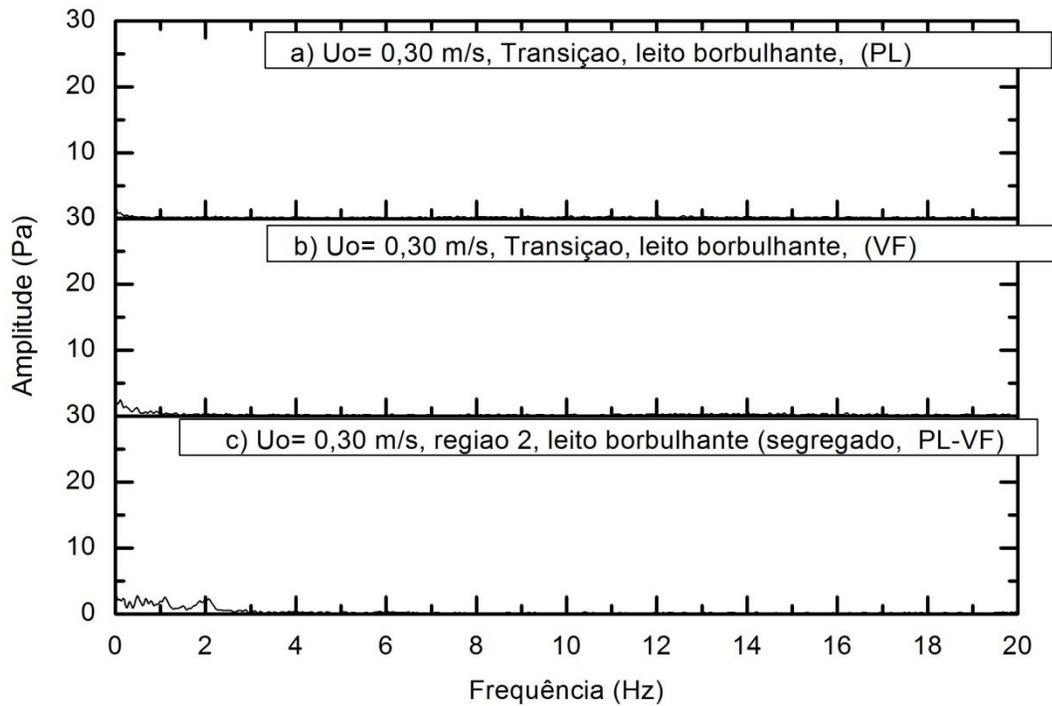


Figura 7.38 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_I$  para os materiais isolados e para a mistura  $(PL-VF)_I$ :  $U_o= 0,30$  m/s

Na figura 7.39 para  $U_o= 0,33$  m/s, em (c) na região 3, a mistura tem uma componente dominante em 0,2 Hz com amplitude de cerca de 5 Pa. O espectro apresenta um comportamento de leito fluidizado com uma faixa onde se pode identificar a banda de frequências de 0 a 4 Hz. O mesmo ocorre tanto com o vidro fino quanto com o plástico, Figs 7.40(b) e 7.40(a). Os dois materiais e a misturas apresentam, portanto, um comportamento característico de leito borbulhante.

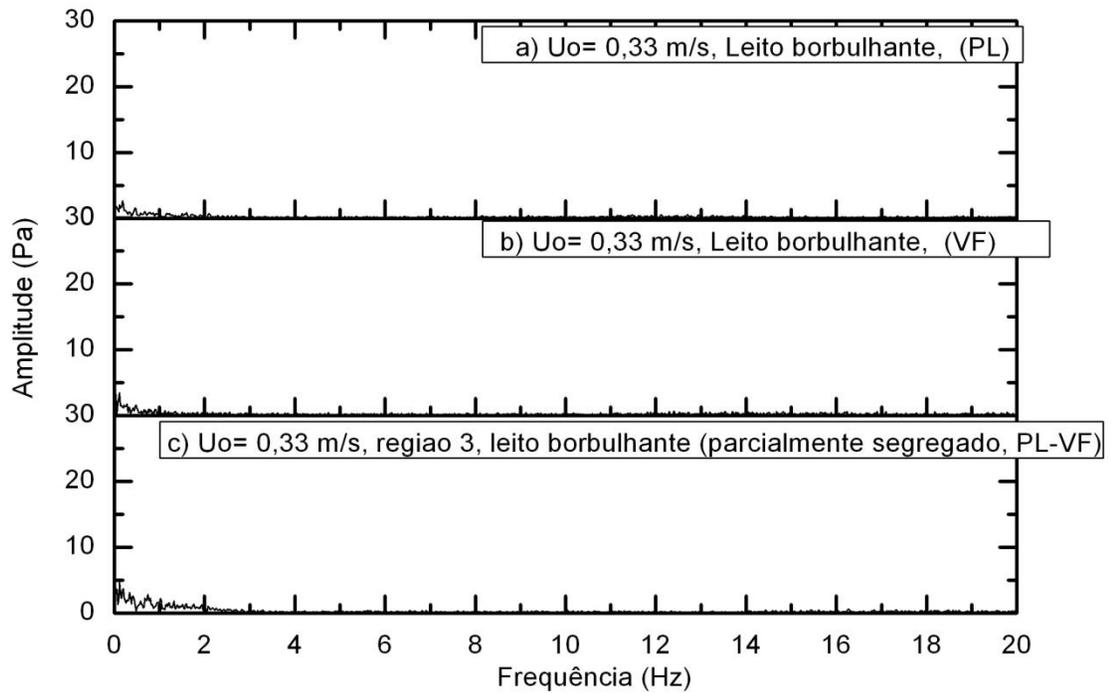


Figura 7.39 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_I$  para os materiais isolados e para a mistura  $(PL-VF)_I$ :  $U_o= 0,33$  m/s

Na Fig. 7.40, o comportamento dos espectros da mistura e do vidro fino apresentam componentes dominantes em 0,2 Hz e amplitudes de 10 Pa. Para o plástico, o espectro corresponde a um leito borbulhante mas a amplitude da componente dominante é menor que para o vidro fino e a mistura com valores de 3 Pa em 0,2Hz.

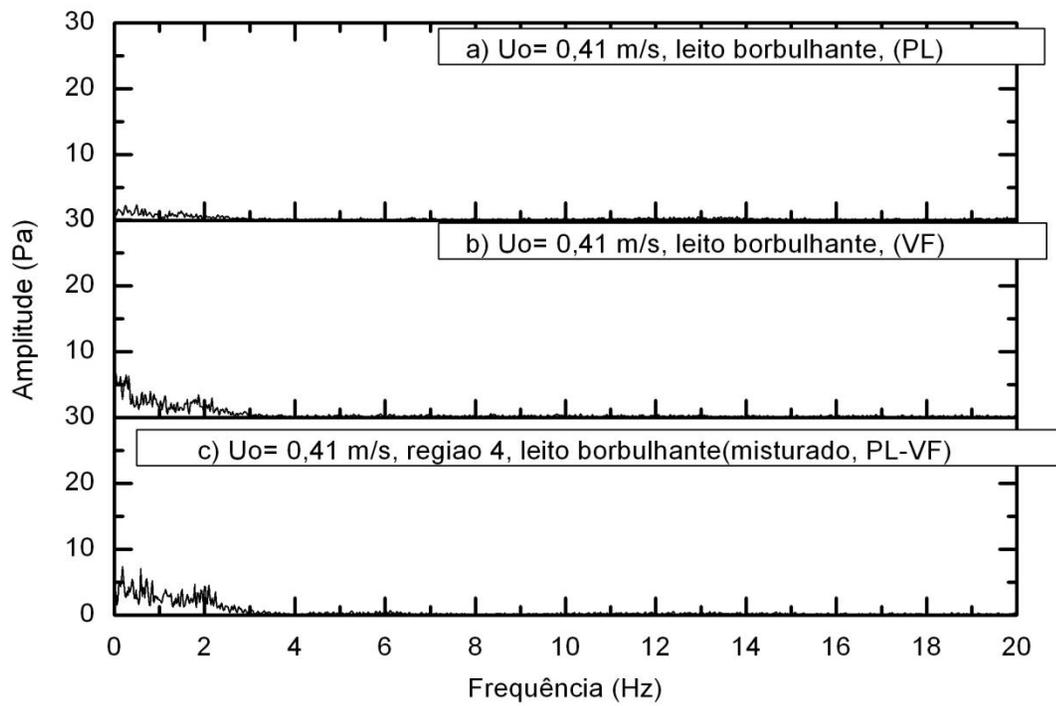


Figura 7.40 - Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_1$  para os materiais isolados e para a mistura (PL-VF)<sub>1</sub>:  $U_o= 0,41$  m/s

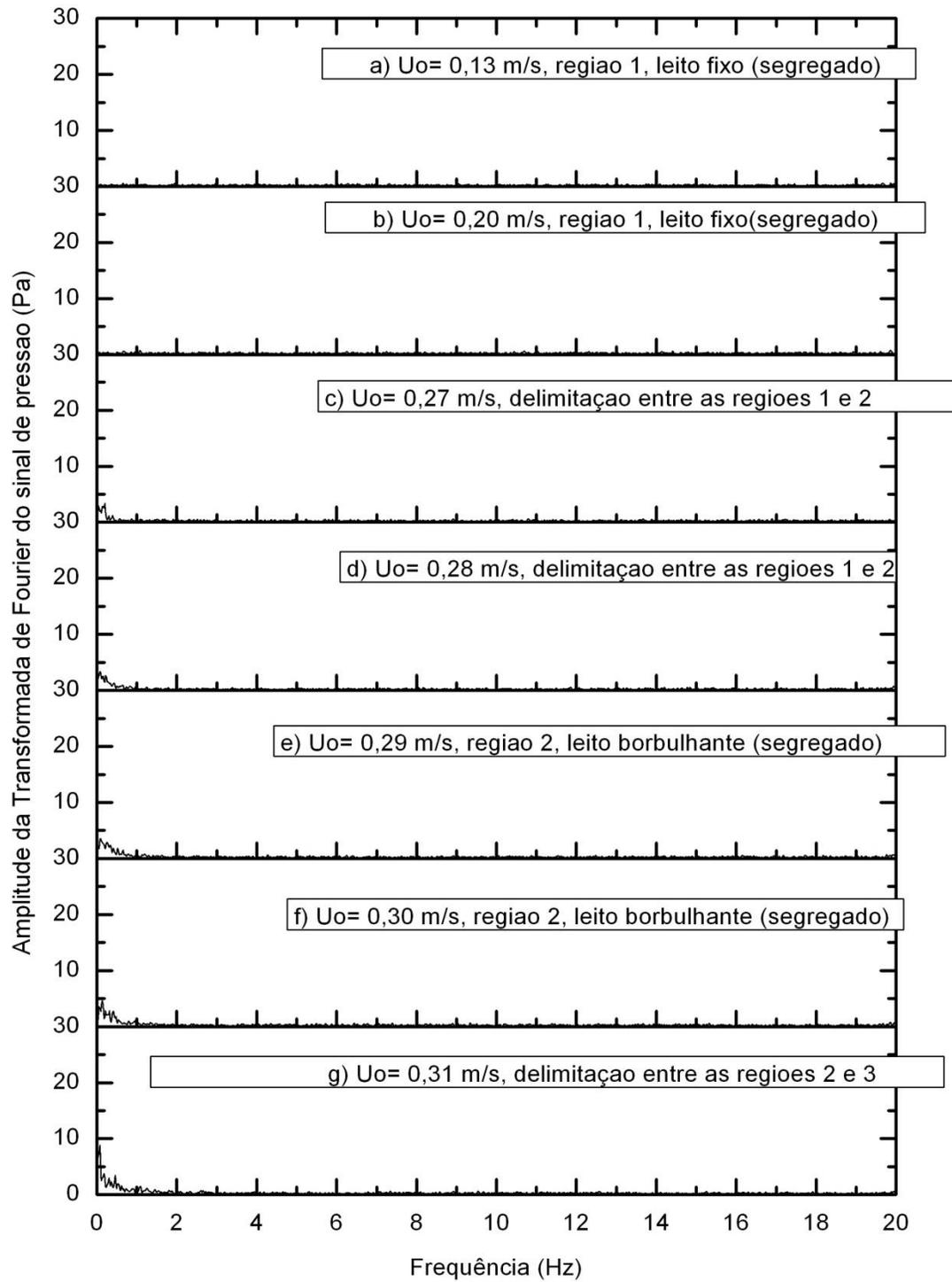


Figura 7.41 – Espectros de amplitude dos sinais de pressão em  $z_2$  para a mistura  $(PL-VF)_1$

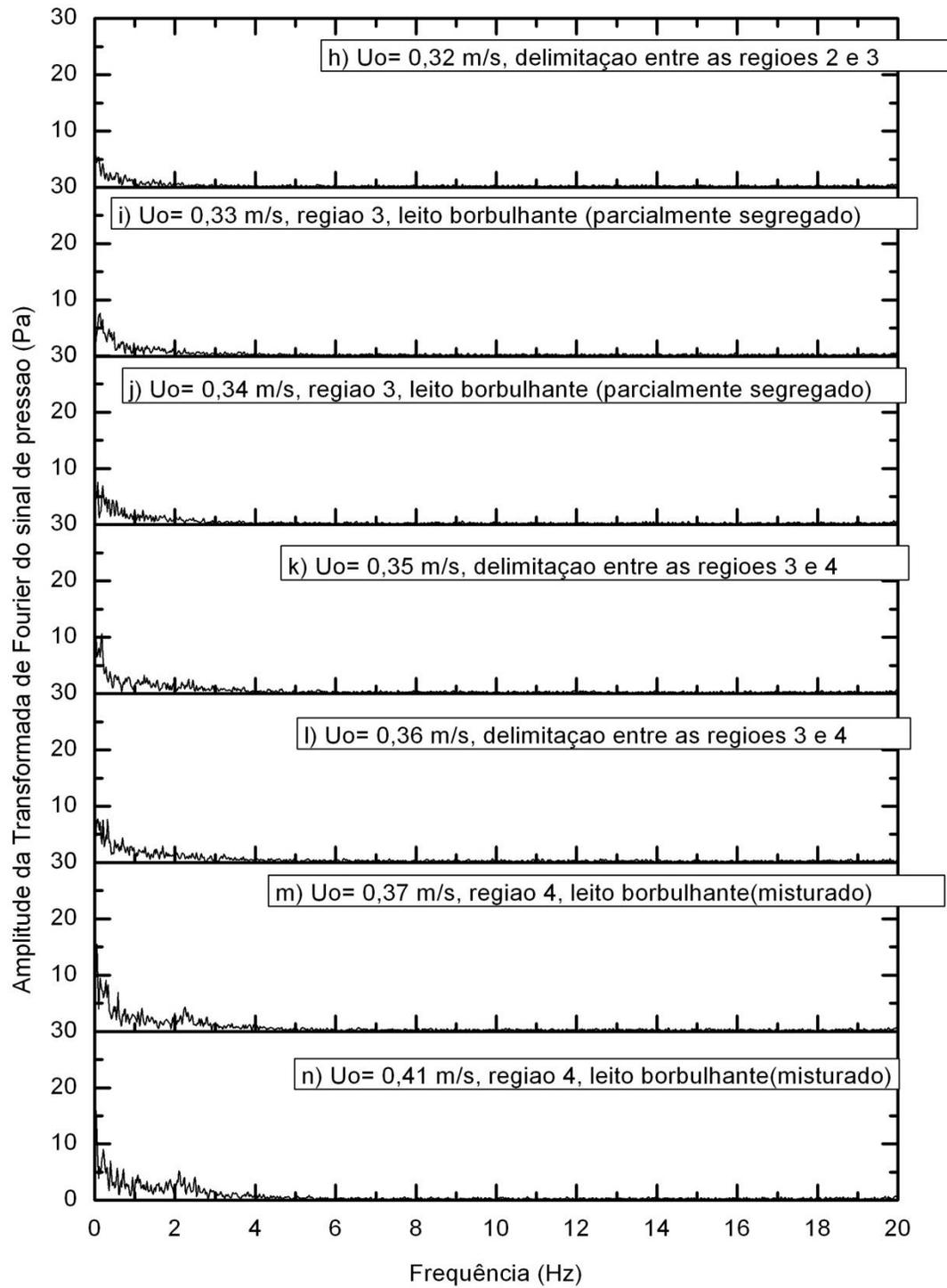


Figura 7.41 (cont.) – Espectros de amplitude dos sinais de pressão em  $z_2$  para a mistura  $(PL-VF)_1$

Da mesma forma que para os espectros de amplitude dos sinais em  $z_1$ , Fig. 7.37, os espectros de amplitudes dos sinais na posição  $z_2$  (Fig. 7.41) são comparados aqueles espectros dos sinais no *plenum*, Fig. 7.32, onde se percebe que as componentes de frequência mais baixa não estão presentes nos espectros do *plenum*. Como analisado anteriormente, isto também foi observado para os espectros dos sinais dos materiais isolado, e para a mistura anteriormente analisada (*PL-VF*).

Os espectros de amplitudes dos sinais em  $z_2$  destacam-se por apresentar componentes dominantes com frequências da ordem de 0,2 Hz.

Os espectros de amplitudes dos sinais em  $z_2$  apresentaram componentes dominantes imperceptíveis na região 1, que é uma característica do regime de leito fixo [Fig. 7.41(b)]. Este comportamento também foi observado nos espectros do  $P_{plenum}$  e  $P_{z1}$ .

As componentes dominantes do processo de fluidização, para cada região estudada, foram identificadas na faixa de 0 a 4 Hz com amplitudes que vão de 5 Pa, para a delimitação entre a região 1 e a região 2, até 10 Pa, na região 4 [Fig. 7.41(n)] onde o leito está misturado. Este comportamento foi também observado nos espectros dos sinais de pressão na posição  $z_1$ .

Na delimitação da região 2 a 3, Fig. 7.41(h), pode encontrar-se uma amplitude na componente dominante de 5 Pa com um aumento na componente dominante do espectro da região 3 com valor de 8 Pa na amplitude.

Na delimitação da região 3 para a região 4 [Fig. 7.41(l)] é evidenciado um aumento na amplitude da componente dominante de 8 Pa para 10 Pa. Este aumento das amplitudes é consequência do aumento da velocidade do ar e consequente aumento do tamanho das bolhas e da velocidade com que sobem ao topo do leito.

Nos espectros de amplitude da Fig. 7.42, todos os espectros de amplitudes correspondentes ao regime de leito fixo.

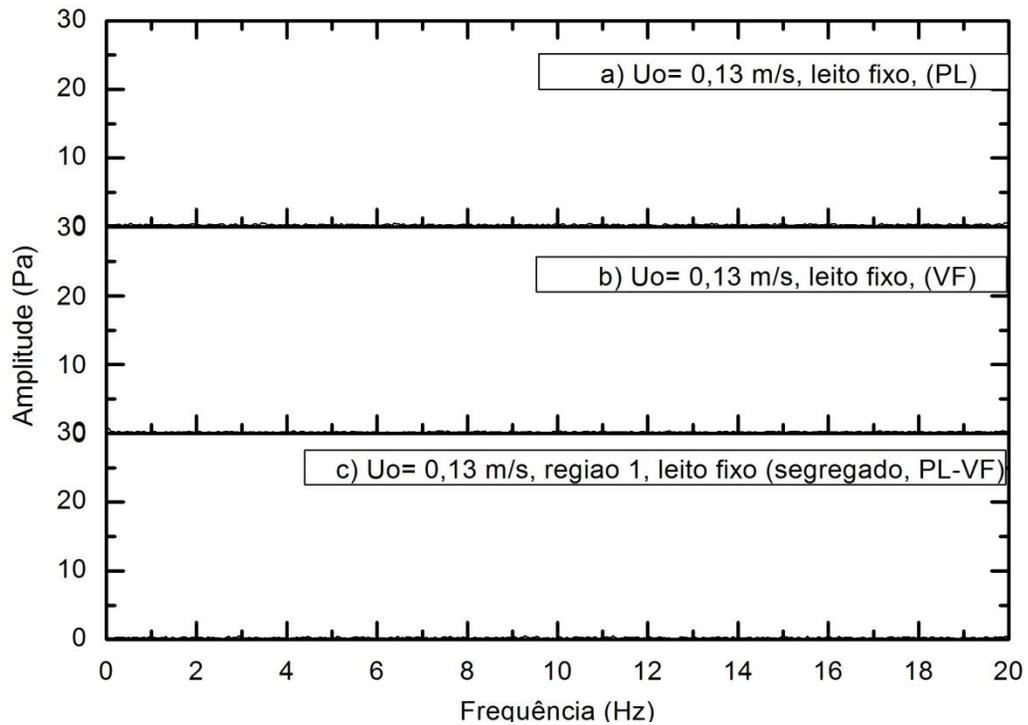


Figura 7.42 - Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  para os materiais isolados e para a mistura (PL-VF):  $U_0 = 0,13$  m/s

Na figura 7.43, os espectros de amplitudes do vidro fino e do plástico apresentam componente dominante de baixa frequência da ordem de 0,2 Hz ou menos, porém, com banda de 0 a menos de 1 Hz, enquanto a mistura esta num estado de leito parcialmente fluidizado com movimentação das partículas de plástico. A componente dominante é identificada em 0,2 Hz e tem uma amplitude de 5 Pa e banda de 0 a 3 Hz

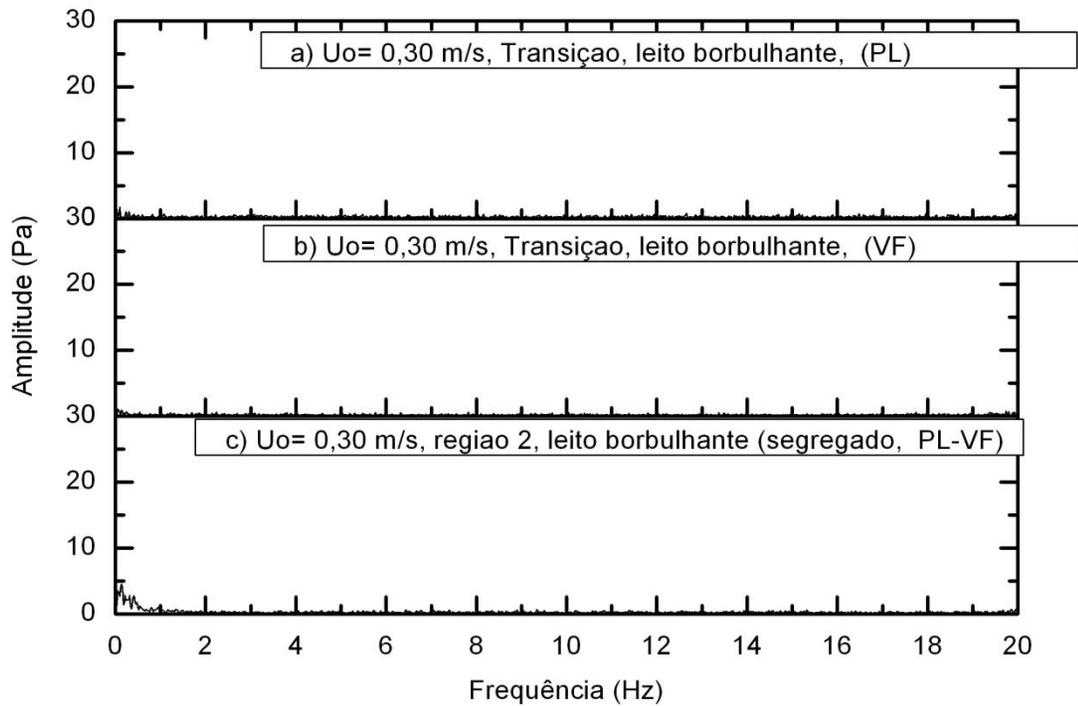


Figura 7.43 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  para os materiais isolados e para a mistura  $(PL-VF)_1$ :  $U_o= 0,30$  m/s

A figura 7.44(b) apresenta o espectro de amplitudes correspondente ao vidro fino que tem sua componente dominante de 3 Pa de amplitude, e para a mistura Fig. 7.44(b) a componente dominante tem uma amplitude de 7 Pa. e 9 Pa. Na faixa do eixo vertical dos gráficos, as bandas também são distintas entre o plástico e os outros dois. Fica evidente entre as Figs 7.44 e 7.45 que o aumento da velocidade superficial  $U_o$  causa expansão da banda de frequência dos sinais de pressão em  $z_2$  assim como em  $z_1$ .

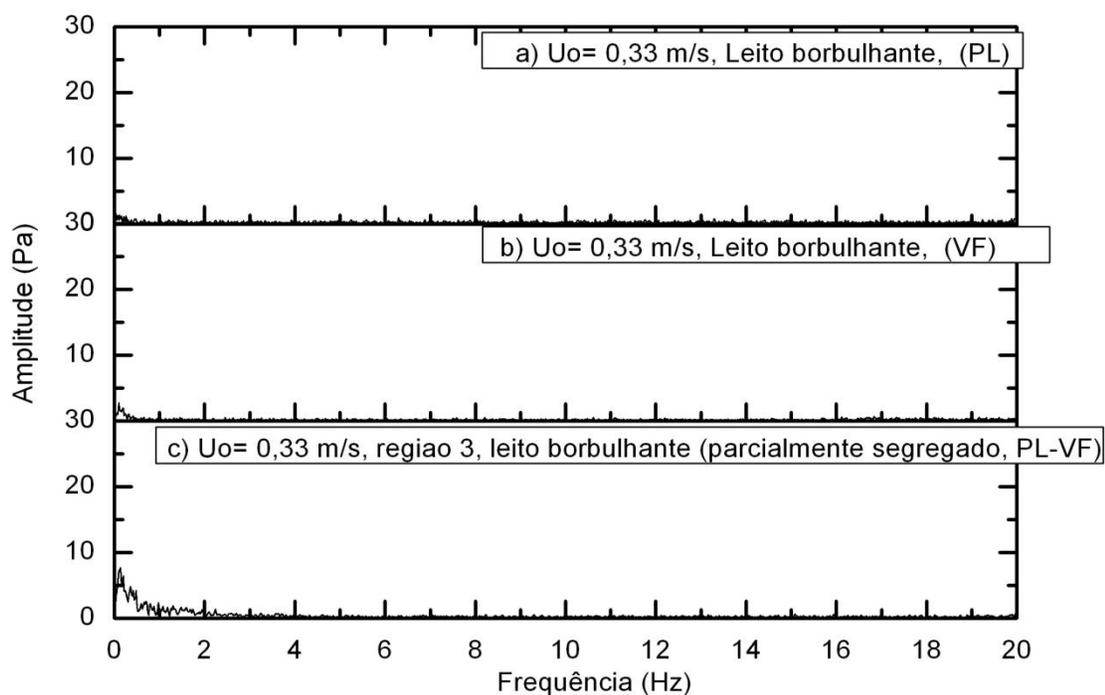


Figura 7.44 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  para os materiais isolados e para a mistura  $(PL-VF)_1$ :  $U_o= 0,33$  m/s

Nas figuras 7.44 e 7.45 pode-se observar que a componente dominante para os espectros dos materiais isolados e da mistura esta em uma frequência de 0,2 Hz.

A largura da banda de frequências é maior na mistura por causa da interação de vidro fino com o plástico aumentando a quantidade de bolhas e diminuindo o tamanho delas.

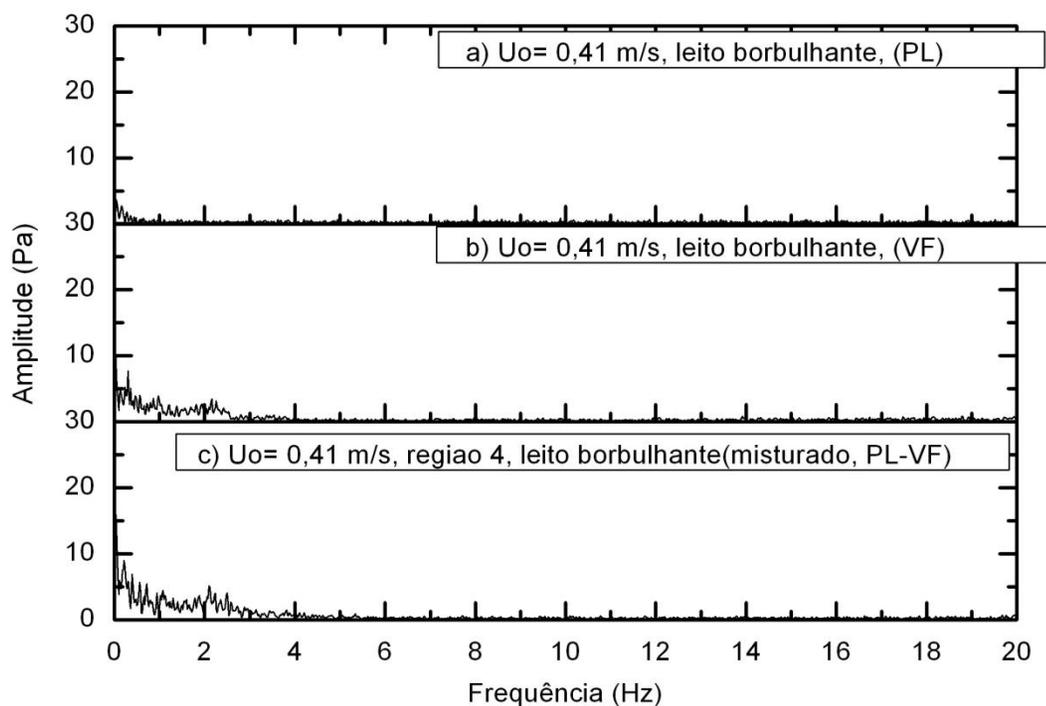


Figura 7.45 – Espectros de amplitude dos sinais na posição  $z_2$  para os materiais isolados e para a mistura  $(PL-VF)_1$ :  $U_o=0,41$  m/s

Os dados obtidos no *plenum* e na posição  $z_1$  e  $z_2$  forneceram espectros diferentes. Os espectros de amplitudes dos sinais no *plenum* destacam-se por apresentar características como banda mais larga e amplitudes maiores do que os espectros dos sinais em  $z_1$  e  $z_2$ . Além disso, verifica-se a presença de uma componente dominante no *plenum* com amplitude de 60 Pa em cerca de 2 Hz, no regime borbulhante ( $U_o = 0,41$  m/s), que é maior que as amplitudes da frequência dominante obtidas nas posições  $z_1$  e  $z_2$ , que foram de cerca de 10 e 15 Pa, respectivamente, em cerca de 0,2 Hz.

Os três transdutores permitiram captar impressões do regime de operação do leito, apresentando espectros com faixa de frequência estreita de 0 a 3 Hz, sendo que, em torno de 2 Hz, ocorre a frequência dominante para os sinais no *plenum* ( $P_{plenum}$ ) e em 0,2 Hz para os sinais em  $z_1$  e  $z_2$ . Na faixa de 0 a 20 Hz, todos os espectros mostram a presença de componentes de mais alta frequência porém, de baixa amplitude. Segundo Johnsson *et al.* (2000) e Sasic *et al.* (2007), para se determinar as frequências dominantes, uma taxa de amostragem de 20 Hz é considerada suficiente. Em leito fluidizado, a frequência máxima do sinal geralmente é inferior a 10 Hz.

Na transição entre o regime de leito fixo e borbulhante, tornam-se evidentes determinadas componentes de mais baixa frequência, abaixo de 1 Hz.

Em regime borbulhante, os espectros dos sinais registrados entre as três posições são distintos pela presença mais ou menos acentuada de componentes de mais baixa frequência abaixo de 1 Hz. Estes componentes praticamente inexistem nos espectros dos sinais do *plenum*, enquanto que nos sinais registrados em  $z_2$  elas são bem acentuadas e se destacam entre as outras, mostrando que os sinais adquiridos não são semelhantes e que componentes de mais baixa frequência aparecem quando os sinais são adquiridos mais próximo da interface do leito. Portanto, a placa distribuidora, ou mesmo a região inferior do próprio leito de partículas, parecem operar como um filtro passa altas eliminando as componentes de mais baixa frequência abaixo de 1 Hz.

A transição entre os dois regimes foi atingida ao se diminuir a velocidade do gás. Daí, a passagem do regime borbulhante para o leito fixo, no que tange à aparência do leito, sucedeu com uma gradual diminuição do tamanho das bolhas de fluido, além da diminuição da expansão do leito.

Os espectros de amplitudes analisados para o plástico e o vidro finos vão ser apresentados em conjunto com a mistura para sua comparação.

#### 7.4. Análise geral dos sinais de pressão no domínio da frequência

Para cada mistura estudada, os espectros de amplitude dos sinais de pressão, apresentados para as 14 velocidades do gás selecionadas, mostraram comportamentos diferentes, assim como houve variação entre os espectros de amplitudes correspondentes às diferentes posições onde foram adquiridos os dados (*plenum*,  $z_1$  e  $z_2$ ).

Ao longo dos testes com velocidade superficial decrescente de ar (processo de defluidização), foi possível detectar os regimes de leito borbulhante e de leito fixo, além da determinação das regiões características do fenômeno de segregação (leito misturado, leito parcialmente segregado e leito totalmente segregado). Em cada uma dessas regiões foi possível identificar as características das componentes dominantes e a mudança na amplitude do espectro em função da redução da velocidade superficial do gás.

Os espectros dos sinais sob regime de leito fixo apresentaram uma distribuição com baixas amplitudes (0 a 2 Pa) com ausência de uma componente dominante, sugerindo que as flutuações de pressão ocorreram por causa de vibrações produzidas pelo escoamento de ar através dos interstícios entre as partículas que compõem o leito, o que também foi reportado por Bendat e Piersol (1980) e por Felipe (2004).

Em regime de fluidização borbulhante, para as três misturas testadas, foram observados comportamentos de borbulhamento marcado pela formação de bolhas de diferentes tamanhos e velocidades ascendentes. Foi observado um comportamento de leito parcialmente fluidizado nas regiões 2 e 3 onde as partículas menores e mais leves apresentam maior movimentação do que as partículas mais pesadas ou maiores.

Todos os espectros apresentados foram obtidos em condições fluidodinâmicas de regimes de contato plenamente estabelecidos conforme as observações realizadas.

A realização de três repetições para cada mistura ensaiada mostrou que os resultados obtidos apresentaram repetitividade.

Nos espectros de amplitudes dos sinais de pressão para o *plenum* é possível verificar diferenças nas amplitudes das componentes dominantes na passagem da região 2 para a região 3 e na passagem da região 3 para a região 4. Essas diferenças também podem ser identificadas nos

espectros dos sinais nas posições  $z_1$  e  $z_2$ , entretanto as variações são menores, exigindo instrumentos mais precisos, o que torna mais difícil a identificação do início da segregação.

As respostas relativas ao leito fixo foram similares em todas as misturas, quando se identificou apenas algumas vibrações de partículas, entretanto, sem qualquer frequência dominante no espectro.

Com a técnica de análise do domínio da frequência, foi demonstrado por meio dos resultados obtidos que a metodologia apresenta potencial para o estudo da fluidodinâmica de misturas binárias. Também foi possível identificar mudanças nas componentes dominantes de cada região inerente ao fenômeno de segregação. Entretanto, para a mistura de *PL-VF* não foi possível identificar o início da segregação pelo método de análises no domínio da frequência.

Diferenças, às vezes sutis no comportamento da fluidização, podem determinar uma mudança no regime de contato gás-sólido, os quais foram identificados através de alterações nos espectros de amplitude dos sinais de flutuação de pressão.

As figuras 7.46 a 7.56 mostram a evolução da amplitude da componente dominante em função da velocidade superficial do gás.

Por outro lado, no domínio da frequência, os gráficos do item 7.4 mostram a evolução da amplitude da componente dominante em função da velocidade superficial, a qual se manteve em 1,8 Hz entre os espectros de *VF-VG* e em 2,2 Hz entre os espectros de *PL-VG* e *PL-VF*. Tal fato indica que a frequência da componente dominante depende mais fortemente da posição da tomada de pressão e de outros parâmetros (provavelmente do tipo da placa distribuidora, diâmetro do leito, temperatura e pressão) do que dos materiais em si. Esse fato também foi constatado através de análise dos espectros dos sinais para os materiais isolados, sendo que, a amplitude da componente dominante, obtida no *plenum*, ocorreu ao redor de 2 Hz para o *VF* e ao redor de 1,8 Hz para o *VG*.

A seguir, são apresentados gráficos com as amplitudes correspondentes a cada componente dominante dos espectros de amplitudes calculados para a mistura (*VF-VG*).

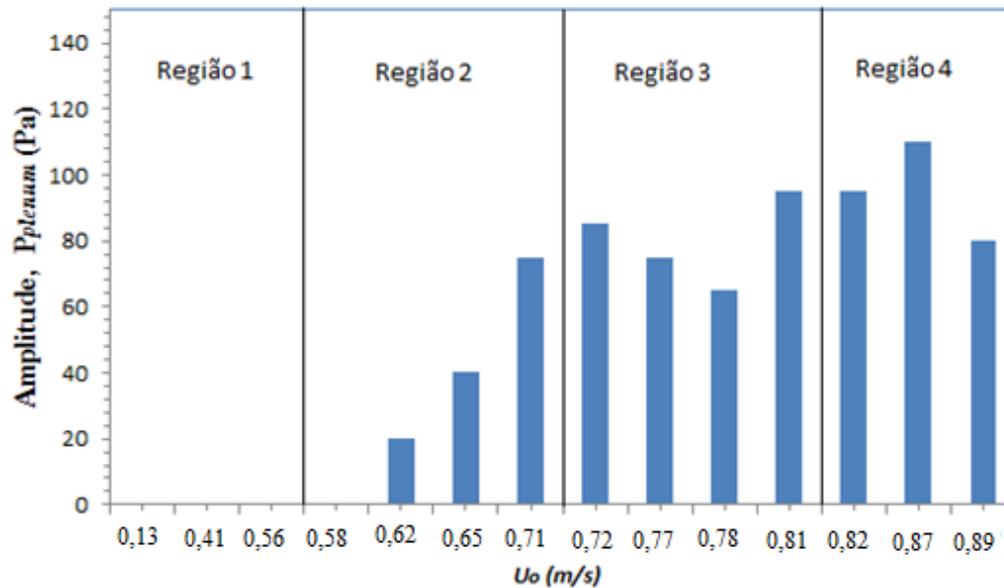


Figura 7.46 - Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes no *plenum*, para a frequência de 1,8 Hz, na mistura (VF-VG)<sub>1</sub>

Na figura 7.46 é possível verificar a variação das componentes dominantes dos espectros em cada região com comportamento fluidodinâmico diferente. Nota-se o aumento da amplitude destas componentes em função da velocidade superficial do gás,  $U_0$ , o que poderia apontar a delimitação entre as regiões 2 e 3, porém, o mesmo não ocorre entre as regiões 3 e 4.

As figuras 7.47 e 7.48 apresentam as amplitudes das componentes dominantes dos espectros de amplitude medidos em  $z_1$  e em  $z_2$ , correspondentes à quatorze velocidades do gás selecionadas nas análises no domínio do tempo. Estas componentes foram identificadas em 1,8 Hz.

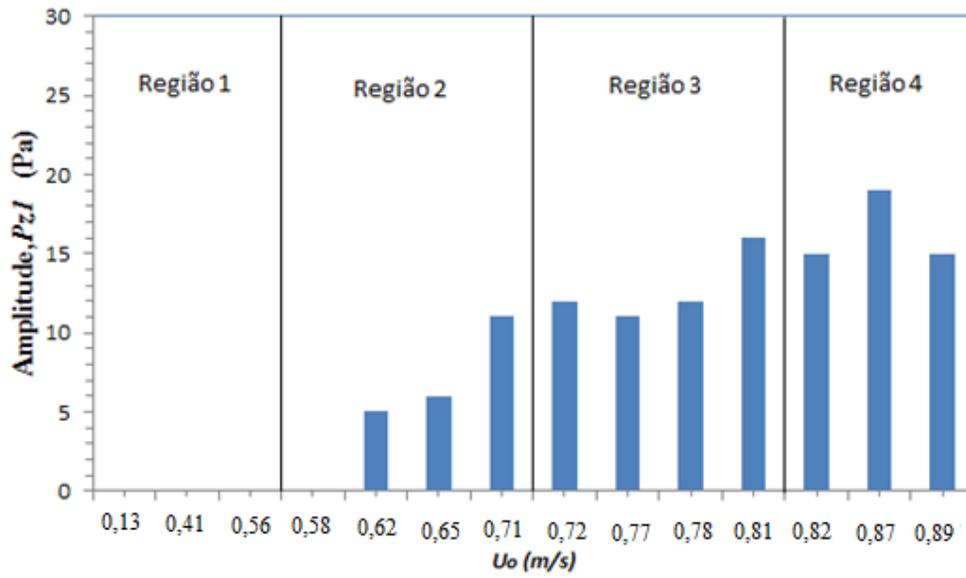


Figura 7.47 - Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes em  $z_I$ , para a frequência de 1,8 Hz, na mistura  $(VF-VG)_I$

Nas figuras 7.46 e 7.47 também se verifica que as amplitudes das componentes dominantes são maiores nas delimitações das regiões,

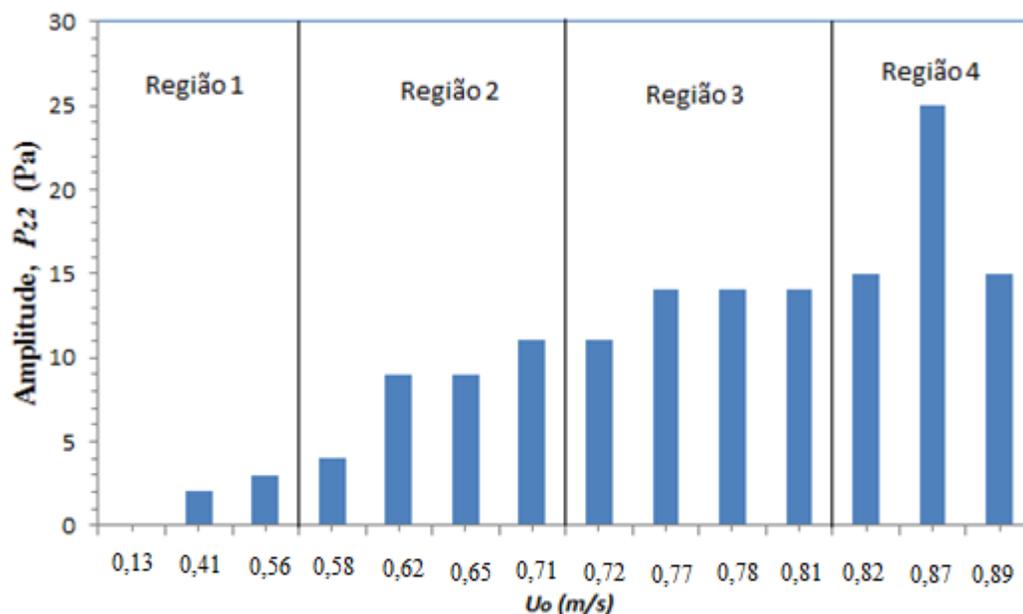


Figura 7.48 - Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes em  $z_2$ , para a frequência de 1.8 Hz, na mistura  $(VF-VG)_1$

Também na figura 7.48 identifica-se o aumento da amplitude das componentes dominantes que podem mostrar as delimitações das regiões assim como na Fig. 7.46.

Nas figuras 7.49 e 7.50 são apresentadas as figuras para a mistura  $(PL-VG)$ . Assim como para a mistura  $(VF-VG)$ , as amplitudes das componentes dominantes dos espectros em função da velocidade superficial do gás são apresentadas e correspondem aos dados analisados para cada transdutor. Nas figuras pode-se ver a mudança de amplitude das componentes dominantes de cada espectro no transcorrer do processo, podendo-se identificar mudanças de amplitude correspondentes às delimitações das regiões.

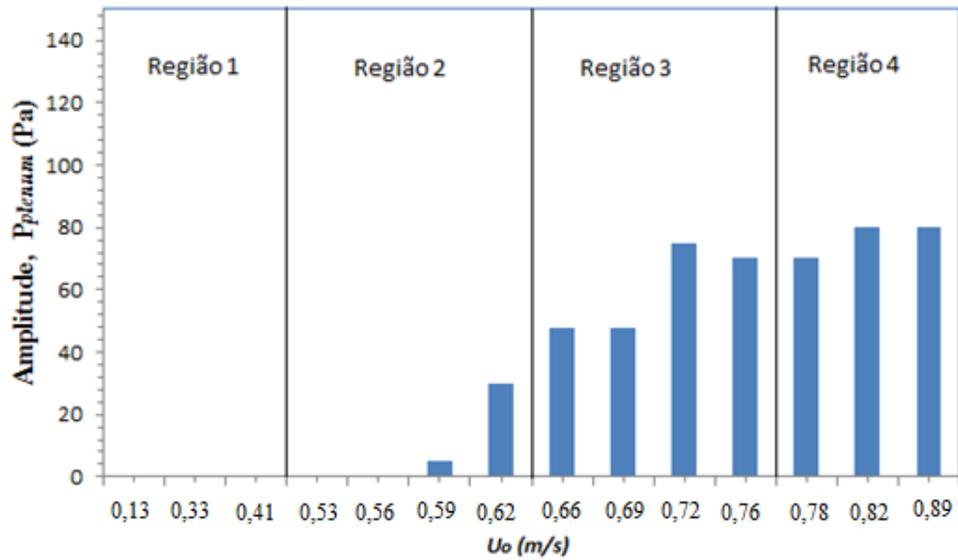


Figura 7.49 Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes no *plenum*, para a frequência de 2.2 Hz, na mistura (PL-VG)<sub>1</sub>

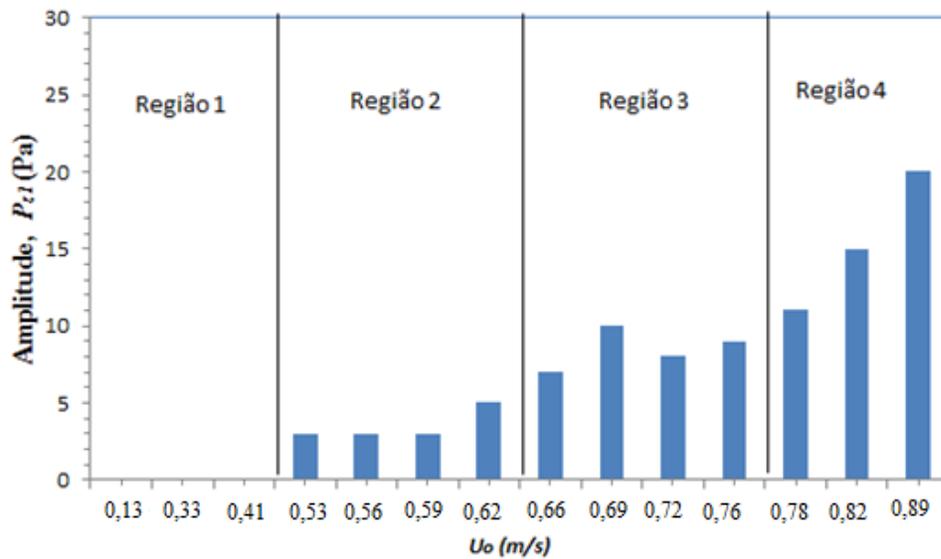


Figura 7.50 - Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes em  $z_1$ , para a frequência de 2,2 Hz, na mistura (PL-VG)<sub>1</sub>

Nas figuras 7.51 a 7.53 são apresentadas os resultados para a mistura (*PL-VF*). Assim como para a mistura (*VF-VG*) e (*PL-VG*), as amplitudes das componentes dominantes dos espectros em função da velocidade superficial do gás são apresentadas. Estas figuras correspondem aos dados analisados para cada transdutor estudado.

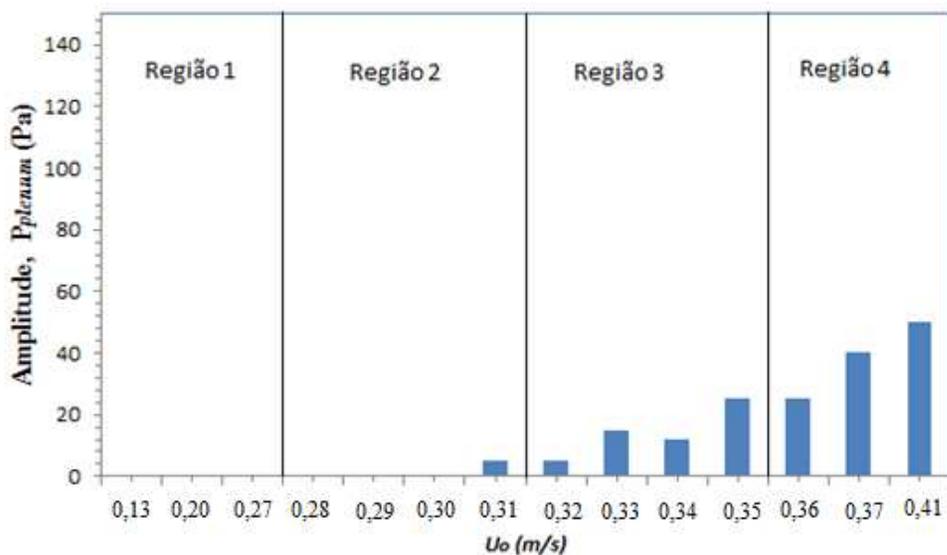


Figura 7.51 - Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes no *plenum*, para a frequência de 2,2 Hz, na mistura (*PL-VF*)<sub>1</sub>

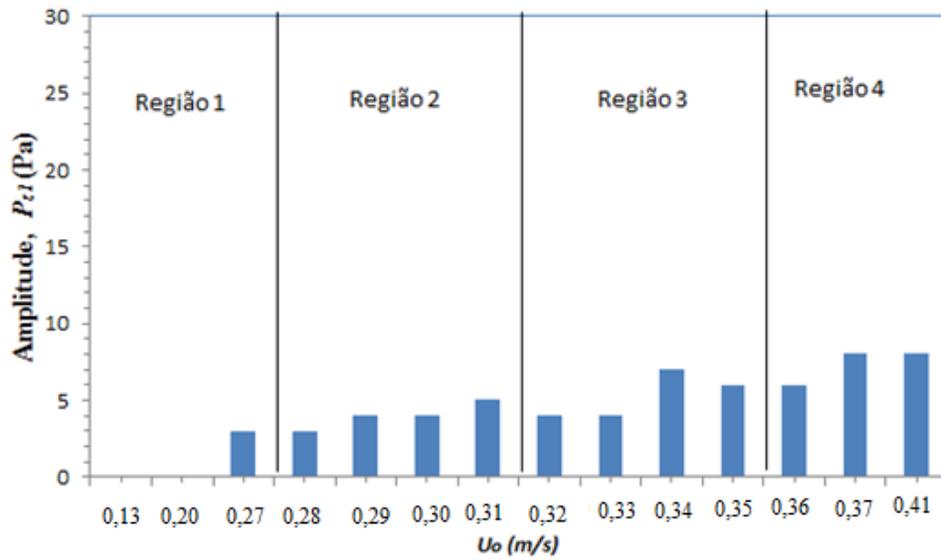


Figura 7.52 - Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes em  $z_1$ , para a frequência de 2,2 Hz, na mistura  $(PL-VF)_I$

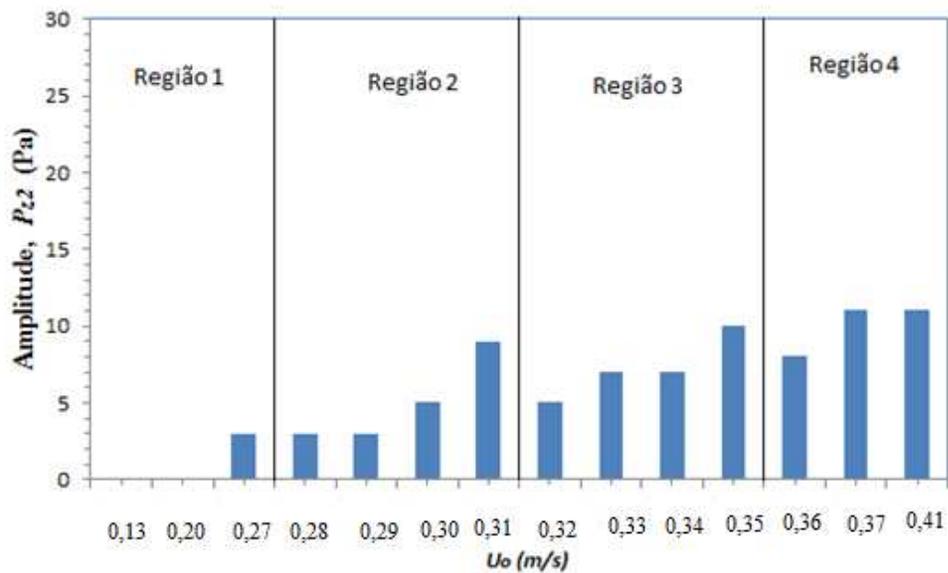


Figura 7.53 - Variação da amplitude da componente dominante do espectro de amplitudes em  $z_2$ , para a frequência de 2,2 Hz, na mistura  $(PL-VF)_I$

A mistura de *PL-VF*, composta por materiais de diferentes diâmetros e diferentes massas específicas, não forneceu resultados satisfatórios na identificação das regiões com este método de análise. Em algumas figuras como a Fig. 7.53 é possível identificar variações nas amplitudes das componentes dominantes das delimitações das regiões, mas para as Figs 7.51 e 7.52 a identificação é mais difícil.

Nas figuras apresentadas neste item foi possível verificar as alterações sofridas nas componentes dominantes dos espectros de amplitude dos sinais de pressão em função da velocidade superficial do gás, do tipo de mistura e da posição de cada transdutor onde foram adquiridos os sinais de pressão.

Nas figuras 7.46 a 7.53, percebe-se que a mesma “proporção” é mantida entre as amplitudes da componente dominante. Por exemplo, considerando a componente dominante de 1,8 Hz que, inclusive, praticamente se manteve entre os diferentes valores de velocidade superficial como observado entre os gráficos da Fig. 7.1, para a mistura *VF-VG* e sinais tomados no *plenum*. Há evidente “proporção” entre as amplitudes representadas nos gráficos das Figs. 7.46 (*plenum*) e 7.47 ( $z_1$ ). O mesmo não ocorre entre os sinais registrados em  $z_2$ , Fig. 7.49, o que pode ser explicado pela presença do material *flotsam* no topo do leito. Da mesma forma, considerando a componente dominante de 0,2 Hz, a qual está presente somente nos sinais de  $z_1$  e  $z_2$ , verificou-se que essa frequência também se manteve como dominante nos diferentes valores de velocidade superficial. Observa-se que ela só domina o espectro em valores mais altos da velocidade como observado entre os gráficos das Figs. 7.6 e 7.11, sendo que, neste caso, a mesma “proporção” é observada entre as amplitudes representadas nos gráficos das Figs. 7.48 ( $z_1$ ) e 7.50 ( $z_2$ ). De forma geral, entre os gráficos do item 7.4, percebe-se que não há evidência de que o início da segregação entre as regiões 2 e 3 possa ser identificado através de comparações da amplitude da componente dominante.

Por outro lado, se o objetivo for o de estudar a fluidodinâmica a partir dos sinais, a análise no domínio da frequência mostrou que a placa distribuidora atua como um filtro passa-baixas removendo componentes de mais baixa frequência (abaixo de 0,5 Hz). As quais podem ter componentes de amplitude considerável até acima da maior determinada no *plenum* (compare, por exemplo, as Figs. 7.1, 7.6 e 7.11 para a mistura *VF-VG*). A hipótese é a de que tais componentes de mais baixa frequência podem estar relacionadas com o movimento da interface no topo do leito, isto é, sendo maior a velocidade superficial, maior será o grau de agitação

próximo à região do *freeboard*, sendo que, a partir de determinada condição, tais agitações passam a gerar componentes de pressão de amplitude maior do que as geradas pelas bolhas.

## 8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A metodologia de análise dos sinais de flutuações de pressão proposta neste trabalho permitiu identificar características da fluidodinâmica no leito e a faixa de velocidades do gás onde ocorre o fenômeno de segregação em misturas binárias.

A análise de sinais no domínio do tempo ou da frequência partiu tanto da análise dos gráficos temporais e dos espectros quanto da determinação de diferentes parâmetros dos sinais em ambos os domínios. No domínio do tempo, a partir da análise estatística da amostra de números que representa a sequência temporal da amplitude do sinal, pôde-se determinar a média e o desvio padrão. No domínio da frequência, a partir da análise estatística da amostra de números que representa a sequência das amplitudes das componentes do sinal com diferentes frequências, foi possível determinar as componentes dominantes como aquelas de maior amplitude e a faixa do espectro. Todos estes são parâmetros quantificáveis que permitiram, portanto, que fossem realizadas comparações dos seus valores entre sinais obtidos em condições estrategicamente escolhidas.

A comparação entre os sinais de pressão obtidos para a mistura e para os materiais isolados não forneceu informação útil para o estudo da segregação do leito. Logo, a realização de ensaios experimentais com misturas binárias é fundamental para o levantamento das condições operacionais associadas ao fenômeno da segregação do leito.

Os resultados também mostraram que a identificação do início da segregação do leito é difícil de ser realizada através da simples análise tanto dos gráficos temporais como dos espectros dos sinais de pressão medidos tanto no *plenum*, como nas outras posições localizadas acima do distribuidor de ar de tipo placa porosa. No entanto tal identificação é possível através de comparações de dois parâmetros dos sinais no espaço do tempo: o desvio padrão e a pressão média.

A construção dos gráficos do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão versus a velocidade superficial, apresentadas no item 6.2.1, mostrou-se uma alternativa recomendável para a determinação da faixa de velocidades onde ocorre o fenômeno da segregação. As figuras construídas mostraram que há repetitividade de resultados para os três ensaios realizados para cada mistura testada, o que permite que este tipo de análise seja realizado. Isto é, para as três

repetições, os “picos” de desvio padrão ocorrem com os mesmos valores de velocidade superficial para cada posição da tomada de pressão (*plenum*,  $z_1$  e  $z_2$ ), o que pode ser constatado comparando-se, por exemplo, as Figs. C.17, C.20 e C.23 do Apêndice C para a mistura VF-VG e sinais registrados no *plenum*. Evidentemente, a repetitividade geral dos dados também pode ser atestada através das tabelas no Apêndice B. Portanto, há forte indicação de que tal análise independe da posição da tomada de pressão (*plenum*,  $z_1$  ou  $z_2$ ).

Outro método de identificação do início do fenômeno da segregação pode ser realizado comparando-se as pressões médias no fundo do leito (posição  $z_1$ ), onde o início da segregação é detectado pelo aumento da pressão média (misturas VF-VG e PL-VG) com a redução da velocidade do gás. Fato atribuído à movimentação das partículas menores ou mais leves para o topo do leito deixando maior quantidade de espaços vazios no fundo e, conseqüentemente, fazendo com que maior massa de partículas esteja acima da posição da tomada de pressão localizada nesse ponto. Logo, conclui-se que a detecção do início da segregação do leito contendo misturas binárias também pode ser feita pela análise dos valores de pressão média do leito em função da velocidade do gás, desde que o transdutor de pressão esteja instalado no fundo do leito, acima da placa distribuidora, e que as partículas com tendência a flutuar (*flotsam*) possuam tamanho igual ou inferior às partículas com tendência a afundar (*jetsam*).

A metodologia utilizada neste trabalho permitiu a identificação de quatro regiões no processo de fluidização do leito contendo misturas binárias: região de leito fixo segregado (região 1), região de leito borbulhante segregado (região 2), região de leito borbulhante parcialmente segregado (região 3) e região de leito borbulhante misturado (região 4).

A determinação da velocidade de mínima fluidização de misturas binárias através da medida do desvio padrão é dependente da localização da tomada de pressão e da região considerada no ajuste da reta (fato verificado para a medida a partir do *plenum*), sendo que a melhor aproximação entre os resultados obtidos entre esse método e o método tradicional ocorreu para a medida considerando apenas os pontos obtidos na região 2 (leito borbulhante segregado).

A análise no domínio da frequência mostrou que a frequência da componente dominante depende mais fortemente da posição da tomada de pressão e de outros parâmetros (provavelmente do tipo da placa distribuidora, diâmetro do leito, temperatura e pressão) do que dos materiais em si. Esse fato também foi constatado através de análise dos espectros dos sinais para os materiais isolados, sendo que, a amplitude da componente dominante, obtida no *plenum*,

ocorreu ao redor de 2 Hz para as partículas de vidro fino e ao redor de 1,8 Hz para as partículas de vidro grosso. Essa análise mostrou que a placa distribuidora atua como um filtro passa-baixas removendo componentes de mais baixa frequência (abaixo de 0,5 Hz).

As imagens obtidas nos testes serviram para identificar mudanças no comportamento fluidodinâmico das misturas testadas.

Nas regiões 2 e 3, faixa onde a segregação está presente, a presença do material com tendência a flutuar (*flotsam*) influencia a dinâmica no topo do leito, enquanto que o material com tendência a afundar (*jetsam*) influencia a formação das bolhas na superfície da placa distribuidora.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestões para trabalhos futuros os seguintes pontos podem ser listados:

- Realizar análise de imagens com câmeras de alta velocidade (técnica de imagem de partículas - PIV) para a identificação dos regimes de fluidização e do fenômeno de segregação.
- Realizar experimentos com composições diferentes de uma determinada mistura.
- Estudar o fenômeno de segregação através da análise da variação da porosidade do leito ao longo da altura do leito.
- Estudar o fenômeno da segregação através da análise da expansão do leito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMUTIO, M.; LOPEZ, G.; ARTETXE, M.; ELORDI, G.; OLAZAR, M.; BILBAO, J. Influence of temperature on biomass pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Resources, Conservation and Recycling**. Vol.59, p. 23–31. 2012.

AZNAR, P.; FA, G-G.. CORELLA J. Minimum and maximum velocities for fluidization for mixtures of agricultural and forest residues with second fluidized solid. **International Chemical Engineering**. v. 32, p. 95–102, 1992.

BABU, S.; SHAH, B.; TALWALKAR, A. Fluidization correlations for coal gasification materials: minimum fluidization velocity and fluidized bed expansion ratio, **AIChE Symposium Series**, v. 176, p. 176-186, 1978.

BAI, B.; GHEORGHIU, S.; VAN OMMEN, R.; NIJENHUIS, J.; COPPENS, M. 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.; 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.

BAI, D.; SHIBUYA, E.; NAKAGAWA, N.; KATO, K. Characterization of Gas Fluidization Regimes Using Pressure Fluctuations, **Powder Technology**, v. 87, p. 105, 1996.

BASU, S. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Taylor and Francis Group, 2006.

BENDAT J.; PIERSOL, A. **Engineering applications of correlation and spectral analysis**. John Wiley & Sons, 1980.

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.

BRERETON, C.; GRACE, J. The transition to turbulent fluidization. Transactions IChemE, Part A, **Chemical Engineering Research and Design**, v. 70, p. 246–251, 1992.

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. **The fast Fourier transform and its applications**. Prentice-Hall, Inc., 1988

BROWN, R. C.; BRUE E. Resolving dynamical features of fluidized beds from pressure fluctuations. **Powder Technology**, v. 119, p. 68-80, 2001.

CÁRDENAS-FONSECA, Oscar Leonardo. Estudo preliminar da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido de um leito fluidizado circulante através da análise dos sinais dinâmicos de pressão. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009, **Dissertação (Mestrado)**.

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

CHEN, L.; KEAIKNS, D. Particle segregation in a fluidized bed, **Chemical engineering research**, v. 53, p. 395-400, 1975.

CHITESTER, D.; KORNOSKY, R...; FAN, S.; DANKO, J. Characteristics of fluidization at high pressure. **Chemical Engineering Science**. v. 39, p. 253-261, 1984.

CLARK N. N.; ATKINSON C. M. Amplitude reduction and phase lag in fluidized-bed pressure measurements. **Chemical Engineering Science**, v. 43, p. 1547-1557. 1988.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chem. Eng. Progr**, v. 48, n. 2, 1952

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

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, 2007.

FELIPE, Carlos Alberto Severo. Identificação e monitoramento de regimes fluidodinâmicos em leitos fluidizados gás-sólido. Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2004, **Tese ( Doutorado)**.

FORMISANI, B.; DE CRISTOFARO, G.; GIRIMONTE, R., “A fundamental approach to the phenomenology of fluidization of size segregating binary mixtures of solids”. **Chemical Engineering Science**. v. 56, p. 109-119. 2001

FORMISANI, B.; GIRIMONTE, R.; LONGO, T. “The fluidization process of binary mixtures of solids: Development of the approach based on the fluidization velocity interval”. **Powder Technology**. v. 185, p. 97 – 108. 2008.

GAROFANO, G.; TRAZZI, M.; TANNOUS, K. Identificação do comportamento fluidodinâmico na fluidização de grânulos farmacêuticos, XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, **ENEMP 2009**.

GAUTHIER, D.; ZERGUERRAS, S.; FLAMANT, G. Influence of the particle size distribution of powders on the velocities of minimum and complete fluidization, **Chemical Engineering Journal**, v. 74, p. 181-196, 1999.

GELDART, D. **Gas Fluidization Technology**, Edited by D. Geldart, John Wiley & Sons, Great Britain, 1986.

GELDART, D. Types of gas fluidization, **Powder Technology**, v. 7, p. 285-292, 1973.

GIBILARO, L.; ROWE, P. A model for a segregating gas fluidized bed, **Chemical Engineering Journal**, v. 29, p. 1403-1412. 1974.

GRACE R. **Handbook of Multiphase Systems**, Washington D.C., G. Hetsroni, Editor, Hemisphere Publisher Corporation, 1982.

HAO, B.;BI, T. Forced bed mass oscillations in gas–solid fluidized beds, **Powder technology**, v. 149, p.51-60, 2005.

HONG, S.; JO, B.; DOH, D.; CHOI, C. 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.

JOHNSSON F.; ZIJERVELD R.; SCHOUTEN J.; VAN DEN BLEEK C.; LECKNERA 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.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. New York: John Wiley & Sons, Butterworth-Heinemann, 2<sup>nd</sup> Ed, 1991.

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

LECKNER B.; KARLSSON M. Emission from circulating fluidized bed combustion of mixtures of wood and coal, in: Rubow, L., Commonwealth, G. (Eds.), Proceeding of 1993 International Conference on Fluidized Bed Combustion. **American Society of Mechanical Engineers**, New York, p. 109-115, 1993.

LOURENÇO, J.; TANNOUS, K. Análise da influência de parâmetros na fluidodinâmica de biomassas agroflorestais. XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 2012.

M'CHIRGUI, A.; TADRIST, H.; TADRIST, L. Experimental investigation of the instabilities in a fluidized bed origin of the pressure fluctuations, : **Physics of Fluids**, v. 9, p. 500-5009, 1997.

NICASTRO, M.; GLICKSMAN, L. Experimental verification of scaling relationships for fluidized beds, **Chemical Engineering Science**. v. 39, p. 1381–1391, 1984.

OLAZAR, M.; GARTZEN, L. Arabiourrutia, M., Elordi, G., Aguado, R., Bilbao, J. Kinetic modeling of tyre pyrolysis in a conical spouted bed reactor, **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. v. 81. No. 1, p. 127-132. 2008.

Origin 8.0/OriginLab. FFT Filter Smoothing. OriginLab. 2013. Disponível em: <<http://www.originlab.com/index.aspx?go=Products/Origin/DataAnalysis/SignalProcessing/SmoothingAndFitting&pid=78>>. Acesso em: 09-10-2013)

PARISE, Maria Regina. *Aplicação da distribuição espectral normal em leito fluidizado gás-sólido*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2007, **Tese (Doutorado)**.

PUNCOCHAR, M.; DRAHOS, J. Origin of pressure fluctuations in fluidized beds, **Chemical Engineering Science**, v. 60, p. 1193-1197, 2005.

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.

RASUL, M.; RUDOLPH, V.; CARSKY, M. Segregation potential in binary gas fluidized beds. **Powder Technology**, v. 103, p. 175-181, 1999.

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

ROWE, P; NIENOW, A; AGBIM, A. J. A preliminary quantitative study of particle segregation in gas fluidized beds – Binary system of near spherical particles. **Trans. Instn. Chem. Engrs.** vol. 52, p. 324-333. 1972

RUEDA-ORDOÑEZ, Yesid Javier. *Análise da Medição de Flutuações de Pressão em Tubo de Rarefação para Aplicação em Sistemas Fluidizados Gás-Sólido*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2011, **Dissertação (Mestrado)**.

SASIC, S.; LECKNER, B.; JOHNSON F. Characterization of fluid dynamics of fluidized beds by analysis of pressure fluctuations. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, p. 453-496, 2007.

SAXENA, S.; VOGEL, G. The measurement of incipient fluidization velocities in a bed of coarse dolomite at temperature and pressure, **Trans. Inst. Chem. Eng.** v. 55, p. 184–189, 1977.

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

TANNOUS, K.; HEMATI, M.; LAGUERIE, C. Caractéristiques au minimum de fluidisation et expansion des couches fluidisées de particules de la catégorie D de Geldart, **Powder Technology**, v.80, p. 55-72, 1994.

TANNOUS, K.; RAMOS, R.; DONIDA, W. Avaliação de parâmetros operacionais sobre diferentes regimes de fluidização de partículas heterogêneas, XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, **ENEMP 2005**.

TANNOUS, K.; MIZONOV, V. Comportamento da biomassa na fluidodinâmica em leitos fluidizados cônico e cilíndrico, XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, **ENEMP 2009**.

THONGLIMP, V.; HIQUILY, N.; LAGUERIE, C. Vitesse minimale de fluidisation et expansion des couches fluidisées par un gaz, **Powder Technology**, v. 38, p. 233-253. 1984.

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.

WEN, C.; YU, Y. Mechanics of fluidization, **Chemical Engineering Progress Symposium Series**, v. 62, p. 100-111, 1966.

WILKINSON, D. Determination of minimum fluidization velocity by pressure fluctuation measurement. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 73, p. 562-565, 1995.

WU, S.; BAEYENS J. Segregation by size difference in gas fluidized beds, **Powder technology**, v 98, p. 139-150, 1998.

YANG, T.; LEU, L. Study of transition velocities from bubbling to turbulent fluidization by statistic and wavelet multi-resolution analysis on absolute pressure fluctuations. **Chemical Engineering Science**, v. 63, p. 1950 – 1970, 2008.

YANG, W. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**, Taylor and Francis group, 2003.

YATES, J.; SIMONS, S. Experimental methods in fluidization research, **International Journal Multiphase Flow**, v. 20, p. 297–330, 1994.

ZHANG, Y.; JIN, B.; ZHONG, W. Experimental investigation on mixing and segregation behavior of biomass particle in fluidized bed. **Chemical Engineering and Processing** v.48, p. 745–754. 2009.

## APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARTICULADOS UTILIZADOS NA PESQUISA

Foram realizadas três análises granulométricas para cada material. Os resultados das análises granulométricas são apresentados nas Tabelas A.1 a A.3.

O diâmetro médio de Sauter do material foi considerado como a média dos 3 testes realizados para cada material.

Os dados das Tabelas A.1 a A.3 são também apresentados nas Figs. A.1 a A.6. Eles representam as distribuições granulométricas e distribuição acumulativa de cada material.

Tabela A.1 - Distribuição granulométrica vidro fino (*VF*).

Tyler	Abertura da Malha ( $\mu\text{m}$ )	$d_{pi}$ ( $\mu\text{m}$ )	Fração mássica		
			Ensaio 1 (%)	Ensaio 2 (%)	Ensaio 3 (%)
28	600	600	0,63	0,36	0,59
32	500	550	11,79	10,82	11,86
35	425	463	77,29	79,48	76,72
42	355	390,	7,93	7,06	7,78
48	300	328	1,82	1,84	1,89
60	250	275	0,53	0,43	0,80
Fundo	-	125	0,00	0,00	0,00
		Soma	100,00	100,00	100,00

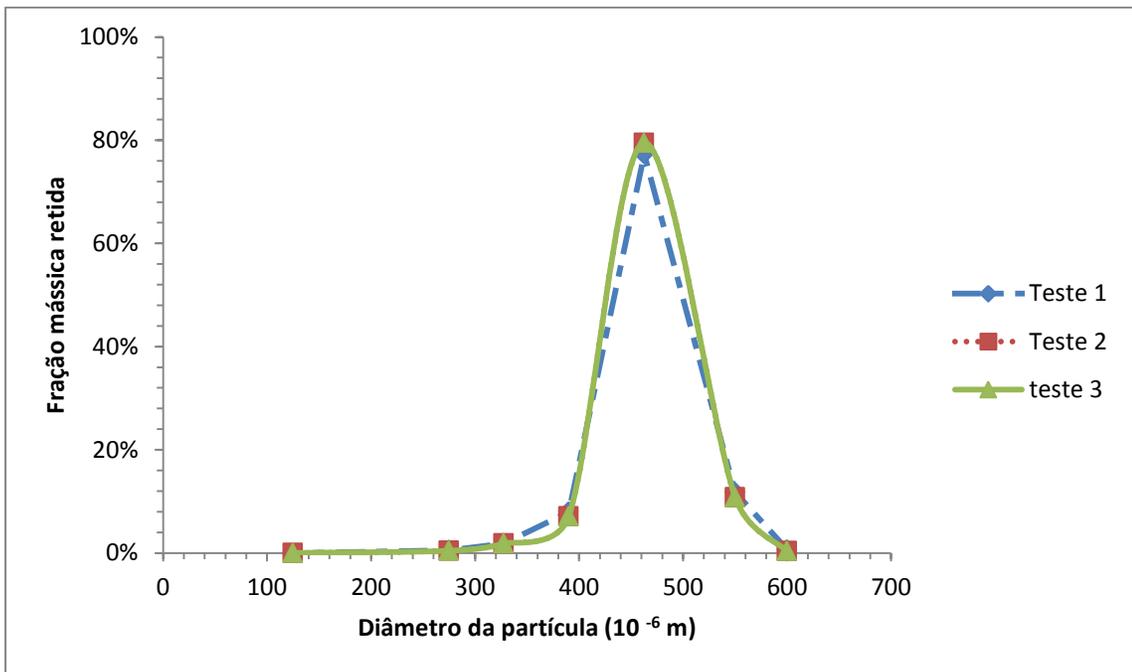


Figura A.1– Distribuição granulométrica para o vidro fino (VF)

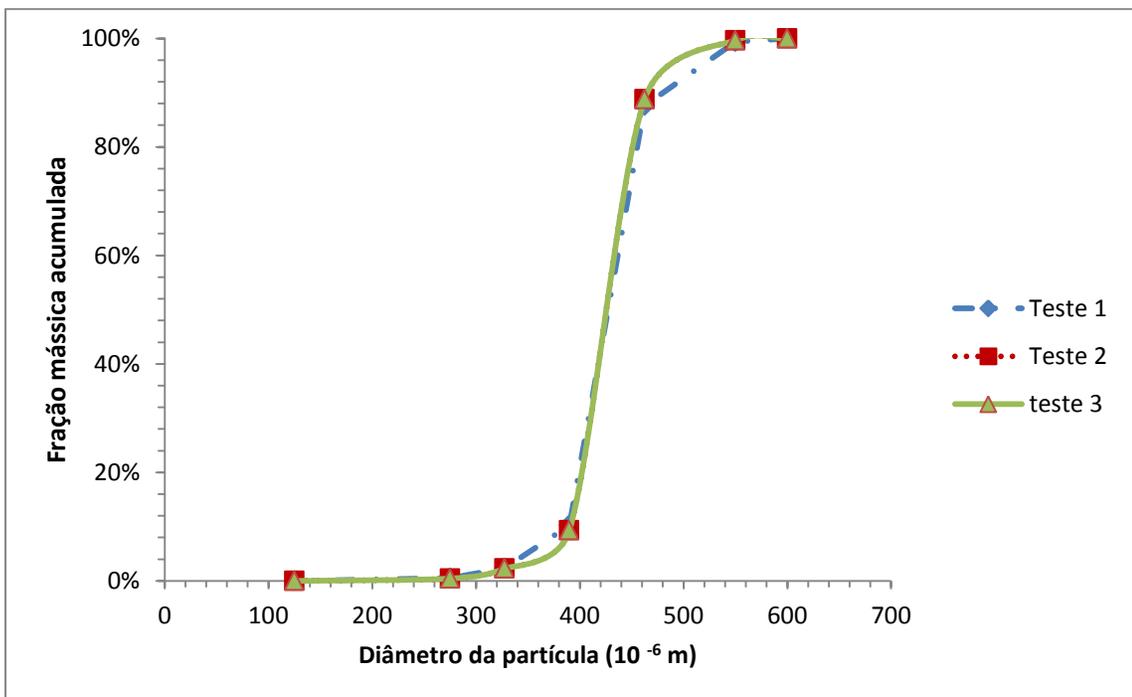


Figura A.2 – Distribuição granulométrica acumulativa para o vidro fino (VF)

Tabela A.2 - Distribuição granulométrica para o vidro grosso (VG).

Tyler	Abertura da Malha $\mu\text{m}$ )	$d_{pi}$ ( $\mu\text{m}$ )	Fração mássica		
			Ensaio 1 (%)	Ensaio 2 (%)	Ensaio 3 (%)
12	1400	1400	0,37	0,23	0,00
14	1200	1290	0,58	0,34	1,34
16	1000	1090	21,89	23,04	23,24
20	900	925	76,35	75,45	74,74
24	700	780	0,47	0,37	0,38
28	600	655	0,35	0,24	0,28
Fundo	-	300	0,00	0,00	0,00
		Soma	100,00	100,00	100,00

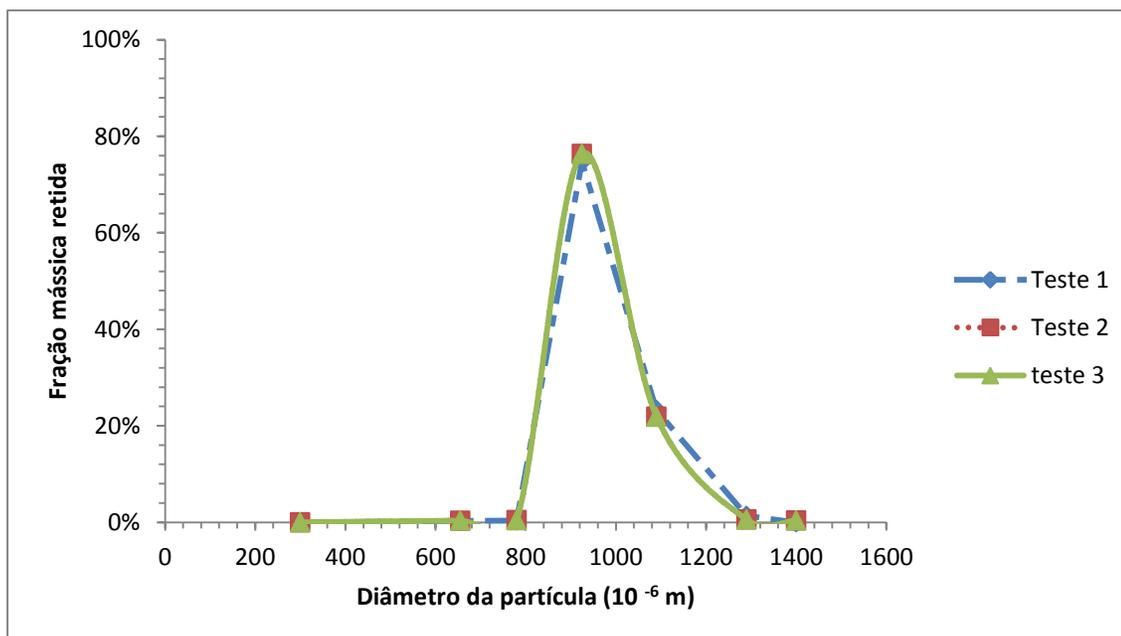


Figura A.3– Distribuição granulométrica para o vidro grosso (VG)

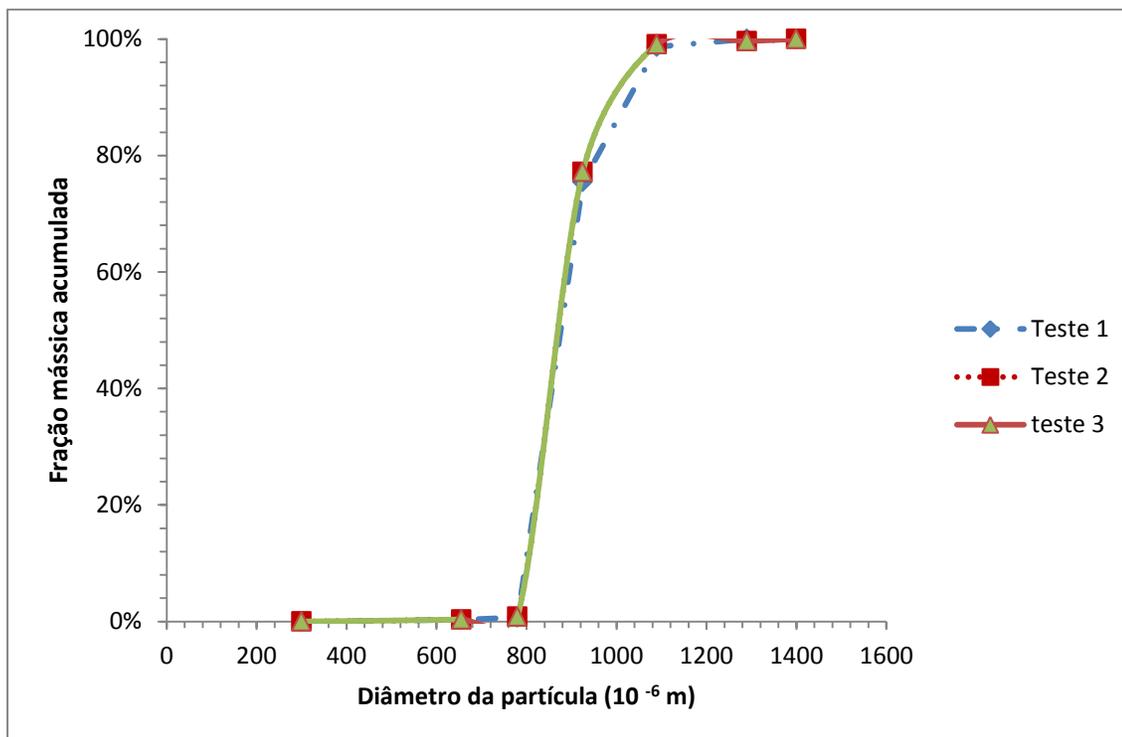


Figura A.4 – Distribuição granulométrica acumulativa para o vidro grosso (VG)

Tabela A.3 Distribuição granulométrica para o plástico (PL).

Tyler	Abertura da Malha ( $\mu\text{m}$ )	$d_{pi}$ ( $\mu\text{m}$ )	Fração mássica		
			Ensaio 1 (%)	Ensaio 2 (%)	Ensaio 3 (%)
12	1400	1400	0,00	0,00	0,00
14	1180	1290	0,00	0,00	0,00
16	1000	1090	57,29	57,02	57,60
20	850	925	33,42	34,18	33,31
24	710	780	6,98	6,73	7,89
28	600	655	1,30	1,60	0,73
Fundo	-	300	1,01	0,47	0,47
		Soma	100,00	100,00	100,00

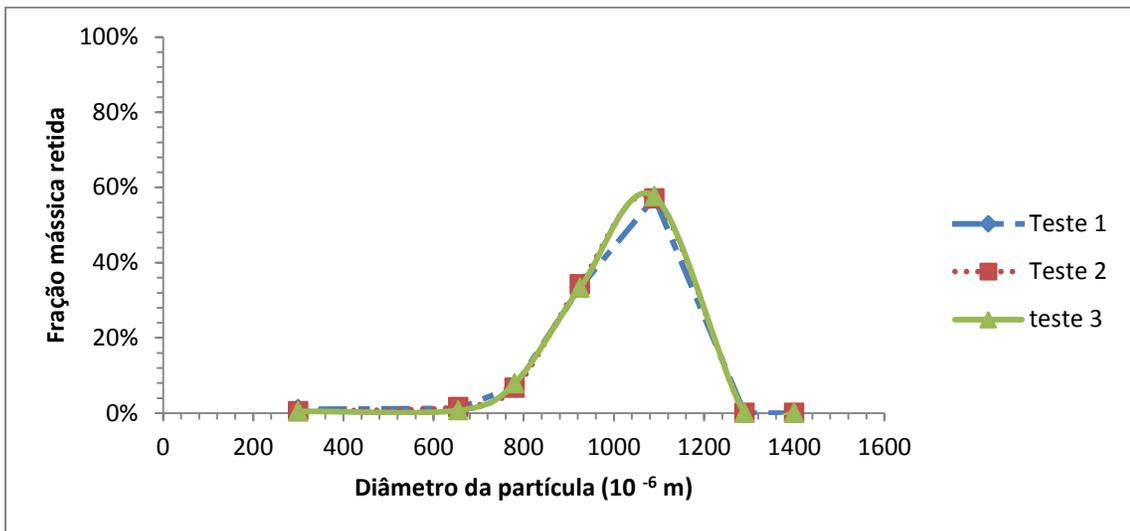


Figura A.5– Distribuição granulométrica para o plástico (PL)

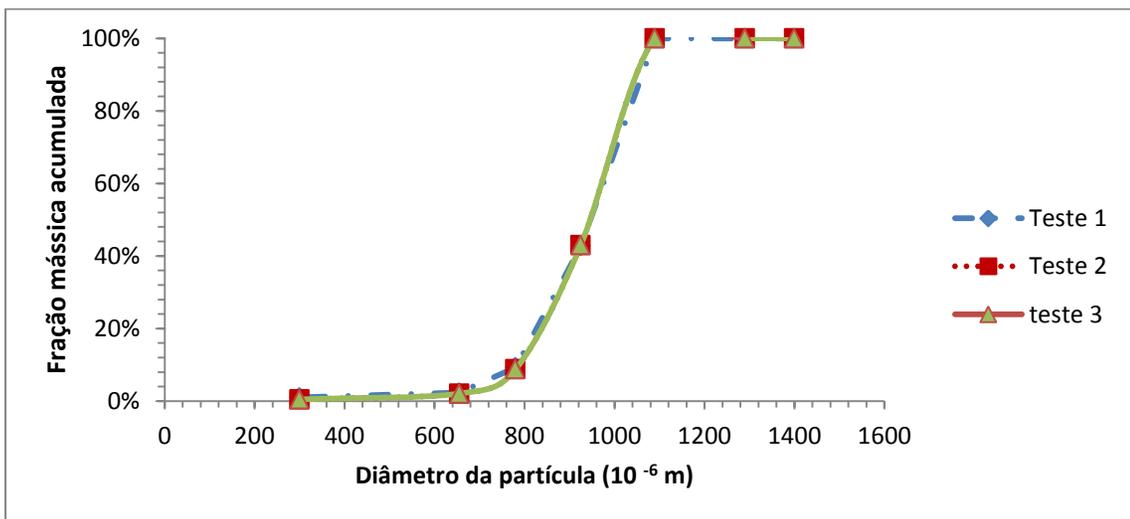


Figura A.6 – Distribuição granulométrica acumulativa do plástico (PL)

Os resultados da análise granulométrica levaram aos seguintes valores para o diâmetro médio das partículas:

- (i) Microesferas de vidro fino (VF):  $462 \pm 1 \mu\text{m}$ ;
- (ii) Microesferas de vidro grosso (VG):  $959 \pm 1 \mu\text{m}$
- (iii) Microesferas de plástico (PL):  $971 \pm 1 \mu\text{m}$ .

A partir do diâmetro médio e da massa específica dos materiais, foi possível verificar a classificação de cada material segundo Geldart (1973).

O valor considerado para todos os procedimentos foi o resultado da média dos três ensaios, para vidro fino a massa específica foi de  $2628 \pm 2 \text{ kg/m}^3$ , para o vidro grosso foi de  $2492 \pm 2 \text{ kg/m}^3$ ; para o plástico  $1016 \pm 2 \text{ kg/m}^3$  foi seguindo o procedimento do método da picnometria descrito no item 3.1 do Capítulo 3 desta dissertação.

A partir do diâmetro médio e da massa específica dos materiais, foi possível verificar a classificação de cada material segundo Geldart (1973). Os resultados obtidos na picnometria e na análise granulométrica dos materiais estão apresentados na tabela 3.1.

Tabela A4 – Massa específica e diâmetro médio da partícula para os materiais

Partículas	$\rho_p \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	$d_p \text{ (}\mu\text{m)}$	$\rho_p \text{ (Kg/m}^3\text{)}$  (valor médio)	$d_p \text{ (}\mu\text{m)}$  (valor médio)	Classificação Geldart (1973)
Vidro Fino (VF)	2626	462	2628±2	462±1	B
	2629	461			
	2630	463			
Vidro Grosso (VG)	2493	960	2492±2	960±1	D
	2492	959			
	2493	960			
Plástico (PL)	1013	972	1016±2	971±1	B
	1019	971			
	1016	971			

## APÊNDICE B - ANÁLISE DA REPETITIVIDADE DOS RESULTADOS

A seguir, são apresentadas as tabelas B.1 a B.33 contendo o desvio padrão e a pressão média para cada um dos três testes realizados para cada material homogêneo estudado nesta pesquisa, os quais compõem cada mistura estudada. Através dos dados coletados, pode-se comparar a pressão média e o desvio padrão das medidas de pressão para cada material. Doze velocidades superficiais do gás foram escolhidas, dentre as cerca de 40 velocidades testadas desde o regime de leito fixo até o regime de leito borbulhante. Esse procedimento foi adotado para permitir comparação entre as repetições feitas para cada material e verificar a repetitividade dos testes. Os resultados são discutidos após a apresentação das tabelas.

### **B.1 Pressão média e desvio padrão das medidas de pressão no leito contendo partículas de vidro fino (VF).**

As Tabelas B.1 a B.3 apresentam o desvio padrão ( $\sigma_P$ ) e a pressão média ( $\bar{P}$ ) calculados para amostras de sinais de pressão obtidas em doze diferentes velocidades superficiais do gás escolhidas distribuídas dentro da faixa entre as 40 testadas, com transdutores situados no *plenum* (Tab. B.1) em  $z_1$  (Tab. B.2) e em  $z_2$  (Tab. B.3).

Tabela B.1 - Desvio padrão e pressão média dos sinais de pressão no *plenum* (material VF).

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma P_{plenum}$ (Pa)			$\bar{P}_{plenum}$ (Pa)		
	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$
0,410	254,8	245,5	281,5	3500,1	3525,8	3491,5
0,401	248,6	229,3	278,2	3486,9	3486,6	3468,5
0,390	209,0	181,0	238,3	3439,8	3447,5	3434,3
0,379	172,5	131,7	197,1	3429,7	3422,0	3399,4
0,362	127,2	149,0	160,0	3383,4	3398,0	3358,8
0,349	100,9	75,4	114,5	3342,9	3347,3	3323,1
0,329	73,3	55,6	93,3	3292,0	3299,3	3288,8
0,307	55,2	43,7	79,0	3182,4	3233,1	3194,3
0,288	53,3	43,2	75,9	3117,8	3176,4	3131,4
0,238	55,3	42,4	74,6	2581,8	2639,0	2552,4
0,156	50,4	44,8	75,2	1646,0	1686,3	1644,9
0,096	49,2	43,7	74,5	1005,4	1033,1	997,8

Tabela B.2 Desvio padrão e pressão média dos sinais de pressão em  $z_1$  (material VF).

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma P_{z_1}$ (Pa)			$\bar{P}_{z_1}$ (Pa)		
	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$
0,410	31,3	30,7	29,9	1872,5	1875,1	1865,2
0,401	31,2	27,1	30,5	1871,7	1878,3	1863,9
0,390	25,7	24,4	27,9	1868,3	1871,7	1860,3
0,379	23,2	19,9	23,7	1859,9	1860,1	1852,6
0,362	22,3	20,1	24,4	1851,8	1856,4	1845,2
0,349	21,5	17,5	19,3	1840,0	1840,4	1830,3
0,329	17,2	14,2	16,3	1821,3	1826,1	1821,3
0,307	15,6	13,1	14,8	1783,3	1808,8	1798,0
0,288	12,2	11,9	12,6	1758,7	1798,8	1769,8
0,238	12,5	10,3	12,3	1452,4	1495,5	1449,4
0,156	12,3	10,6	12,6	907,8	934,98	912,65
0,096	12,1	10,1	12,2	528,2	548,71	538,53

Tabela B.3 - Desvio padrão e pressão média dos sinais de pressão em  $z_2$  (material VF).

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma P_{z_2}$ (Pa)			$\bar{P}_{z_2}$ (Pa)		
	VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>	VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>
0,410	40,8	36,6	42,7	858,0	859,8	845,0
0,401	40,4	39,3	46,1	847,5	847,3	835,8
0,390	36,4	33,1	39,8	835,2	839,9	822,7
0,379	33,6	28,2	39,6	826,3	824,9	820,2
0,362	31,8	32,1	35,0	809,7	798,6	792,5
0,349	28,8	24,1	31,9	785,4	802,0	785,9
0,329	24,6	22,9	27,3	764,0	772,5	779,8
0,307	20,0	19,1	24,9	732,2	750,6	746,1
0,288	19,3	18,3	24,3	699,8	728,5	741,7
0,238	19,2	18,0	23,8	575,0	592,8	584,3
0,156	19,4	18,2	23,9	338,4	349,6	343,3
0,096	19,0	18,2	23,6	171,6	180,8	177,5

Nas tabelas B,1 a B.3, são apresentados valores da pressão média e do desvio padrão dos sinais de pressão correspondentes ao transdutor localizado no *plenum* para os três materiais estudados. Nelas, é possível observar como, nos três testes, foram calculadas pressões médias cujos valores são próximos para velocidades iguais de operação. Um comportamento similar ocorre entre os dados do desvio padrão. Essa verificação é importante pelo fato de apontar a repetitividade dos testes para o vidro fino. A fim de corroborar com esta afirmação, são apresentados, nas Tabs. B.4 e B.5 respectivamente, os valores da pressão média mínima e da máxima, além dos valores de desvio padrão mínimo e máximo para cada teste.

A tabela B.4 apresenta resultados das medidas de pressão mínima ( $\bar{P}_{\min}$ ) e da pressão máxima ( $\bar{P}_{\max}$ ), além da diferença entre elas, relativas aos transdutores na posição do *plenum* ( $P_{\text{plenum}}$ ), na posição  $z_1$  ( $P_{z_1}$ ) e na posição  $z_2$  ( $P_{z_2}$ ).

Tabela B.4 - Dados da mínima e máxima da pressão média em todos os testes, e diferenças entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para o VF.

$\bar{P}_{plenum, máx} (Pa)$			$\bar{P}_{plenum, mín} (Pa)$			$\bar{P}_{plenum, máx} - \bar{P}_{plenum, mín} (Pa)$		
$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$
3500,1	3525,8	3491,5	1005,4	1033,1	997,8	2494,7	2492,7	2493,7
$\bar{P}_{z1, máx} (Pa)$			$\bar{P}_{z1, mín} (Pa)$			$\bar{P}_{z1, máx} - \bar{P}_{z1, mín} (Pa)$		
$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$
1877,5	1878,7	1865,2	528,2	548,7	538,5	1349,3	1330,0	1326,7
$\bar{P}_{z2, máx} (Pa)$			$\bar{P}_{z2, mín} (Pa)$			$\bar{P}_{z2, máx} - \bar{P}_{z2, mín} (Pa)$		
$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$
859,9	870,5	845,0	171,6	180,8	177,5	688,3	689,7	667,5

A Tabela B.5 apresenta, para cada transdutor de pressão, os resultados do desvio padrão das medidas de pressão mínimo ( $\sigma P_{min}$ ) e máximo ( $\sigma P_{max}$ ) além das diferenças entre eles.

Tabela B.5 - Dados da mínima e máxima para a média do desvio padrão da pressão em todos os testes, e diferenças entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para o VF.

$\sigma P_{plenum, máx} (Pa)$			$\sigma P_{plenum, mín} (Pa)$			$\sigma P_{plenum, máx} - \sigma P_{plenum, mín} (Pa)$		
$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$
254,8	245,5	285,5	49,2	41,6	74,5	205,5	203,9	211,1
$\sigma P_{z1, máx} (Pa)$			$\sigma P_{z1, mín} (Pa)$			$\sigma P_{z1, máx} - \sigma P_{z1, mín} (Pa)$		
$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$
32,0	31,1	33,9	12,1	9,7	12,0	19,9	21,4	21,9
$\sigma P_{z2, máx} (Pa)$			$\sigma P_{z2, mín} (Pa)$			$\sigma P_{z2, máx} - \sigma P_{z2, mín} (Pa)$		
$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$
45,6	42,7	46,1	19,0	17,7	23,5	26,5	24,9	22,5

Os resultados correspondentes ao transdutor em  $z_1$  apresentam dados de pressões médias menores que os dados adquiridos no *plenum*. Os desvios padrão também apresentam valores menores em comparação com os dados do *plenum*, fato atribuído à passagem de pequenas bolhas de gás geradas no distribuidor de gás do tipo placa porosa.

Os valores como a maior e menor pressão média, assim como os dados para o maior e o menor desvio padrão são similares entre todos os três testes feitos para o vidro fino.

O desvio padrão na posição  $z_1$  é menor com respeito aos dados obtidos no *plenum*, mas é levemente menor, ou praticamente igual aos dados medidos pelo transdutor localizado em  $z_2$ .

A pressão média diminui com a redução da velocidade do gás e com o aumento da altura da posição da tomada de pressão, as tomadas de pressão como  $z_1$  e  $z_2$  estão afetadas pela queda de pressão da placa distribuidora, pelo empacotamento de cada material, assim como pelo tamanho das bolhas em cada altura do leito. Assim vemos dados de  $P_{z_2}$  menores que os dados de  $P_{z_1}$ .

Semelhante aos testes com partículas de vidro fino foi o comportamento para o vidro grosso (VG) e para o plástico (PL), onde se conseguiu uma boa repetitividade, refletida nos dados obtidos para cada transdutor colocado na coluna do leito.

Tabela B.6 – Valores médios do desvio padrão e da pressão para cada teste feito, e desvio porcentual, para o material VF

<i>Desvio padrão</i>			$\bar{P}_{plenum}$			$\overline{\Delta\sigma\bar{P}}_{plenum} (\%)$			$\overline{\Delta\bar{P}}_{plenum} (\%)$		
$\overline{\sigma\bar{P}}_{plenum} (Pa)$			$(Pa)$								
VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>	VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>	VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>	VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>
120,81	107,11	145,18	2950,68	2974,53	2940,43	2,86	1,88	6,73	0,15	0,65	0,50
124,36			2955,22								
<i>Desvio padrão</i>			$\bar{P}_{z_1}$			$\overline{\Delta\sigma\bar{P}}_{z_1} (\%)$			$\overline{\Delta\bar{P}}_{z_1} (\%)$		
$\sigma P_{z_1} (II\alpha)$			$(Pa)$								
VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>	VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>	VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>	VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>
19,76	17,49	19,71	1617,99	1632,91	1617,27	4,07	7,87	3,80	0,29	0,63	0,34
18,99			1622,72								
<i>Desvio padrão</i>			$\bar{P}_{z_2}$			$\overline{\Delta\sigma\bar{P}}_{z_2} (\%)$			$\overline{\Delta\bar{P}}_{z_2} (\%)$		
$\sigma P_{z_1} (II\alpha)$			$(Pa)$								
VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>	VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>	VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>	VF <sub>1</sub>	VF <sub>2</sub>	VF <sub>3</sub>
27,78	25,68	31,91	686,93	695,61	689,57	2,38	9,76	1,14	0,55	0,71	0,16
28,45			690,70								

Na tabela B6 são apresentados os valores médios e o desvio porcentual para o desvio padrão e a pressão medida em cada transdutor. Nesta tabela verifica-se uma ótima repetitividade dos resultados de pressão média com desvios entre as medidas inferiores a 1%. Também se verifica que o máximo desvio observado nas medidas de flutuação de pressão foi de 9,8% para o transdutor instalado em  $z_2$ , o que também sugere uma boa repetitividade nesses resultados.

## B.2 Pressão média e desvio padrão das medidas de pressão no leito contendo partículas de vidro grosso (VG).

As tabelas B.7 a B.9 apresentam o desvio padrão ( $\sigma P$ ) e a pressão média ( $\bar{P}$ ) medidas para 10 diferentes velocidades superficiais do gás, com transdutores situados no plenum (Tab. B.7) em  $z_1$  (Tab. B.8) e em  $z_2$  (Tab. B.9).

Tabela B.7 - Resultados de desvio padrão e pressão média medidos no *plenum* (material VG).

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma \bar{P}_{plenum}$			$\bar{P}_{plenum}$ (Pa)		
	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>2</sub>
0,891	428,0	423,0	427,8	4714,8	4717,6	4717,7
0,860	364,5	377,5	402,0	4573,2	4588,3	4584,5
0,827	334,3	344,1	346,2	4430,7	4456,1	4452,4
0,790	276,8	272,4	273,8	4293,8	4296,2	4304,5
0,753	247,7	257,0	271,7	4126,4	4102,1	4116,7
0,712	166,2	162,8	167,4	4008,9	4017,0	4014,2
0,660	68,7	73,0	70,6	3886,7	3901,7	3897,7
0,589	61,6	62,2	60,6	3646,4	3508,6	3666,9
0,535	60,2	61,8	60,1	3346,4	3323,0	3351,1
0,393	107,6	63,0	60,7	2402,0	2278,7	2292,5
0,324	60,4	61,0	60,2	1955,3	1932,9	1924,4
0,107	61,3	62,6	61,9	639,4	590,7	622,0

Tabela B.8 - Resultados de desvio padrão e pressão média medidos em  $z_1$  (material VG).

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma P_{z1}$ (Pa)			$\bar{P}_{z1}$ (Pa)		
	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>2</sub>
0,891	77,4	72,7	71,1	1807,8	1806,9	1806,6
0,860	57,3	59,2	65,1	1810,3	1806,3	1802,7
0,827	50,3	57,1	56,1	1799,2	1804,4	1799,6
0,790	44,8	54,8	48,2	1784,0	1772,4	1781,7
0,753	57,3	57,1	55,5	1721,7	1702,1	1704,2
0,712	41,4	39,2	42,6	1698,9	1696,5	1689,4
0,660	22,4	23,4	25,3	1728,8	1728,8	1724,6
0,589	11,1	10,9	10,5	1723,9	1655,1	1728,7
0,535	11,1	10,6	10,6	1585,7	1550,4	1584,8
0,393	43,3	10,8	10,6	1108,8	1053,5	1077,2
0,324	11,2	10,6	10,6	889,5	882,7	894,2
0,107	11,3	11,2	10,9	247,0	222,8	247,2

Tabela B.9 - Resultados de desvio padrão e pressão média medidos em  $z_2$  (material VG).

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma P_{z2}$ (Pa)			$\bar{P}_{z2}$ (Pa)		
	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>
0,891	62,9	62,4	62,9	717,6	723,8	725,3
0,860	56,4	55,8	57,5	707,9	707,4	712,0
0,827	51,8	51,2	55,2	691,6	692,8	699,4
0,790	44,1	42,5	42,8	661,5	663,5	668,8
0,753	39,4	37,4	38,9	615,2	608,0	614,7
0,712	33,4	33,1	33,6	568,8	570,3	568,5
0,660	23,5	22,9	24,5	572,0	578,4	576,2
0,589	21,4	20,6	21,3	549,5	540,0	538,0
0,535	21,0	20,5	21,1	506,0	502,6	496,1
0,393	25,6	21,0	21,2	350,6	335,7	332,7
0,324	21,3	21,1	21,0	275,0	277,0	268,7
0,107	21,4	21,1	21,1	33,9	28,0	32,1

Na tabela B.10 apresenta resultados das medidas de pressão mínima ( $\bar{P}_{\min}$ ) e da pressão máxima ( $\bar{P}_{\max}$ ), além da diferença entre elas, relativas aos transdutores na posição do *plenum* ( $P_{plenum}$ ), na posição  $z_1$  ( $P_{z1}$ ) e na posição  $z_2$  ( $P_{z2}$ ).

Tabela B.10 - Dados da mínima e máxima da pressão média em todos os testes, e diferenças entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para o VG.

$\bar{P}_{plenum, \max} (Pa)$			$\bar{P}_{plenum, \min} (Pa)$			$\bar{P}_{plenum, \max} - \bar{P}_{plenum, \min} (Pa)$		
$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$
4714,8	4717,6	4717,7	639,4	590,7	622,0	4075,4	4126,9	4095,7
$\bar{P}_{z1, \max} (Pa)$			$\bar{P}_{z1, \min} (Pa)$			$\bar{P}_{z1, \max} - \bar{P}_{z1, \min} (Pa)$		
$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$
1810,3	1811,2	1808,4	247,0	222,8	247,2	1563,3	1588,4	1561,2
$\bar{P}_{z2, \max} (Pa)$			$\bar{P}_{z2, \min} (Pa)$			$\bar{P}_{z2, \max} - \bar{P}_{z2, \min} (Pa)$		
$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$
720,2	723,8	725,5	33,9	28,0	32,1	686,3	695,8	693,4

A tabela B.11 apresenta, para cada transdutor de pressão, os resultados do desvio padrão das medidas de pressão mínimo ( $\sigma P_{\min}$ ) e máximo ( $\sigma P_{\max}$ ) além das diferenças entre eles.

Tabela B.11 - Dados da mínima e máxima para a média do desvio padrão da pressão em todos os testes, e diferenças entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para o VG.

$\sigma P_{plenum, máx}$ (Pa)			$\sigma P_{plenum, min}$ (Pa)			$\sigma P_{plenum, máx} - \sigma P_{plenum, min}$ (Pa)		
$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$
428,0	423,0	427,8	60,2	61,0	59,7	367,8	362,0	368,1
$\sigma \bar{P}_{z1, máx}$ (Pa)			$\sigma \bar{P}_{z1, min}$ (Pa)			$\sigma \bar{P}_{z1, máx} - \sigma \bar{P}_{z1, min}$ (Pa)		
$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$
77,4	72,7	71,1	10,9	10,4	10,5	66,5	62,3	60,6
$\sigma P_{z2, máx}$ (Pa)			$\sigma P_{z2, min}$ (Pa)			$\sigma P_{z2, máx} - \sigma P_{z2, min}$ (Pa)		
$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$	$VG_1$	$VG_2$	$VG_3$
62,9	63,8	62,9	21,0	20,5	21,0	41,9	43,3	41,8

Tabela B.12– Valores médios do desvio padrão e da pressão para cada teste feito, e desvio porcentual, para o material VG

Desvio padrão			$\bar{P}_{plenum}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{plenum} (\%)$			$\overline{\Delta P}_{plenum} (\%)$		
$\overline{\sigma P}_{plenum} (Pa)$			$(Pa)$								
VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>
186,44	185,03	188,58	3502,00	3476,08	3495,38	0,13	0,89	1,02	0,31	0,43	0,12
186,69			3491,15								
Desvio padrão			$\bar{P}_{z1}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{z1} (\%)$			$\overline{\Delta P}_{z1} (\%)$		
$\overline{\sigma P}_{z1} (Pa)$			$(Pa)$								
VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>
36,58	34,80	34,76	1492,13	1473,49	1486,74	3,38	1,63	1,75	0,54	0,72	0,18
35,38			1484,12								
Desvio padrão			$\bar{P}_{z2}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{z2} (\%)$			$\overline{\Delta P}_{z2} (\%)$		
$\overline{\sigma P}_{z2} (Pa)$			$(Pa)$								
VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>	VG <sub>1</sub>	VG <sub>2</sub>	VG <sub>3</sub>
35,18	34,13	35,09	520,80	518,96	519,38	1,09	1,92	0,83	0,21	0,14	0,06
34,80			519,71								

Assim como observado para o vidro fino, verifica-se uma excelente repetitividade dos resultados, com desvio porcentual máximo entre as medidas de pressão média inferior a 1%. Em relação às medidas de flutuações de pressão, o máximo desvio observado foi de 3,4%.

**B.3. Pressão média e desvio padrão das medidas de pressão no leito contendo partículas de plástico ( $PL$ ).**

As tabelas B.13 a B.15 apresentam o desvio padrão ( $\sigma P$ ) e a pressão média ( $\bar{P}$ ) medidas para doze diferentes velocidades superficiais do gás, com transdutores situados no plenum (Tab. B.13) em  $z_1$  (Tab. B.14) e em  $z_2$  (Tab. B.15).

Tabela B13 - Resultados de desvio padrão e pressão média medidos no *plenum* (material  $PL$ )

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma P_{plenum}$ (Pa)			$\bar{P}_{plenum}$ (Pa)		
	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
0,41	82,1	74,3	75,4	1600,7	1600,7	1608,5
0,40	76,1	69,5	68,9	1573,1	1573,1	1574,3
0,39	76,0	66,8	62,4	1548,5	1548,5	1548,2
0,38	69,0	61,7	60,7	1519,7	1519,7	1516,9
0,36	62,6	59,2	59,4	1467,5	1467,5	1481,9
0,35	61,1	59,4	58,0	1448,1	1448,1	1457,7
0,34	61,2	58,5	57,4	1426,3	1426,3	1440,5
0,32	61,2	58,8	58,27	1388,4	1388,4	1416,4
0,29	62,5	58,1	58,1	1307,5	1307,5	1354,0
0,28	60,3	58,6	58,2	1227,8	1227,8	1309,0
0,24	60,0	58,3	58,2	990,0	990,0	1044,2
0,20	59,8	58,4	59,3	764,4	764,4	924,3

Tabela B.14 - Resultados de desvio padrão e pressão média medidos em  $z_1$  (material *PL*).

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma P_{z_1}$ (Pa)			$\bar{P}_{z_1}$ (Pa)		
	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
0,41	14,1	13,5	13,6	594,1	597,2	597,8
0,40	13,3	14,0	13,5	590,4	594,0	595,4
0,39	13,3	13,5	12,7	592,7	593,0	591,8
0,38	12,4	12,7	12,4	590,0	590,3	589,4
0,36	12,2	11,9	12,5	586,3	585,8	586,8
0,35	11,6	12,2	11,9	583,9	585,0	585,2
0,34	11,3	11,9	11,7	582,5	583,9	584,6
0,32	11,0	11,4	12,0	579,3	578,7	582,7
0,29	11,0	10,8	11,6	572,6	566,3	580,0
0,28	10,9	11,1	11,0	547,1	536,3	570,5
0,24	10,7	10,7	11,3	460,4	425,0	444,6
0,20	10,9	10,8	11,6	359,3	316,8	389,2

Tabela B.15 - Resultados de desvio padrão e pressão média medidos em  $z_2$  (material *PL*).

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma P_{z_2}$ (Pa)			$\bar{P}_{z_2}$ (Pa)		
	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
0,41	23,0	22,6	22,9	149,9	157,1	156,6
0,40	22,7	22,8	22,0	151,4	155,5	158,5
0,39	23,1	22,1	21,9	150,7	152,1	159,5
0,38	22,6	21,9	21,1	147,6	152,0	153,0
0,36	21,9	21,4	21,4	144,6	148,0	150,7
0,35	21,2	21,0	21,2	143,9	143,7	146,5
0,34	21,3	21,1	20,7	140,4	140,4	141,0
0,32	21,1	20,9	20,8	132,5	132,0	138,0
0,29	20,9	20,6	20,3	114,2	117,1	123,3
0,28	20,9	20,4	20,6	111,8	109,4	118,1
0,24	20,8	20,5	20,7	75,9	65,4	73,6
0,20	21,1	20,5	20,5	44,7	29,4	55,3

Na tabela B.13 correspondente aos dados adquiridos no plenum também é possível verificar que nas três repetições foram atingidas pressões médias muito parecidas para velocidades iguais de operação. Um comportamento muito similar foi obtido para os dados de desvio padrão. Essa constatação reforça o fato dos testes apresentar repetitividade. Como comentado para os demais materiais, para corroborar esta afirmação são apresentados dados da pressão média mínima e máxima, além dos desvios padrão mínimos e máximos, para cada teste. Esses resultados mostram que o sistema experimental permitiu a reprodutibilidade dos testes para as mesmas condições operacionais.

Na tabela B.16 apresenta resultados das medidas de pressão mínima ( $\bar{P}_{\min}$ ) e da pressão máxima ( $\bar{P}_{\max}$ ), além da diferença entre elas, relativas aos transdutores na posição do *plenum* ( $P_{plenum}$ ), na posição  $z_1$  ( $P_{z1}$ ) e na posição  $z_2$  ( $P_{z2}$ ).

Tabela B.16 - Dados da mínima e máxima da pressão média em todos os testes, e diferenças entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para o *PL*.

$\bar{P}_{plenum, \max}$ (Pa)			$\bar{P}_{plenum, \min}$ (Pa)			$\bar{P}_{plenum, \max} - \bar{P}_{plenum, \min}$ (Pa)		
$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
1610,4	1600,7	1608,5	863,3	764,4	707,5	747,1	836,3	901,0
$\bar{P}_{z1, \max}$ (Pa)			$\bar{P}_{z1, \min}$ (Pa)			$\bar{P}_{z1}$ (Pa)		
$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
594,1	597,2	597,8	301,9	249,1	216,4	292,2	348,1	381,4
$\bar{P}_{z2, \max}$ (Pa)			$\bar{P}_{z2, \min}$ (Pa)			$\bar{P}_{z2, \max} - \bar{P}_{z2, \min}$ (Pa)		
$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
152,0	158,1	162,2	44,7	29,4	22,1	107,4	128,7	140,1

A tabela B.17 apresenta, para cada transdutor de pressão, os resultados do desvio padrão das medidas de pressão mínimo ( $\sigma P_{\min}$ ) e máximo ( $\sigma P_{\max}$ ) além das diferenças entre eles.

Tabela B.17 - Dados da mínima e máxima para a média do desvio padrão da pressão em todos os testes, e diferenças entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para o  $PL$ .

$\sigma P_{plenum, máx}$ (Pa)			$\sigma P_{plenum, mín}$ (Pa)			$\sigma P_{plenu, máx} - \sigma P_{plenum, mín}$ (Pa)		
$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
82,1	74,3	75,4	58,5	58,1	57,4	23,6	16,1	18,0
$\sigma P_{z1, máx}$ (Pa)			$\sigma P_{z1, mín}$ (Pa)			$\sigma P_{z1, máx} - \sigma P_{z1, mín}$ (Pa)		
$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
14,1	14,1	13,6	10,6	10,7	10,9	3,5	3,4	2,6
$\sigma P_{z2, máx}$ (Pa)			$\sigma P_{z2, mín}$ (Pa)			$\sigma P_{z2, máx} - \sigma P_{z2, mín}$ (Pa)		
$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
23,3	23,3	22,9	20,8	20,4	20,2	2,5	2,9	2,7

Os menores desvios padrões obtidos para as medidas de  $P_{z1}$  e de  $P_{z2}$  nos testes com partículas de plástico é atribuído à pequena resistência do leito à passagem de ar resultando em menor pressão média para cada velocidade utilizada nos testes em comparação com os valores obtidos para os demais materiais.

Tabela B.18 – Valores médios do desvio padrão e da pressão para cada teste feito, e desvio porcentual, para o material VG

Desvio padrão			$\bar{P}_{plenum}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{plenum} (\%)$			$\overline{\Delta P}_{plenum} (\%)$		
$\overline{\sigma P}_{plenum} (Pa)$			$(Pa)$								
$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
65,99	61,80	61,18	1355,17	1355,17	1389,66	4,76	1,89	2,86	0,84	0,84	1,68
186,69			3491,15								
Desvio padrão			$\bar{P}_{z1}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{z1} (\%)$			$\overline{\Delta P}_{z1} (\%)$		
$\overline{\sigma P}_{z1} (Pa)$			$(Pa)$								
$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
11,89	12,04	12,15	553,21	546,02	558,16	1,13	0,11	1,01	0,13	1,16	1,03
35,38			1484,12								
Desvio padrão			$\bar{P}_{z2}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{z2} (\%)$			$\overline{\Delta P}_{z2} (\%)$		
$\overline{\sigma P}_{z1} (Pa)$			$(Pa)$								
$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$	$PL_1$	$PL_2$	$PL_3$
21,71	21,31	21,17	125,63	125,17	131,17	1,47	0,40	1,06	1,33	1,69	3,02
21,40			127,33								

Verifica-se um maior afastamento entre os resultados obtidos, para a pressão média, nos 3 ensaios com partículas de plástico, com desvio porcentual máximo de 1,7%, o que ainda indica uma ótima repetitividade dos resultados. Em relação às medidas de flutuações de pressão, o máximo desvio observado foi de 4,8% para medidas realizadas no plenum. É interessante notar que para os demais materiais, as medidas do plenum apresentaram os menores desvios. Esse fato pode ser atribuído à formação de canais preferenciais, que foi mais acentuada nos testes contendo as microesferas de plástico.

- **Verificação do regime permanente**

Para se verificar se os testes foram realizados em regime permanente, foram comparadas as pressões médias dos sinais para diferentes tempos de aquisição.

Este procedimento foi feito com o objetivo de avaliar a utilização do tempo de 50 segundos e taxa de amostragem de 200 Hz.

Foi calculada a pressão média para cada material, com dados adquiridos no plenum, na maior velocidade do gás, em tempos diferentes de aquisição, os quais variaram de 10 a 50s conforme mostrado na Tabs. B.19 a B.21. Os sinais do plenum foram utilizados nesta análise por serem os que apresentam amplitudes e períodos mais variáveis, com isso demoram mais tempo para atingir o regime permanente.

Tabela B.19 - Comparação da  $\bar{P}_{plenum}$  para diferentes tempos de aquisição, material *VF*.

$U_o(m/s)$	$\bar{P}_{plenum} (Pa)$				
	10s	20s	30s	40s	50s
0,40	3490,40	3497,81	3492,01	3492,71	3496,18

Tabela B.20 – Comparação da  $\bar{P}_{plenum}$  para diferentes tempos de aquisição , material *VG*.

$U_o(m/s)$	$\bar{P}_{plenum} (Pa)$				
	10s	20s	30s	40s	50s
0,88	4653,99	4650,80	4651,45	4655,05	4652,76

Tabela B.21 – Comparação da  $\bar{P}_{plenum}$  para diferentes tempos de aquisição , material *PL*.

$U_o(m/s)$	$\bar{P}_{plenum} (Pa)$				
	10s	20s	30s	40s	50s
0,40	1572,74	1575,58	1577,50	1577,90	1575,90

Para diferentes tempos de aquisição, os dados mostraram-se próximos entre eles, este comportamento foi observado nas velocidades máximas com que foram feitos os testes.

Os resultados confirmam que nesta pesquisa os dados foram adquiridos com o leito em regime permanente.

- **Desvio padrão e pressão média para as misturas**

Neste item são apresentadas tabelas com dados obtidos nos testes feitos para cada mistura. A análise destes dados é feita da mesma forma que para os materiais homogêneos, estudados de maneira isolada. Procurou-se com este procedimento mostrar a repetitividade dos resultados e mostrar que os dados foram adquiridos com o leito em regime permanente.

#### **B.4. Pressão média e desvio padrão das medidas de pressão no leito contendo a mistura (VF-VG)**

As tabelas B.22 a B.24 apresentam os resultados obtidos utilizando a mistura de vidro fino e vidro grosso, (testes  $(VF-VG)_1$ ,  $(VFVG)_2$  e  $(VF-VG)_3$ ), correspondentes ao desvio padrão ( $\sigma P$ ) e a pressão média ( $\bar{P}$ ) medidas para doze diferentes velocidades superficiais do gás, com transdutores situados no plenum (Tab. B.19) em  $z_1$  (Tab. B.20) e em  $z_2$  (Tab. B.21).

Tabela B.22 - Resultados de desvio padrão e pressão média para as medidas no *plenum* utilizando a mistura (VF-VG)

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma$ (Pa)			$\bar{P}_{plenum}$ (Pa)		
	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
0,89	495,46	495,46	485,80	4631,40	4635,70	4654,60
0,85	457,28	457,28	430,53	4513,30	4504,90	4506,30
0,82	403,72	403,72	413,94	4364,50	4371,20	4374,90
0,77	362,80	344,70	362,80	4223,70	4224,80	4245,60
0,72	314,74	327,56	314,74	4068,00	4064,10	4083,30
0,68	213,34	237,04	213,34	3902,60	3894,00	3900,70
0,62	71,22	59,60	71,22	3782,00	3773,40	3787,50
0,58	44,69	44,69	51,91	3637,80	3624,60	3639,50
0,51	39,79	39,79	50,54	3219,20	3218,70	3216,00
0,41	39,46	39,46	52,11	2679,00	2666,10	2697,60
0,33	52,36	45,09	52,36	2106,70	2104,60	2111,30
0,22	52,88	43,66	52,88	1471,20	1450,80	1468,30

Tabela B.23 - Resultados de desvio padrão e pressão média para as medidas em  $z_l$  utilizando a mistura (VF-VG)

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma$ (Pa)			$\bar{P}_{z_l}$ (Pa)		
	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
0,89	84,68	78,57	82,13	1775,50	1779,70	1773,90
0,85	68,44	82,93	66,39	1765,80	1757,60	1772,90
0,82	59,69	59,70	63,44	1771,00	1766,70	1767,70
0,77	53,15	50,25	53,15	1772,60	1769,10	1771,20
0,72	47,05	45,65	47,05	1758,90	1764,10	1763,20
0,68	36,32	41,99	36,32	1701,60	1686,80	1681,20
0,62	22,45	28,15	22,45	1680,00	1670,30	1666,00
0,58	15,71	15,45	14,74	1722,00	1716,20	1708,70
0,51	9,90	10,31	10,48	1635,00	1617,00	1616,00
0,41	10,24	9,89	10,68	1404,70	1386,90	1393,40
0,33	11,85	11,85	11,85	1130,90	1108,60	1125,20
0,22	11,04	11,71	11,04	819,16	810,46	816,18

Tabela B.24 - Resultados de desvio padrão e pressão média para as medidas em  $z_2$  utilizando a mistura (VF-VG)

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma$ (Pa)			$\bar{P}_{z_2}$ (Pa)		
	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
0,89	68,85	68,86	63,86	676,05	671,44	669,08
0,85	61,94	65,06	57,70	668,30	653,03	655,90
0,82	55,16	51,53	58,04	658,91	651,93	646,66
0,77	51,27	51,15	51,27	637,74	642,16	633,00
0,72	39,72	40,04	39,72	624,46	605,40	616,01
0,68	29,86	35,48	29,86	604,05	606,31	606,99
0,62	24,58	26,26	24,58	559,88	553,08	554,20
0,58	20,37	21,26	21,39	550,54	538,53	535,55
0,51	19,55	19,87	19,86	514,55	510,58	514,16
0,41	19,35	19,38	20,15	468,26	462,97	465,58
0,33	21,88	20,41	21,88	386,78	380,29	388,54
0,22	21,01	20,67	21,01	284,82	280,50	284,83

Nas tabelas B.22 a B.24 valores da pressão média e do desvio padrão dos sinais de pressão correspondentes aos transdutores na posição do *plenum* ( $P_{plenum}$ ), na posição  $z_1$  ( $P_{z_1}$ ) e na posição  $z_2$  ( $P_{z_2}$ ). Nelas é possível observar como nos três testes foram atingidas pressões médias muito parecidas para velocidades iguais de operação, um comportamento muito similar pode-se ver nos dados do desvio padrão. Essa verificação é importante porque mostra a repetitividade dos testes para o vidro fino. Para corroborar esta afirmação são apresentados dados da pressão média mínima e máxima, além dos desvios padrão mínimos e máximos, para cada teste.

Os resultados mostrados indicam que houve reprodutibilidade dos resultados para as mesmas condições operacionais testadas para a mistura (VF-VG);

Semelhante aos testes com a mistura (VF-VG) foi o comportamento dos dados para as outras misturas (PL-VG) e para (PL-VF), onde se conseguiu uma boa repetitividade, refletida nos dados obtidos para cada transdutor colocado na coluna do leito.

Na tabela B.25 apresenta resultados das medidas de pressão mínima ( $\bar{P}_{\min}$ ) e da pressão máxima ( $\bar{P}_{\max}$ ), além da diferença entre elas, relativas aos transdutores na posição do *plenum* ( $P_{plenum}$ ), na posição  $z_1$  ( $P_{z_1}$ ) e na posição  $z_2$  ( $P_{z_2}$ ).

Tabela B.25 - Dados da mínima e máxima da pressão média em todos os testes, e diferenças entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para a mistura (VF-VG)

$\bar{P}_{plenumMáximo} (Pa)$			$\bar{P}_{plenumMínimo} (Pa)$			$\bar{P}_{plenumMáximo} - \bar{P}_{plenumMínimo} (Pa)$		
(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
4680,80	4678,70	4680,80	384,02	410,16	369,23	4296,78	4268,54	4311,57
$\bar{P}_{z1Máximo} (Pa)$			$\bar{P}_{z1Mínimo} (Pa)$			$\bar{P}_{z1Máximo} - \bar{P}_{z1Mínimo} \bar{P}_{z1} (Pa)$		
(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
1781,30	1779,70	1773,90	713,88	701,45	706,63	1067,42	1078,25	1067,27
$\bar{P}_{z2Máximo} (Pa)$			$\bar{P}_{z2Mínimo} (Pa)$			$\bar{P}_{z2Máximo} - \bar{P}_{z2Mínimo} \bar{P}_{z2} (Pa)$		
(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
676,05	684,75	676,05	83,13	89,22	83,17	592,92	595,53	592,88

A tabela B.26 apresenta, para cada transdutor de pressão, os resultados do desvio padrão das medidas de pressão mínimo ( $\sigma P_{min}$ ) e máximo ( $\sigma P_{max}$ ) além das diferenças entre eles.

Tabela B.26 - Dados da mínima e máxima para a média do desvio padrão da pressão em todos os testes, e diferencias entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para a mistura (VF-VG).

$\sigma$ Máximo no $P_{plenum}$ (Pa)			$\sigma$ Mínimo no $P_{plenum}$ (Pa)			$\sigma$ Máximo - $\sigma$ Mínimo $P_{plenum}$ (Pa)		
(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
495,46	495,46	495,46	39,46	39,46	50,51	456,01	456,01	444,95
$\sigma$ Máximo no $P_{z1}$ (Pa)			$\sigma$ Mínimo no $P_{z1}$ (Pa)			$\sigma$ Máximo - $\sigma$ Mínimo $P_{z1}$ (Pa)		
(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
84,68	86,24	84,68	9,86	9,86	10,48	74,81	76,38	74,20
$\sigma$ Máximo no $P_{z2}$ (Pa)			$\sigma$ Mínimo no $P_{z2}$ (Pa)			$\sigma$ Máximo - $\sigma$ Mínimo $P_{z2}$ (Pa)		
(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
71,70	71,70	71,70	19,35	19,35	19,86	52,35	52,35	51,85

Tabela B.27 – Valores médios do desvio padrão e da pressão para cada teste feito, e desvio porcentual, para o material (VF-VG)

Desvio padrão			$\bar{P}_{plenum}$			$\overline{\Delta\sigma\bar{P}}_{plenum} (\%)$			$\overline{\Delta\bar{P}}_{plenum} (\%)$		
$\overline{\sigma\bar{P}}_{plenum}(Pa)$			$(Pa)$								
(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
212,31	211,50	212,68	3549,95	3544,40	3557,13	0,07	0,31	0,24	0,02	0,17	0,19
212,16			3550,50								
Desvio padrão			$\bar{P}_{z1}$			$\overline{\Delta\sigma\bar{P}}_{z1} (\%)$			$\overline{\Delta\bar{P}}_{z1} (\%)$		
$\sigma Pz1(Pa)$			$(Pa)$								
(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
35,87	37,20	35,81	1578,10	1569,45	1571,29	1,15	2,49	1,34	0,32	0,22	0,10
36,29			1572,95								
Desvio padrão			$\bar{P}_{z2}$			$\overline{\Delta\sigma\bar{P}}_{z2} (\%)$			$\overline{\Delta\bar{P}}_{z2} (\%)$		
$\sigma Pz1(Pa)$			$(Pa)$								
(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>	(VF-VG) <sub>1</sub>	(VF-VG) <sub>2</sub>	(VF-VG) <sub>3</sub>
36,12	36,66	35,77	552,86	546,35	547,54	0,17	1,31	1,14	0,72	0,47	0,25
36,19			548,92								

A tabela B 27 mostra uma ótima repetitividade entre os resultados dos valores médios do desvio padrão e das pressões, para os testes com a mistura (VF-VG), indicando que, assim como para os materiais isolados, os resultados obtidos puderam ser reproduzidos.

**B.5. Pressão média e desvio padrão das medidas de pressão no leito contendo a mistura (PL-VG)**

As tabelas B.28 a B.30 apresentam os resultados obtidos utilizando a mistura de plástico e vidro grosso, (testes  $(PL-VG)_1$ ,  $(PL-VG)_2$  e  $(PL-VG)_3$ ), correspondentes ao desvio padrão ( $\sigma P$ ) e a pressão média ( $\bar{P}$ ) medidas para doze diferentes velocidades superficiais do gás, com transdutores situados no plenum (Tab. B.24) em  $z_1$  (Tab. B.25) e em  $z_2$  (Tab. B.26).

Tabela B.28 - Resultados de desvio padrão e pressão média para as medidas no *plenum* utilizando a mistura (PL-VG)

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma$ (Pa)			$\bar{P}_{plenum}$ (Pa)		
	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$
0,91	410,2	434,0	423,3	4335,2	4339,4	4335,2
0,89	391,7	401,1	422,1	4264,9	4252,9	4264,9
0,86	326,3	419,5	440,5	4142,5	4167,1	4142,5
0,83	313,55	391,6	434,1	4037,2	4048,9	4037,2
0,79	270,3	340,0	390,1	3931,2	3932,9	3931,2
0,74	199,0	275,7	361,1	3821,2	3812,5	3821,2
0,70	81,3	257,3	274,7	3700,8	3711,7	3700,8
0,65	56,4	166,9	221,7	3579,6	3588,6	3579,6
0,58	56,2	89,2	134,8	3438,1	3440,2	3438,1
0,50	56,6	71,3	70,7	3267,5	3254,7	3267,5
0,41	58,6	72,8	71,6	2889,2	2802,5	2889,2
0,32	56,6	65,8	74,9	2261,3	2209	2261,3

Tabela B.29 - Resultados de desvio padrão e pressão média para as medidas em  $z_1$  utilizando a mistura (PL-VG)

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma$ (Pa)			$\bar{P}_{z_1}$ (Pa)		
	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>
0,91	49,7	52,1	49,7	1421,5	1436,1	1421,5
0,89	48,8	49,5	48,8	1426,6	1439,1	1426,6
0,86	52,2	52,7	52,2	1443,2	1434,8	1443,2
0,83	53,7	45,2	53,7	1449,1	1435,6	1449,1
0,79	48,1	42,4	48,1	1480,4	1439,6	1480,4
0,74	47,5	42,5	47,5	1487	1465,7	1487
0,70	41,0	38,8	41,0	1514,9	1494,7	1514,9
0,65	42,6	35,2	42,6	1517,5	1524,2	1517,5
0,58	32,7	24,2	32,7	1440,5	1462,8	1440,5
0,50	20,1	20,9	20,1	1440,8	1446,5	1440,8
0,41	20,1	20,1	20,1	1336,3	1288	1336,3
0,32	19,6	19,5	19,6	1052,2	1018,1	1052,2

Tabela B.30 - Resultados de desvio padrão e pressão média para as medidas em  $z_2$  utilizando a mistura (PL-VG)

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma$ (Pa)			$\bar{P}_{z_2}$ (Pa)		
	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>
0,91	52,3	56,7	52,3	395,27	411,68	395,27
0,89	47,2	51,0	47,2	401,17	396,78	401,17
0,86	54,3	49,9	54,3	413,4	410,63	413,4
0,83	46,8	47,0	46,8	426,25	407,12	426,25
0,79	49,3	42,5	49,3	461,03	415,77	461,03
0,74	45,1	37,4	45,1	484,63	427,8	484,63
0,70	38,7	33,3	38,7	488,14	457,9	488,14
0,65	31,7	31,0	31,7	503,81	503,29	503,81
0,58	23,7	19,1	23,7	446,45	415,18	446,45
0,50	15,2	14,3	15,2	326,31	317,71	326,31
0,41	13,1	13,1	13,1	286,94	281,86	286,94
0,32	12,6	12,0	12,6	240,34	233,37	240,34

Na tabela B.31 apresenta resultados das medidas de pressão mínima ( $\bar{P}_{\min}$ ) e da pressão máxima ( $\bar{P}_{\max}$ ), além da diferença entre elas, relativas aos transdutores na posição do *plenum* ( $P_{plenum}$ ), na posição  $z_1$  ( $P_{z1}$ ) e na posição  $z_2$  ( $P_{z2}$ ).

Tabela B.32 - Dados da mínima e máxima da pressão média em todos os testes, e diferenças entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para a mistura (VF-VG)

$\bar{P}_{plenumMáximo} (Pa)$			$\bar{P}_{plenumMínimo} (Pa)$			$\bar{P}_{plenumMáximo} - \bar{P}_{plenumMínimo} (Pa)$		
$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$
4335,2	4339,4	4335,2	741,75	697,83	741,75	3593,45	3641,57	3593,45
$\bar{P}_{z1Máximo} (Pa)$			$\bar{P}_{z1Mínimo} (Pa)$			$\bar{P}_{z1Máximo} - \bar{P}_{z1Mínimo} (Pa)$		
$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$
1526,8	1524,2	1526,8	731,1	688,6	731,1	795,7	835,6	795,7
$\bar{P}_{z2Máximo} (Pa)$			$\bar{P}_{z2Mínimo} (Pa)$			$\bar{P}_{z2Máximo} - \bar{P}_{z2Mínimo} (Pa)$		
$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$
512,65	503,29	512,65	28,845	17,778	28,845	483,805	485,512	483,805

A tabela B.32 apresenta, para cada transdutor de pressão, os resultados do desvio padrão das medidas de pressão mínimo ( $\sigma P_{\min}$ ) e máximo ( $\sigma P_{\max}$ ) além das diferenças entre eles.

Tabela B.32 - Dados da mínima e máxima para a média do desvio padrão da pressão em todos os testes, e diferencias entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para a mistura (VF-VG).

$\sigma$ Máximo no $P_{plenum}$ (Pa)			$\sigma$ Mínimo no $P_{plenum}$ (Pa)			$\sigma$ Máximo - $\sigma$ Mínimo $P_{plenum}$ (Pa)		
$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$
410,2	434,0	410,2	55,9	65,8	69,9	354,3	368,2	340,2
$\sigma$ Máximo no $P_{z1}$ (Pa)			$\sigma$ Mínimo no $P_{z1}$ (Pa)			$\sigma$ Máximo - $\sigma$ Mínimo $P_{z1}$ (Pa)		
$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$
55,4	52,7	55,4	19,4	19,5	19,4	36,0	33,2	36,0
$\sigma$ Máximo no $P_{z2}$ (Pa)			$\sigma$ Mínimo no $P_{z2}$ (Pa)			$\sigma$ Máximo - $\sigma$ Mínimo $P_{z2}$ (Pa)		
$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$	$(PL-VG)_1$	$(PL-VG)_2$	$(PL-VG)_3$
56,1	56,7	56,1	12,4	12,0	12,4	43,7	44,6	43,7

Tabela B.33– Valores médios do desvio padrão e da pressão para cada teste feito, e desvio porcentual, para o material (PL-VG)

Desvio padrão			$\bar{P}_{plenum}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{plenum}$ (%)			$\overline{\Delta P}_{plenum}$ (%)		
$\overline{\sigma P}_{plenum}(Pa)$			(Pa)								
(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>
189,72	248,76	212,68	3549,95	3544,40	3557,13	2,41	4,36	16,05	0,08	0,17	0,08
238,37			3636,05								
Desvio padrão			$\bar{P}_{z1}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{z1}$ (%)			$\overline{\Delta P}_{z1}$ (%)		
$\sigma P_{z1}(Pa)$			(Pa)								
(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>
39,68	36,93	39,68	1417,50	1407,10	1417,50	2,37	4,73	2,37	0,25	0,49	0,25
38,75			1414,03								
Desvio padrão			$\bar{P}_{z2}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{z2}$ (%)			$\overline{\Delta P}_{z2}$ (%)		
$\sigma P_{z1}(Pa)$			(Pa)								
(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>	(PL-VG) <sub>1</sub>	(PL-VG) <sub>2</sub>	(PL-VG) <sub>3</sub>
35,83	33,94	35,83	406,15	389,92	406,15	1,79	3,58	1,79	1,35	2,70	1,35
35,20			400,73								

A tabela B 33 mostra uma ótima repetitividade entre os resultados dos valores médios do desvio padrão e das pressões, para os testes com a mistura (PL-VG), indicando que, assim como para os materiais isolados, os resultados obtidos puderam ser reproduzidos.

**B.5. Pressão média e desvio padrão das medidas de pressão no leito contendo a mistura (PL-VF)**

As tabelas B.34 a B.36 apresentam os resultados obtidos utilizando a mistura de plástico e vidro fino, [testes  $(PL-VF)_1$ ,  $(PL-VF)_2$  e  $(PL-VF)_3$ ], correspondentes ao desvio padrão ( $\sigma P$ ) e a pressão média ( $\bar{P}$ ) medidas para doze diferentes velocidades superficiais do gás, com transdutores situados no plenum (Tab. B.34) em  $z_1$  (Tab. B.35) e em  $z_2$  (Tab. B.36).

Tabela B.34 - Resultados de desvio padrão e pressão média para as medidas no *plenum* utilizando a mistura (PL-VF).

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma$ (Pa)			$\bar{P}_{plenum}$ (Pa)		
	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$
0,40	275,3	294,5	280,5	3285,7	3287,8	3283,0
0,39	217,1	256,4	265,2	3253	3253,6	3248,6
0,38	217,7	219,6	237,7	3220,2	3210,5	3211,4
0,36	160,5	199,6	209,3	3174,9	3179,3	3180,4
0,35	131,9	146,6	143,0	3141,3	3137,4	3132,8
0,34	102,9	131,6	128,1	3105,3	3110,5	3110,7
0,32	75,6	81,9	94,5	3054,4	3066,5	3071,3
0,30	71,2	73,4	73,8	3020,5	3028,5	3030,1
0,28	63,0	67,4	61,5	2963,7	2984,3	2976,9
0,26	65,0	62,1	58,1	2814,7	2841,1	2807,4
0,23	66,3	63,4	66,9	2474,3	2496,9	2507,4
0,19	66,9	65,9	63,6	2008,2	2041,5	2111,7

Tabela B.35 - Resultados de desvio padrão e pressão média para as medidas em  $z_1$  utilizando a mistura (PL-VF).

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma$ (Pa)			$\bar{P}_{z_1}$ (Pa)		
	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>
0,40	30,0	36,8	32,4	1736,2	1727,4	1721,8
0,39	30,3	31,8	32,0	1725	1723,8	1719,1
0,38	27,4	27,7	28,3	1720,4	1713,6	1715
0,36	23,5	25,8	27,9	1710,1	1706,7	1707,6
0,35	20,0	21,4	20,9	1697,6	1695,5	1691,1
0,34	19,1	19,6	20,3	1683,9	1688,5	1688,8
0,32	15,0	16,5	17,8	1667,5	1668,9	1670,6
0,30	14,3	14,2	15,5	1654,9	1654,5	1655,6
0,28	12,5	13,2	13,0	1637,4	1640,5	1637,2
0,26	11,4	11,5	11,3	1558,9	1571,1	1558,7
0,23	11,4	11,4	11,6	1375,1	1384,7	1390
0,19	11,3	11,6	11,4	1104,7	1122,2	1165

Tabela B.36 - Resultados de desvio padrão e pressão média para as medidas em  $z_2$  utilizando a mistura (PL-VF).

$U_o$ (m/s)	Desvio padrão $\sigma$ (Pa)			$\bar{P}_{z_2}$ (Pa)		
	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>
0,40	43,8	43,5	44,5	783,38	771,82	782,11
0,39	44,3	40,2	42,1	779,91	763,3	750,96
0,38	43,0	37,2	40,6	776,38	759,44	758,88
0,36	35,6	37,5	37,3	751,15	744,35	749,2
0,35	32,1	31,8	34,2	729,53	724,96	721,22
0,34	28,6	28,4	28,9	709,47	702,73	699,01
0,32	27,2	24,6	27,8	687,65	684,19	682,63
0,30	24,5	23,6	25,4	665,17	659,13	652,18
0,28	22,9	23,1	23,4	619,27	623,77	600,42
0,26	22,4	20,7	20,9	549,56	562,21	514,92
0,23	22,3	20,5	21,4	455,98	469,83	456,14
0,19	22,6	20,4	21,0	348,2	367,39	353,07

Na tabela B.37 apresenta resultados das medidas de pressão mínima ( $\bar{P}_{\min}$ ) e da pressão máxima ( $\bar{P}_{\max}$ ), além da diferença entre elas, relativas aos transdutores na posição do *plenum* ( $P_{plenum}$ ), na posição  $z_1$  ( $P_{z1}$ ) e na posição  $z_2$  ( $P_{z2}$ ).

Tabela B.37 - Dados da mínima e máxima da pressão média em todos os testes, e diferenças entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para a mistura (PL-VF)

$\bar{P}_{plenumMáximo} (Pa)$			$\bar{P}_{plenumMínimo} (Pa)$			$\bar{P}_{plenumMáximo} - \bar{P}_{plenumMínimo} (Pa)$		
$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$
3295,7	3303,8	3295,7	1675,1	1775	1778,7	1620,6	1528,8	1517
$\bar{P}_{z1Máximo} (Pa)$			$\bar{P}_{z1Mínimo} (Pa)$			$\bar{P}_{z1Máximo} - \bar{P}_{z1Mínimo} (Pa)$		
$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$
1736,2	1730,4	1726,5	1187,2	1220,8	1251,9	549,0	509,6	474,6
$\bar{P}_{z2Máximo} (Pa)$			$\bar{P}_{z2Mínimo} (Pa)$			$\bar{P}_{z2Máximo} - \bar{P}_{z2Mínimo} (Pa)$		
$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$
788,01	777	788,01	273,99	295,83	281,02	514,02	481,17	506,99

A tabela B.38 apresenta, para cada transdutor de pressão, os resultados do desvio padrão das medidas de pressão mínima ( $\sigma P_{\min}$ ) e máxima ( $\sigma P_{\max}$ ) além das diferenças entre eles.

Tabela B.38 - Dados da mínima e máxima para a média do desvio padrão da pressão em todos os testes, e diferenças entre o máximo e mínimo para os transdutores  $P_{plenum}$ ,  $P_{z1}$  e  $P_{z2}$ , para a mistura (PL-VF).

$\sigma$ Máximo no $P_{plenum}$ (Pa)			$\sigma$ Mínimo no $P_{plenum}$ (Pa)			$\sigma$ Máximo - $\sigma$ Mínimo $P_{plenum}$ (Pa)		
$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$
275,3	306,8	275,3	62,7	60,9	58,1	212,6	245,9	217,2
$\sigma$ Máximo no $P_{z1}$ (Pa)			$\sigma$ Mínimo no $P_{z1}$ (Pa)			$\sigma$ Máximo - $\sigma$ Mínimo $P_{z1}$ (Pa)		
$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$
34,3	36,8	34,3	11,2	11,2	11,2	23,1	25,6	23,1
$\sigma$ Máximo no $P_{z2}$ (Pa)			$\sigma$ Mínimo no $P_{z2}$ (Pa)			$\sigma$ Máximo - $\sigma$ Mínimo $P_{z2}$ (Pa)		
$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$	$(PL-VF)_1$	$(PL-VF)_2$	$(PL-VF)_3$
45,0	43,9	45,0	21,8	20,0	20,9	23,2	23,9	24,2

Tabela B.39– Valores médios do desvio padrão e da pressão para cada teste feito, e desvio porcentual, para o material (PL-VF)

Desvio padrão			$\bar{P}_{plenum}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{plenum} (\%)$			$\overline{\Delta P}_{plenum} (\%)$		
$\overline{\sigma P}_{plenum}(Pa)$			$(Pa)$								
(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>
126,,12	138,53	140,18	2959,68	2969,83	2972,64	6,54	2,66	3,88	0,26	0,08	0,18
134,94			2967,38								
Desvio padrão			$\bar{P}_{z1}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{z1} (\%)$			$\overline{\Delta P}_{z1} (\%)$		
$\sigma P_{z1}(Pa)$			$(Pa)$								
(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>
18,,85	20,13	20,20	1605,98	1608,12	1610,04	4,44	2,03	2,41	0,13	0,00	0,12
19,73			1608,04								
Desvio padrão			$\bar{P}_{z2}$			$\overline{\Delta\sigma P}_{z2} (\%)$			$\overline{\Delta P}_{z2} (\%)$		
$\sigma P_{z1}(Pa)$			$(Pa)$								
(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>	(PL-VF) <sub>1</sub>	(PL-VF) <sub>2</sub>	(PL-VF) <sub>3</sub>
30,,78	29,29	30,63	654,64	652,76	643,40	1,80	3,11	1,30	0,67	0,38	1,06
30,23			650,26								

A tabela B 39 mostra uma ótima repetitividade entre os resultados dos valores médios do desvio padrão e das pressões, para os testes com a mistura (PL-VF), indicando que, assim como para os materiais isolados e para as outras duas misturas binárias estudadas, os resultados obtidos puderam ser reproduzidos.

# APÊNDICE C - RESULTADOS DOS TESTES FLUIDODINÂMICOS

## C.1. Ensaio com os materiais isolados

Neste apêndice são apresentadas as figuras correspondentes aos ensaios 1, 2 e 3 de cada material isolado.

Os resultados destes testes são apresentados na Tab. 6.10 do capítulo 6 desta dissertação.

### C.1.1. Ensaio com microesferas de vidro fino

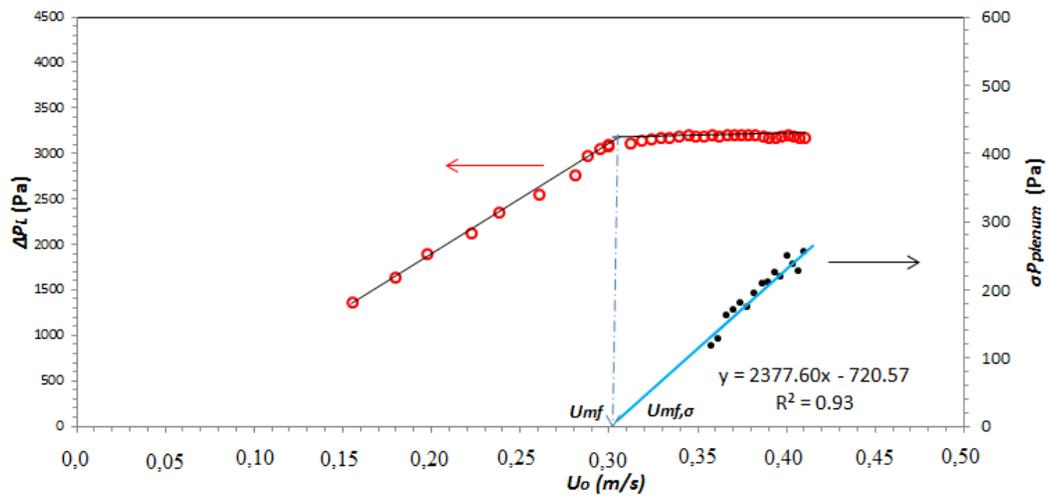


Figura C.1 – Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  (material vidro fino, teste  $VF_1$ ).

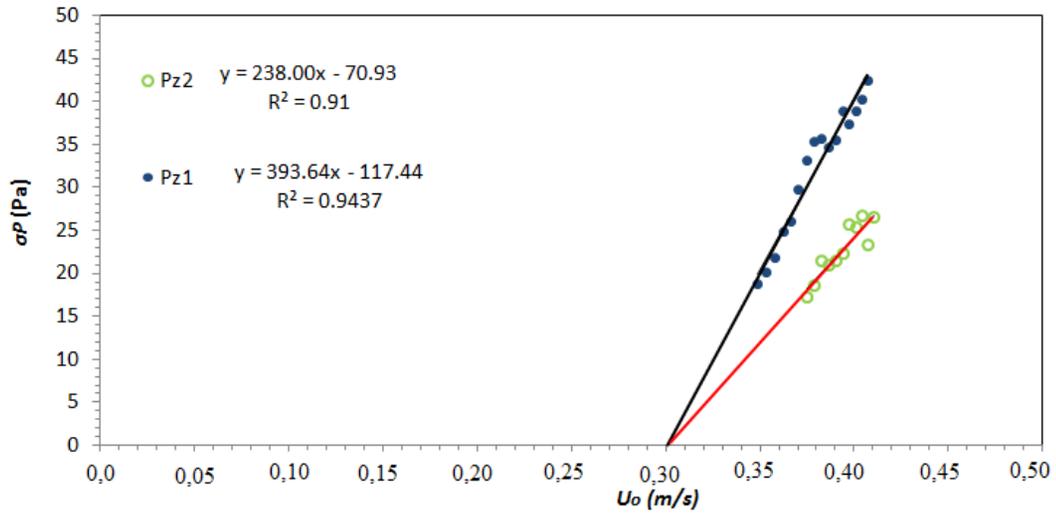


Figura C.2 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás (material vidro fino, teste  $VF_1$ )

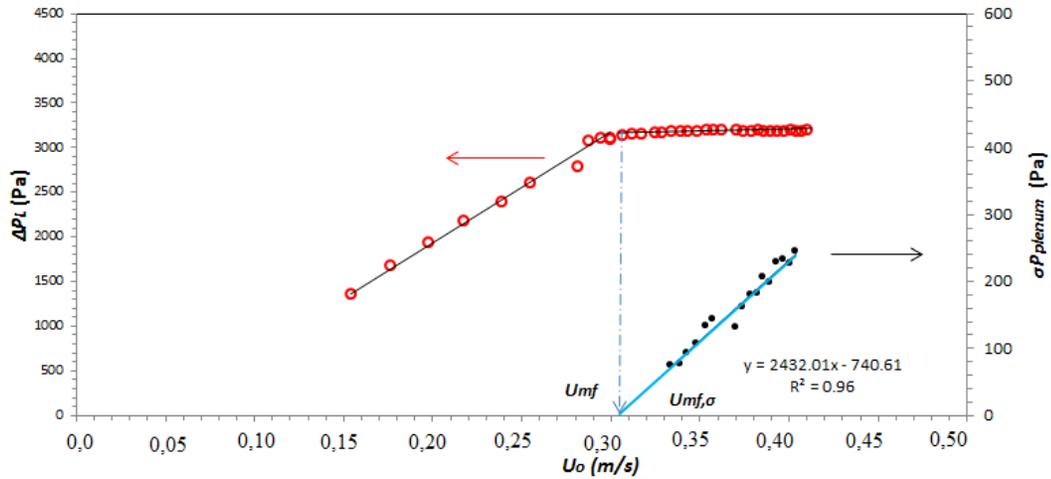


Figura C.3 – Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  (material vidro fino, teste  $VF_2$ ).

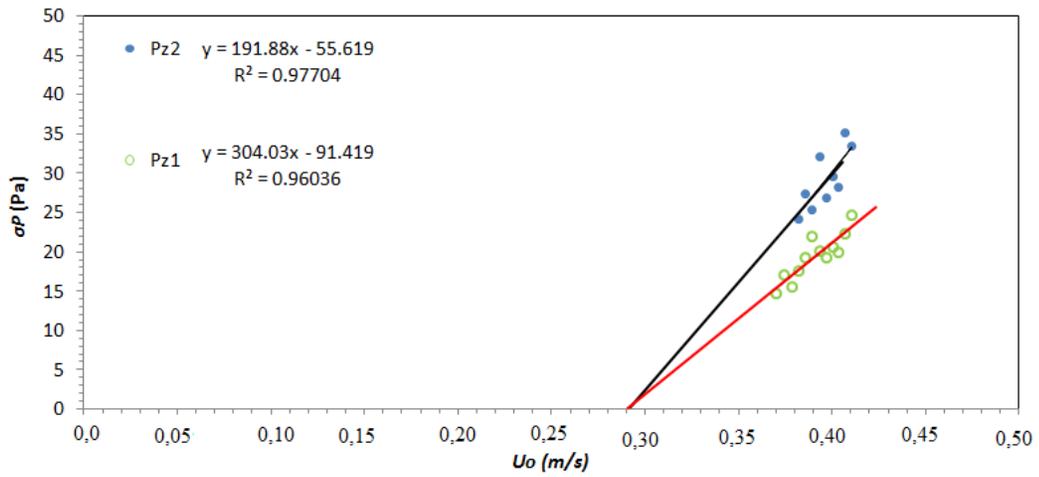


Figura C.4 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás (material vidro fino, teste  $VF_2$ )

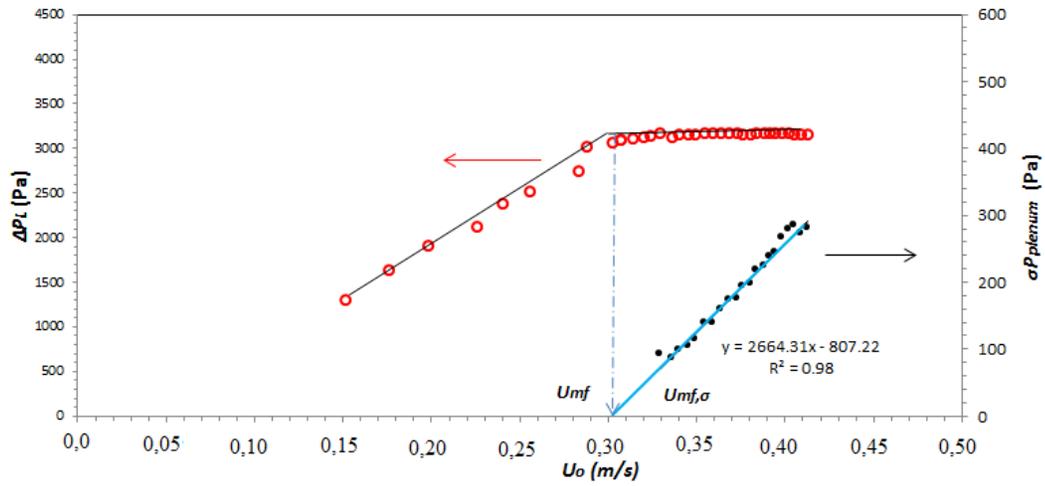


Figura C.5 – Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  (material vidro fino, teste  $VF_3$ ).

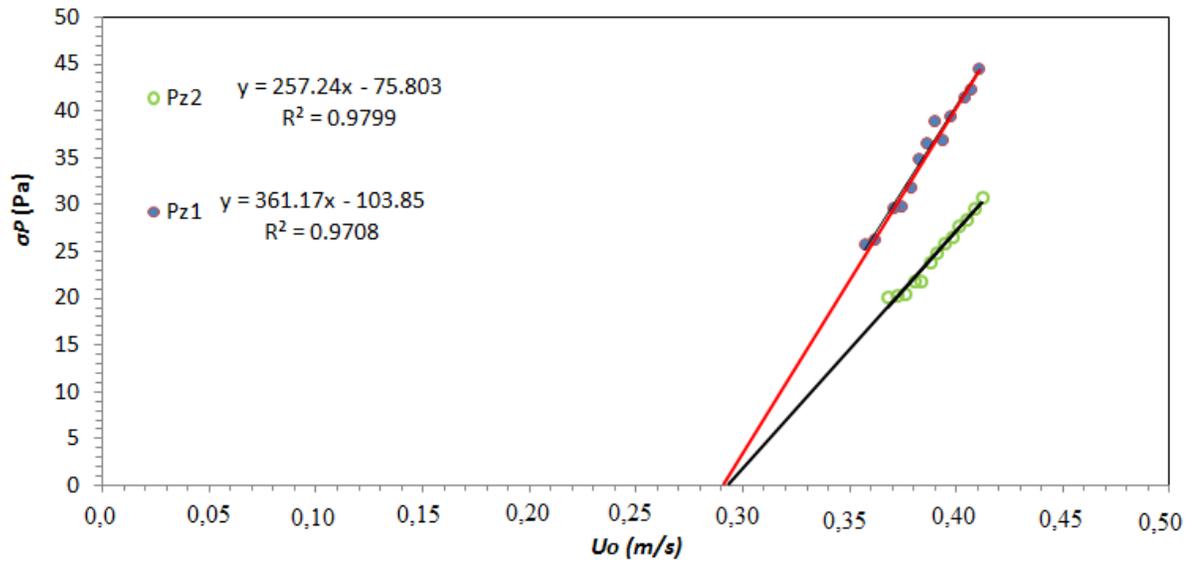


Figura C.6 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás (material vidro fino, teste  $VF_3$ )

### C.1.2. Ensaio com microesferas de vidro grosso

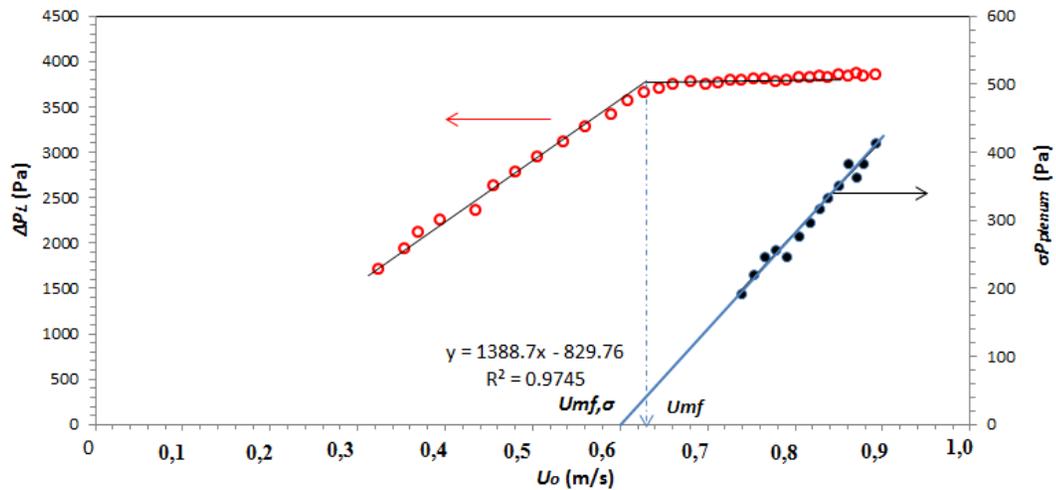


Figura C.7 – Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  (material vidro grosso, teste  $VG_1$ )

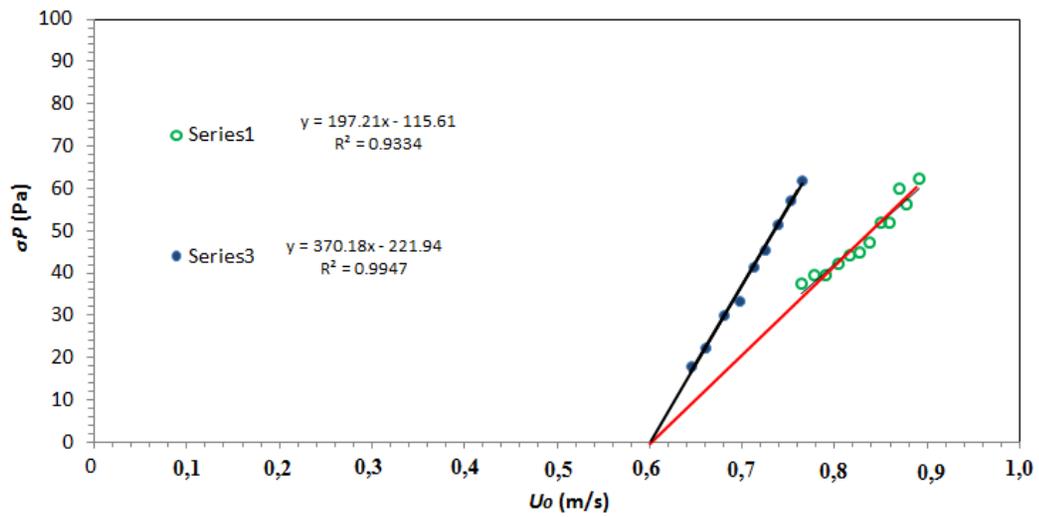


Figura C.8 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás (material vidro grosso, teste  $VG_1$ )

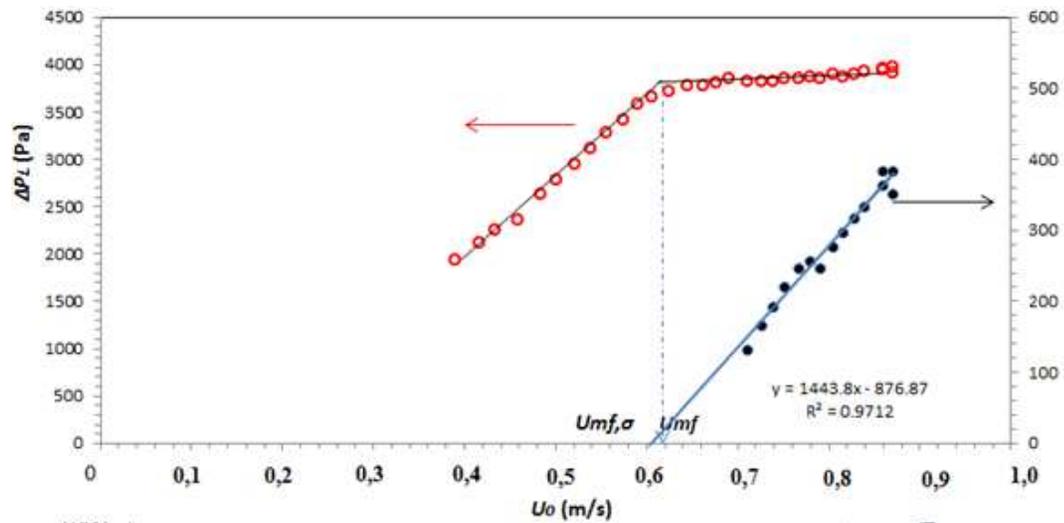


Figura C.9 – Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  (material vidro grosso, teste  $VG_2$ )

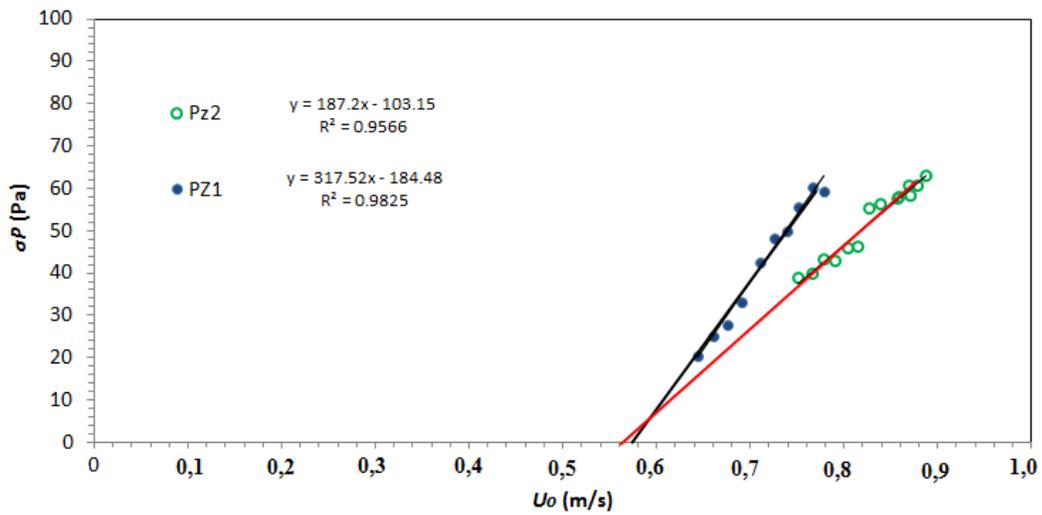


Figura C.10 - Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás (material vidro grosso, teste  $VG_2$ )

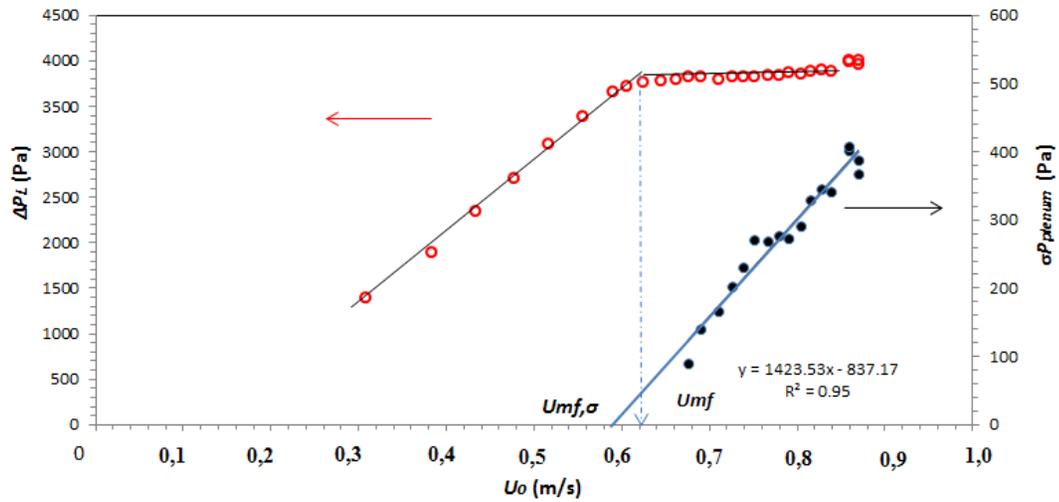


Figura C.11 – Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  (material vidro grosso, teste  $VG_3$ ).

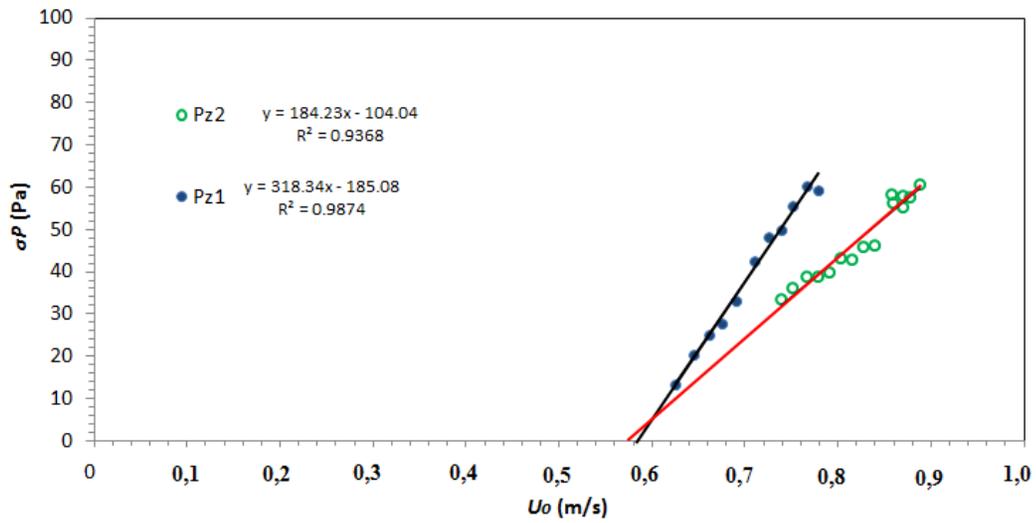


Figura C.12 – Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás (material vidro grosso, teste  $VG_3$ ).

### C.1.3. Ensaio com microesferas de plástico

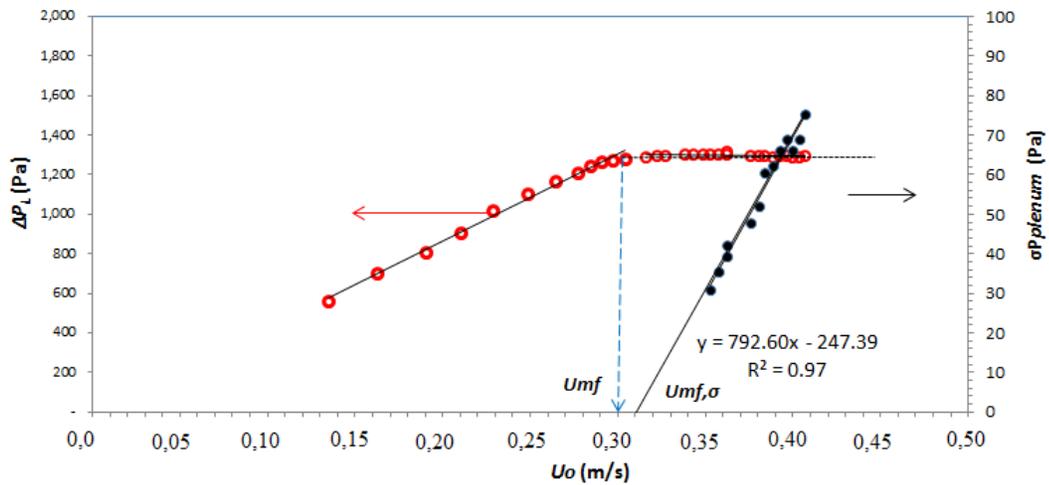


Figura C.13 – Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  (material plástico, teste  $PL_1$ ).

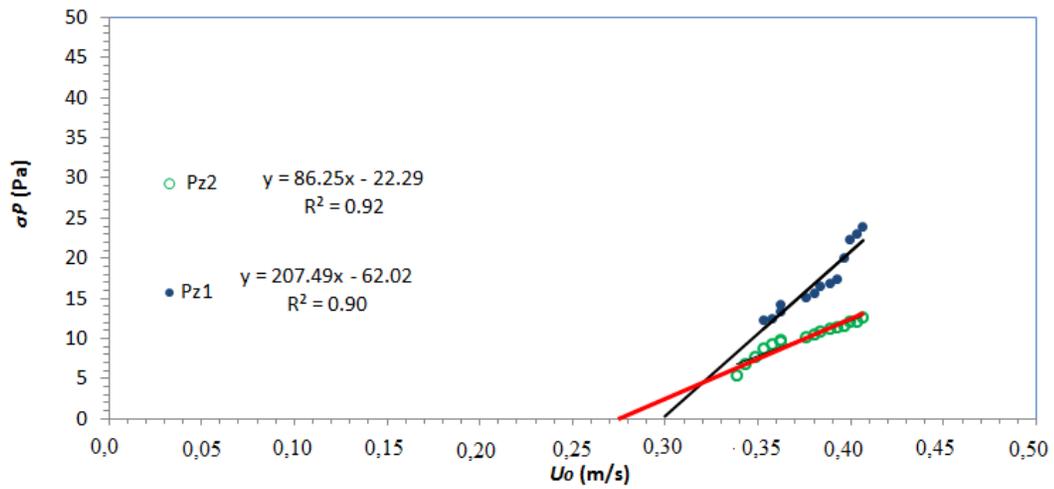


Figura C.14 – Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás (material plástico, teste  $PL_1$ ).

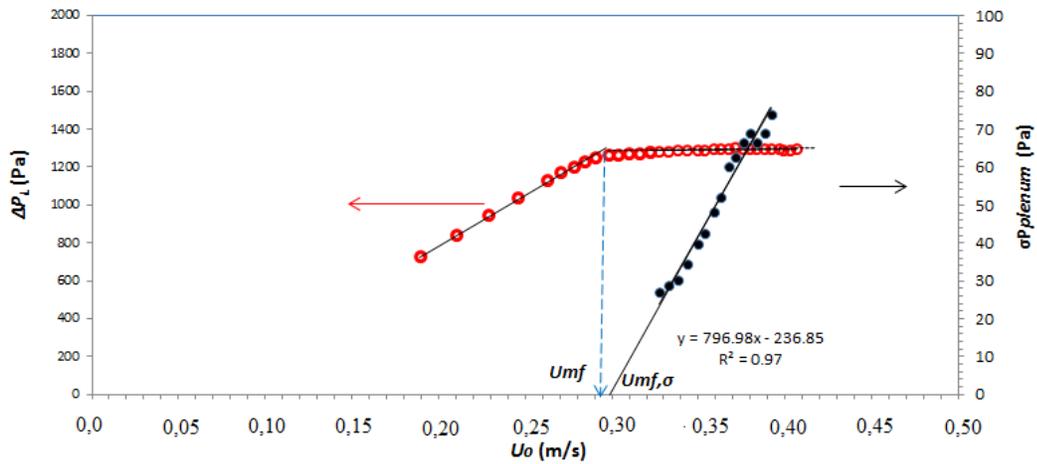


Figura C.15 – Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  (material plástico, teste  $PL_2$ ).

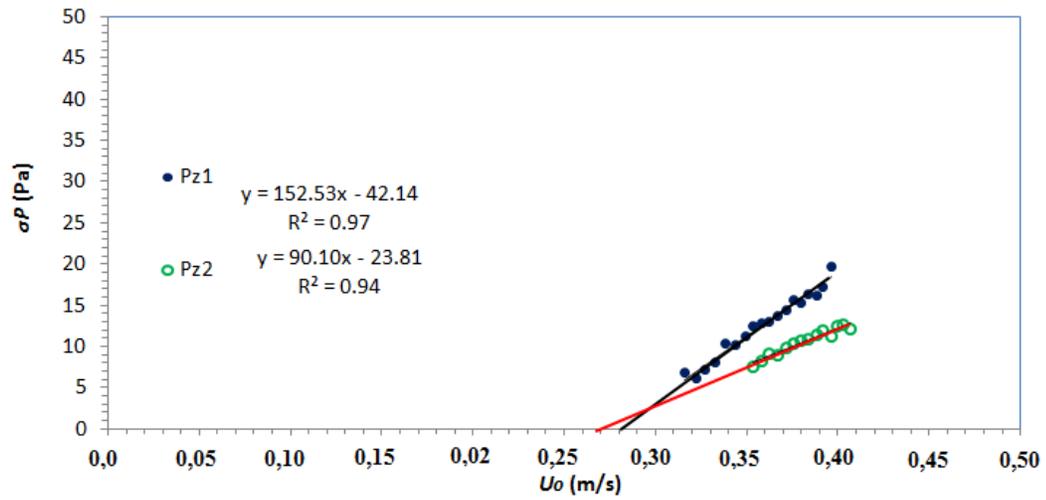


Figura C.14 – Desvio padrão das medidas de pressão em  $z_1$  e  $z_2$  em função da velocidade superficial do gás (material plástico, teste  $PL_2$ ).

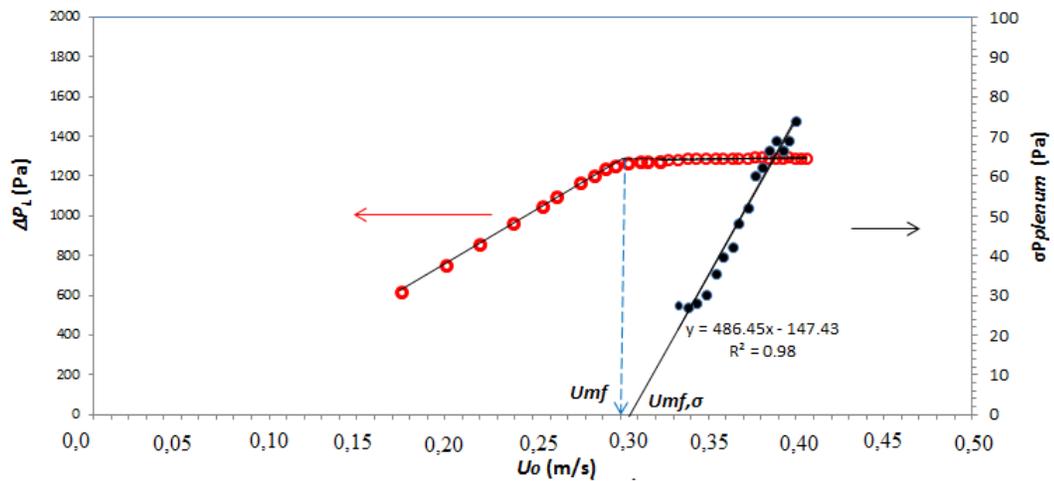


Figura C.15 – Queda de pressão no leito e desvio padrão das medidas de pressão no *plenum* como função da  $U_o$  (material plástico, teste  $PL_3$ ).

## C.2. Ensaio com Misturas Binárias

Neste apêndice são apresentadas as figuras correspondentes as repetições 2 e 3 de cada mistura nela se apresentam as velocidades inerentes ao fenômeno de segregação num processo de fluidização de uma mistura binária.

Os resultados destes testes são apresentados na tabela 6.11 do capítulo 6 de resultados e discussões:  $u_{mf}$  e análises no domínio do tempo

### C.2.1. Ensaio com a mistura de vidro fino (5%) e vidro grosso (95%)

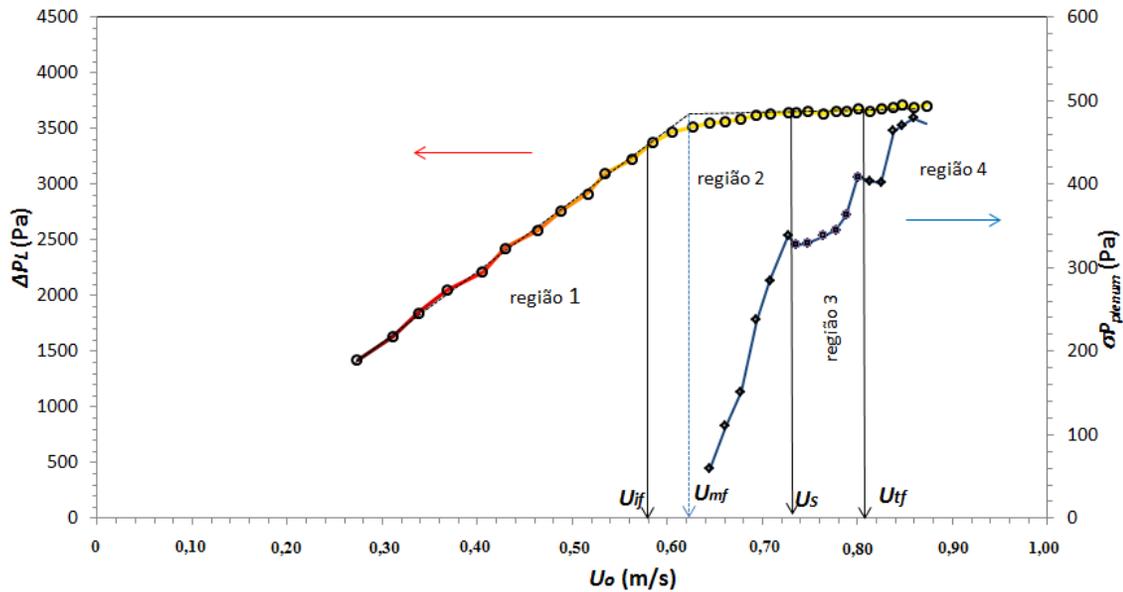


Figura C.17 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos no *plenum* em função da velocidade superficial do gás, mistura (VF-VG)<sub>1</sub>

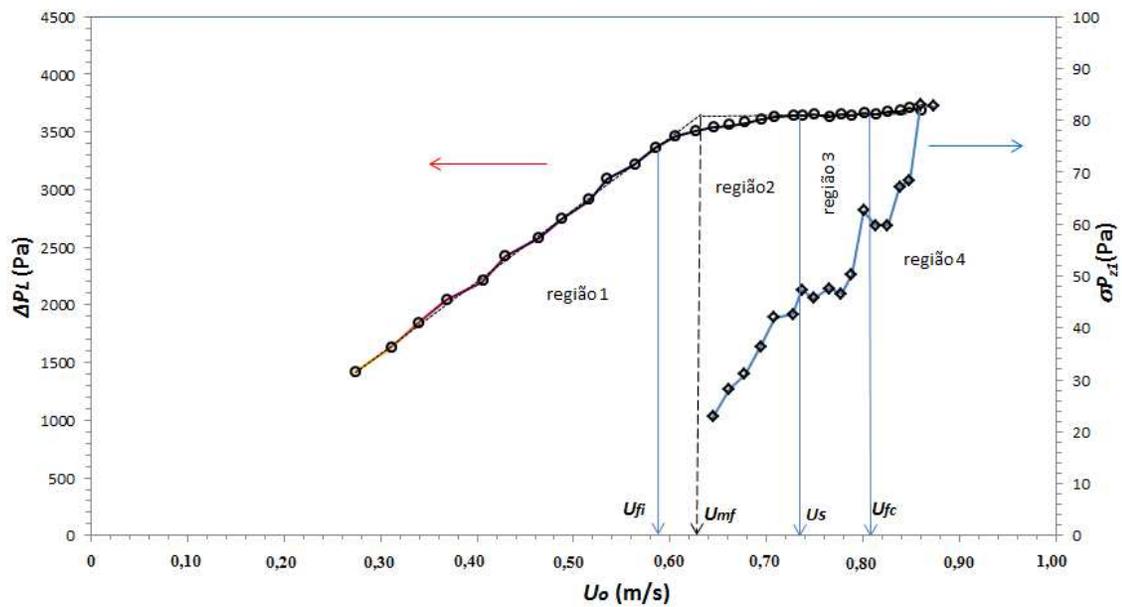


Figura C.18 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z1}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura (VF-VG)<sub>1</sub>.

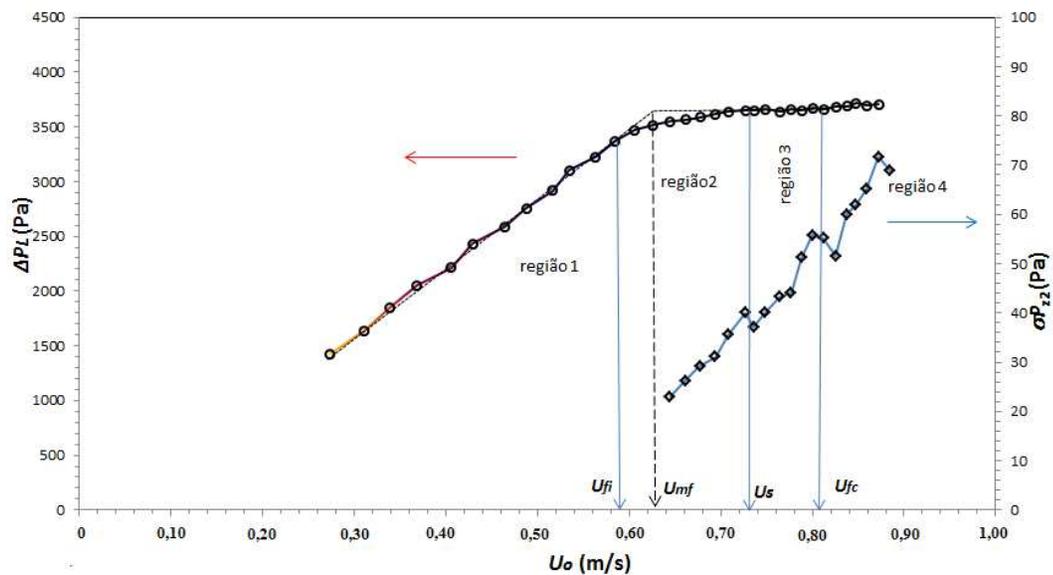


Figura C.19 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z2}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura (VF-VG)<sub>1</sub>.

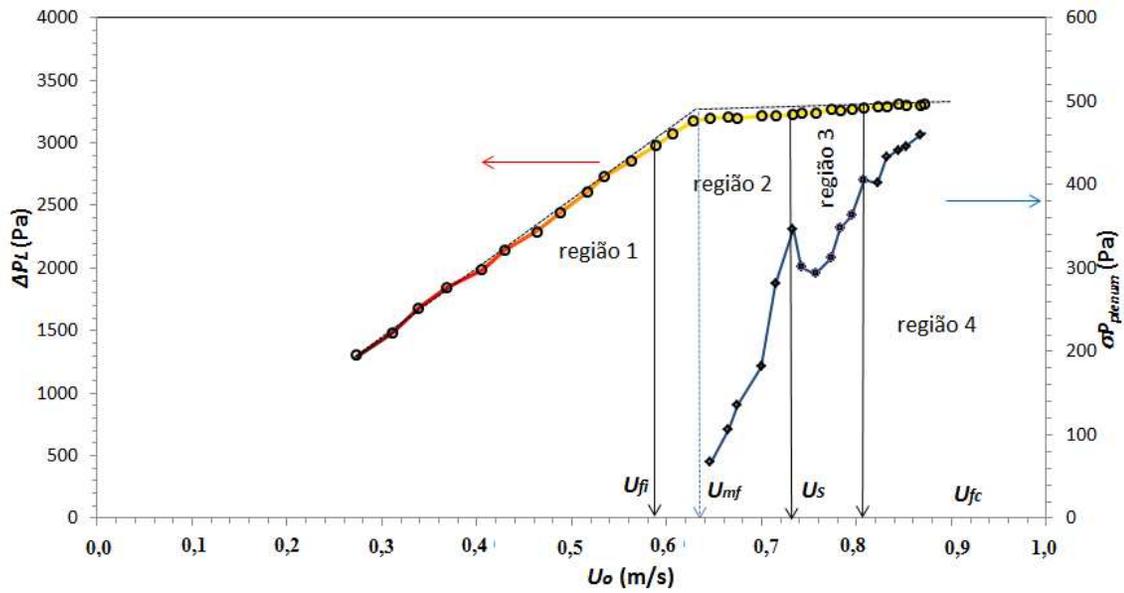


Figura C.20 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos no  $plenum$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(VF-VG)_2$ .

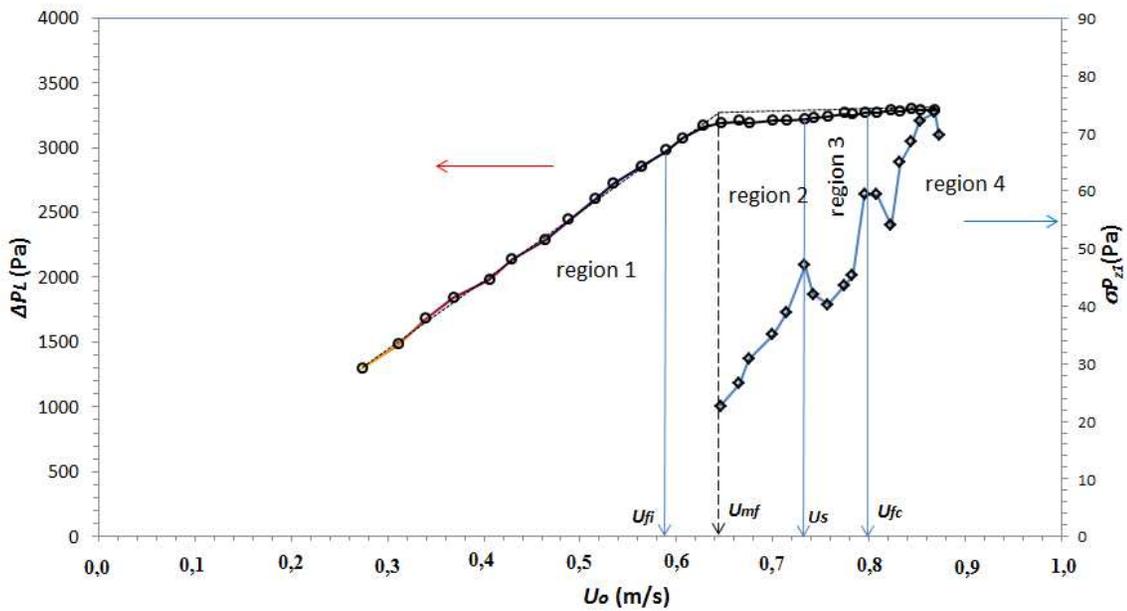


Figura C.21 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z1}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(VF-VG)_2$ .

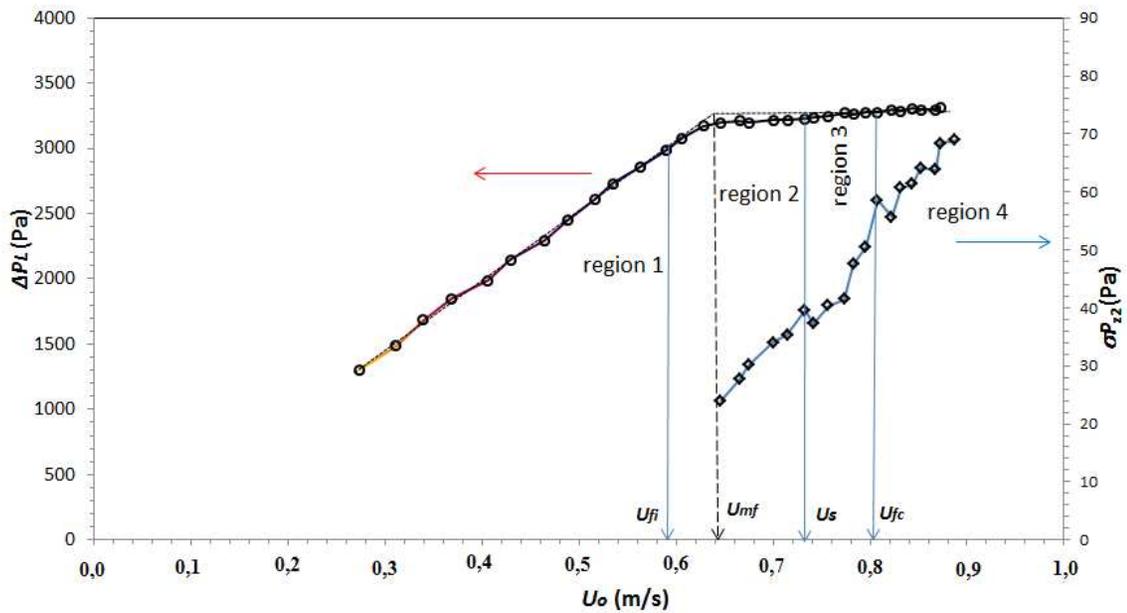


Figura C.22 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{22}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(VF-VG)_2$ .

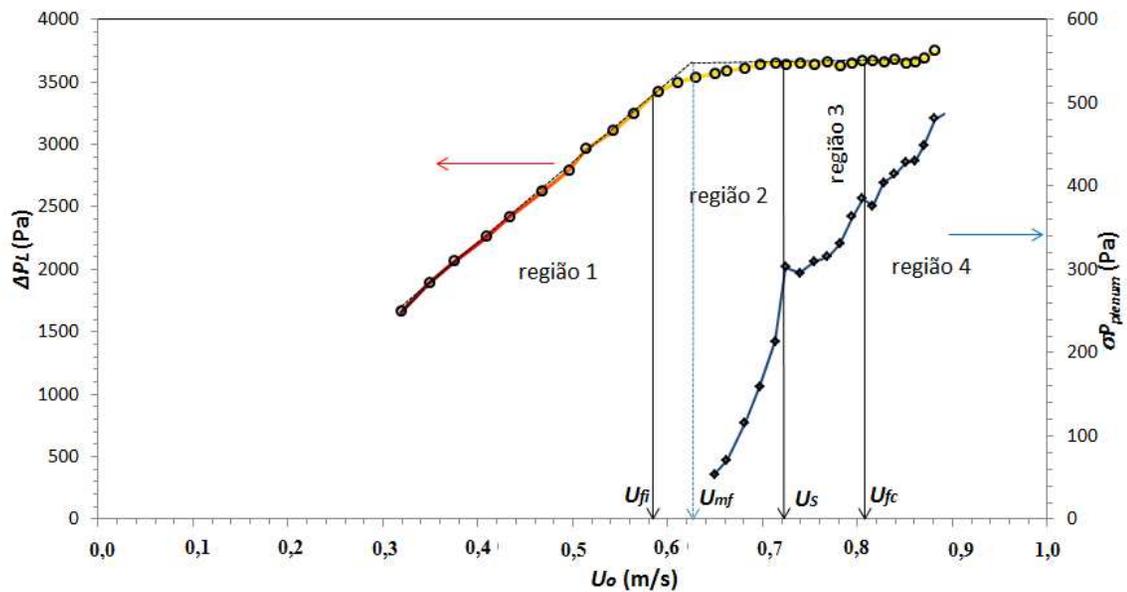


Figura C.23 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos no *plenum* em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(VF-VG)_3$ .

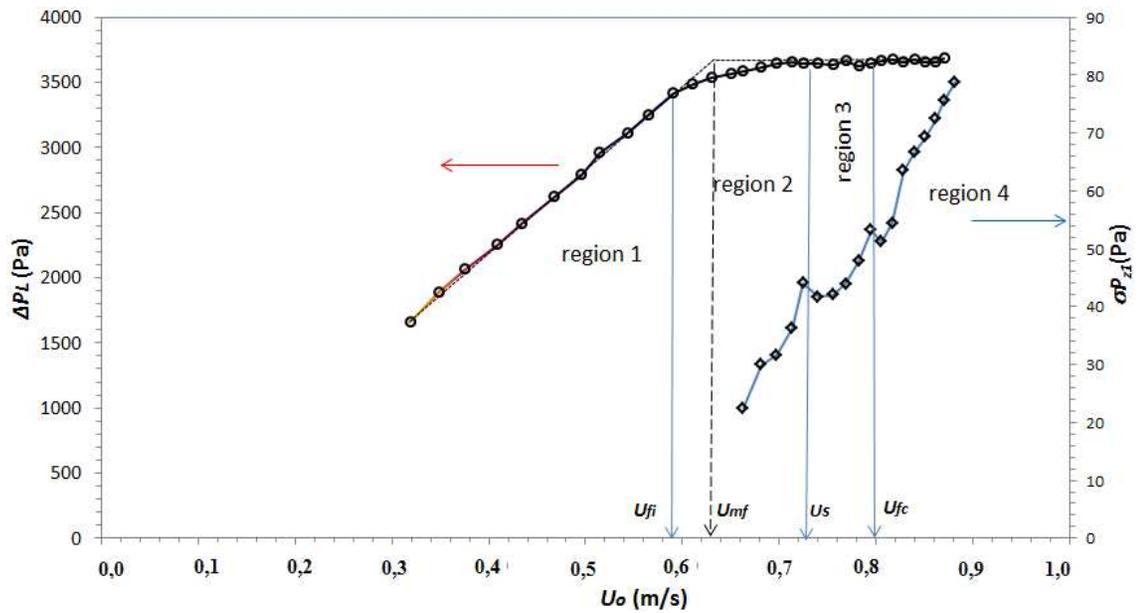


Figura C.24 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z1}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(VF-VG)_3$ .

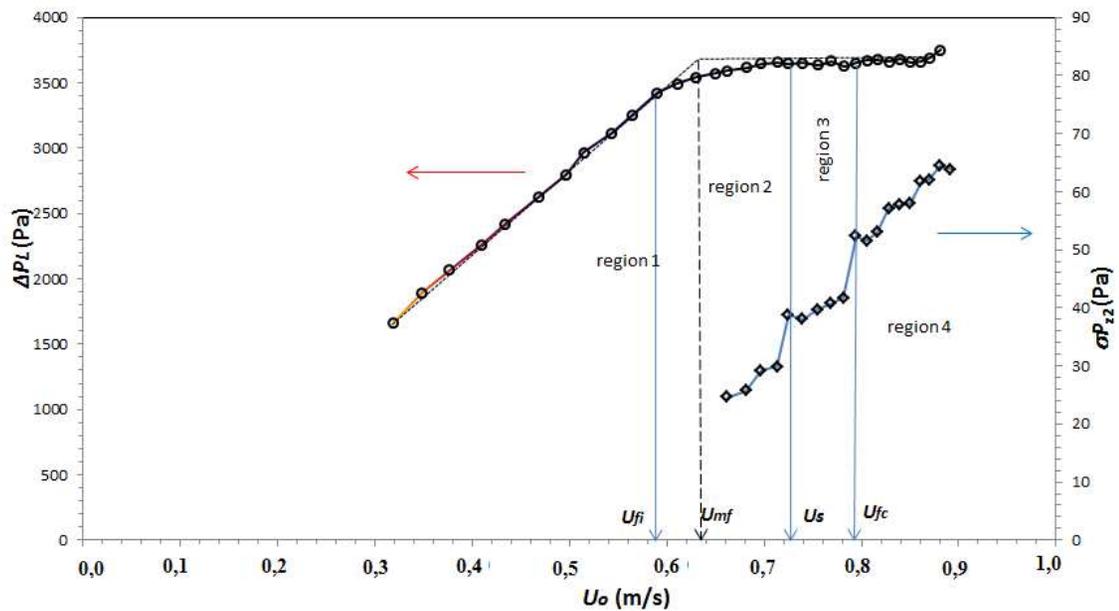


Figura C.25 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z2}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(VF-VG)_3$ .

C.2.2. Ensaio com a mistura de plástico (5%) e vidro grosso (95%)

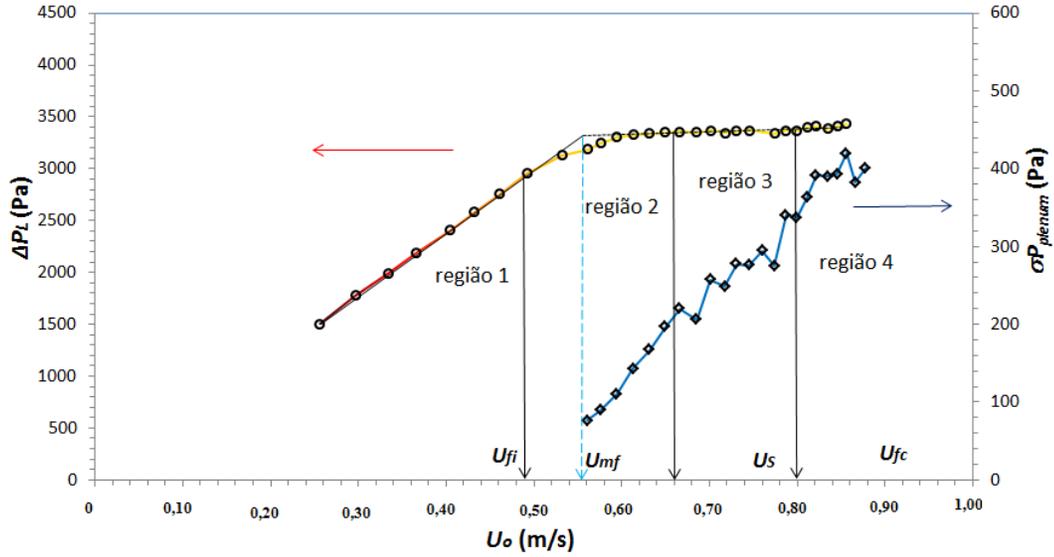


Figura C.26 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos no *plenum* em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VG)_I$ .

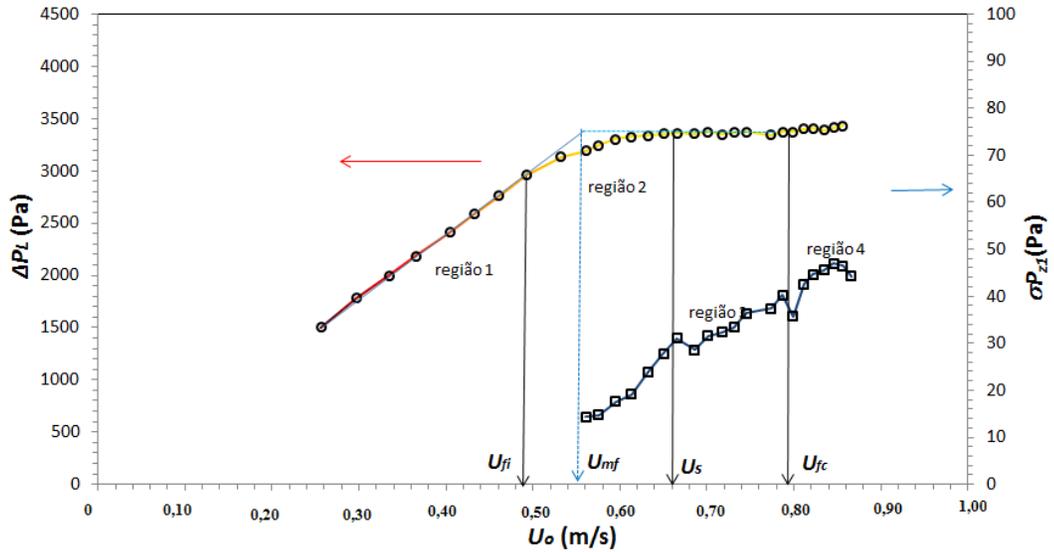


Figura C.27 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z1}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VG)_I$ .

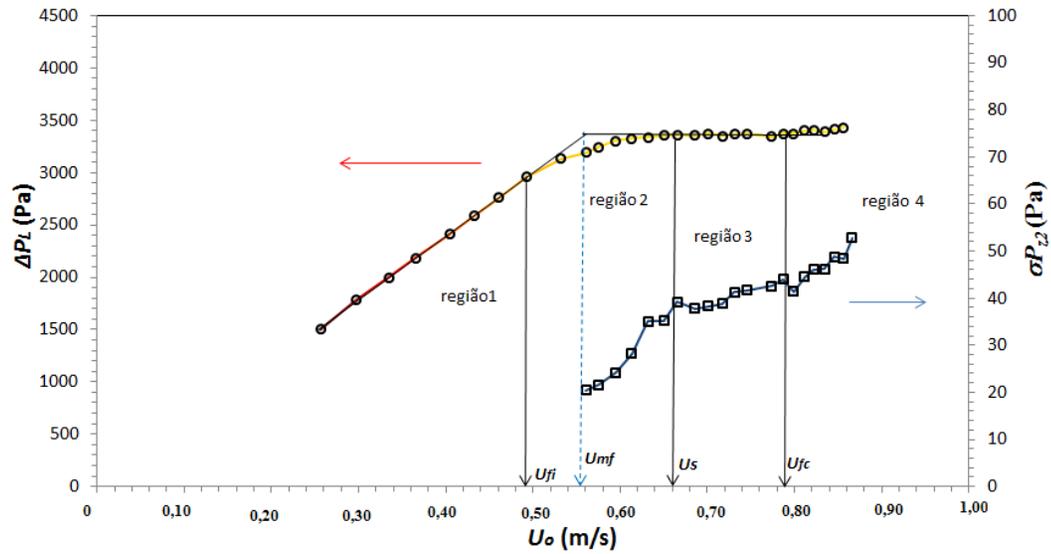


Figura C.28 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z2}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VG)_1$

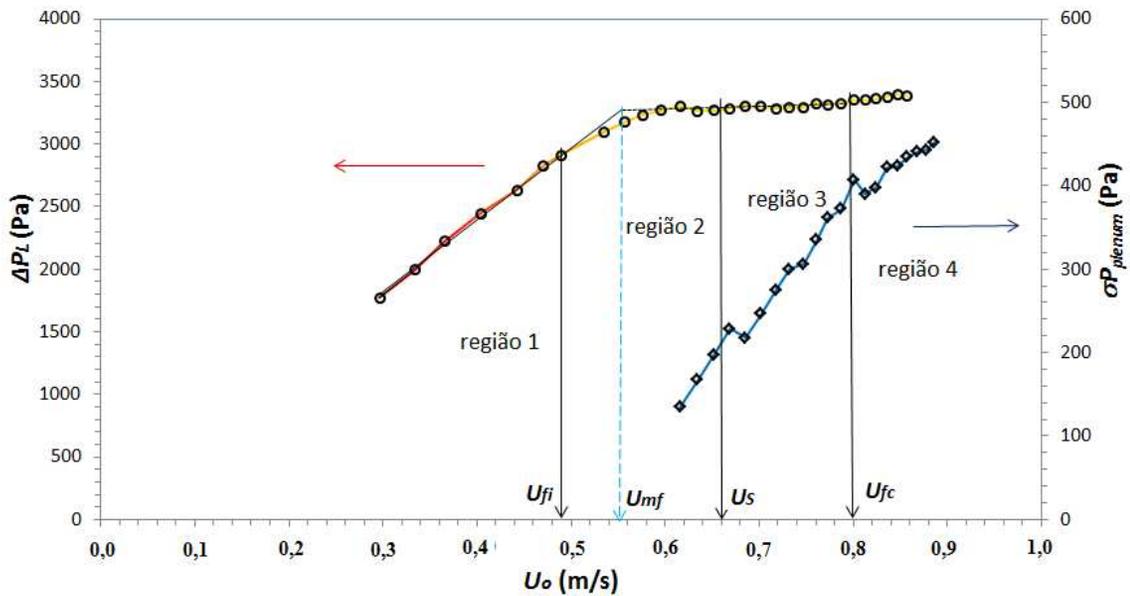


Figura C.29 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos no *plenum* em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VG)_2$ .

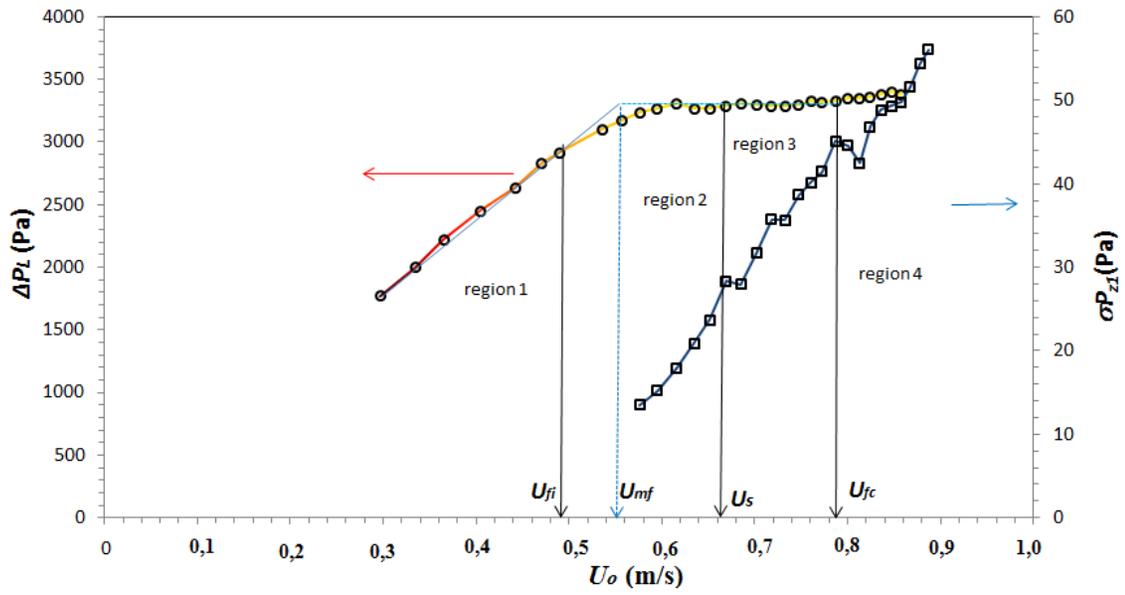


Figura C.30 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z1}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VG)_2$

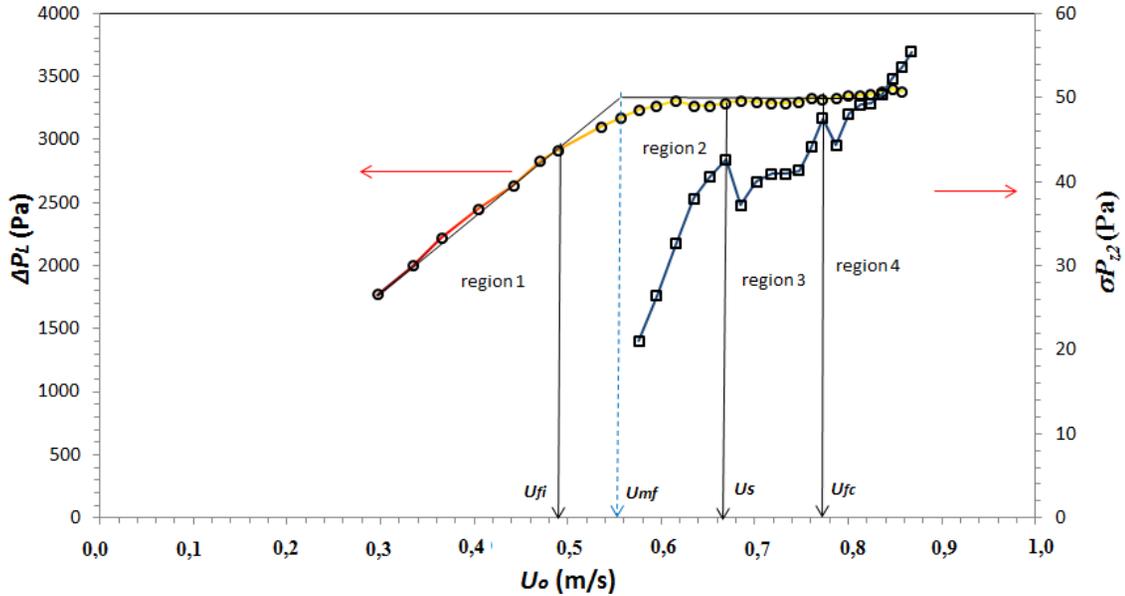


Figura C.31 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z2}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VG)_2$

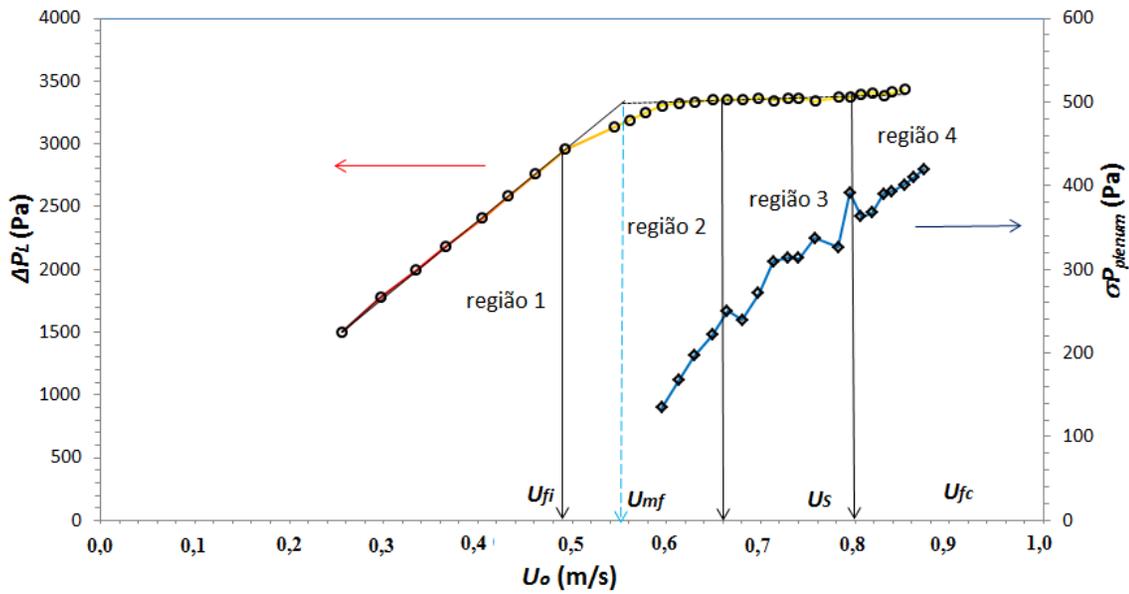


Figura C.32 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos no *plenum* em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VG)_3$ .

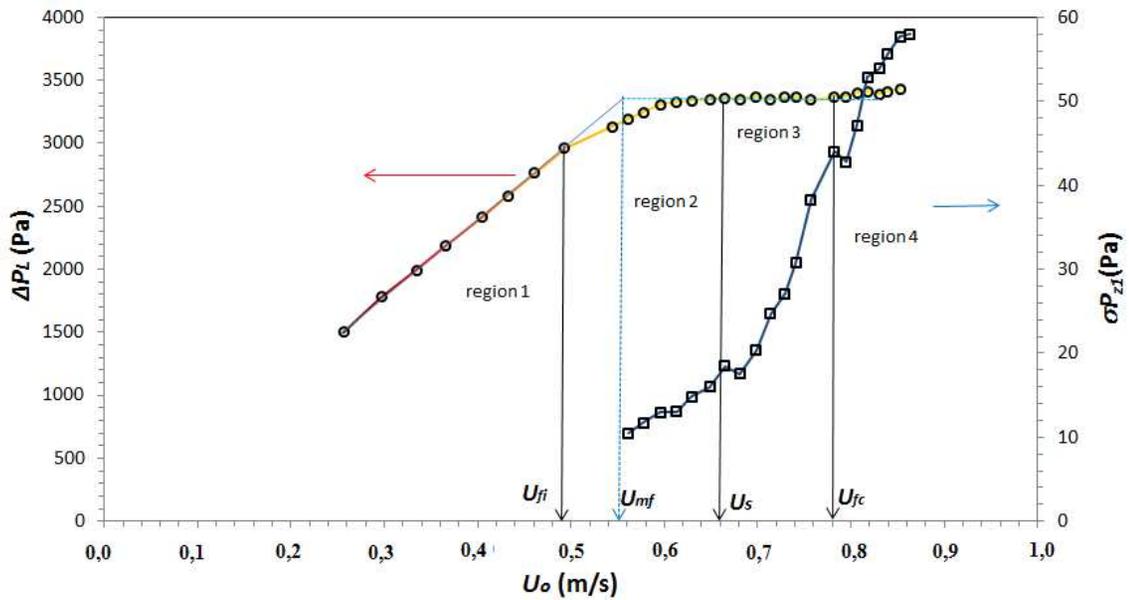


Figura C.33 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z1}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VG)_3$

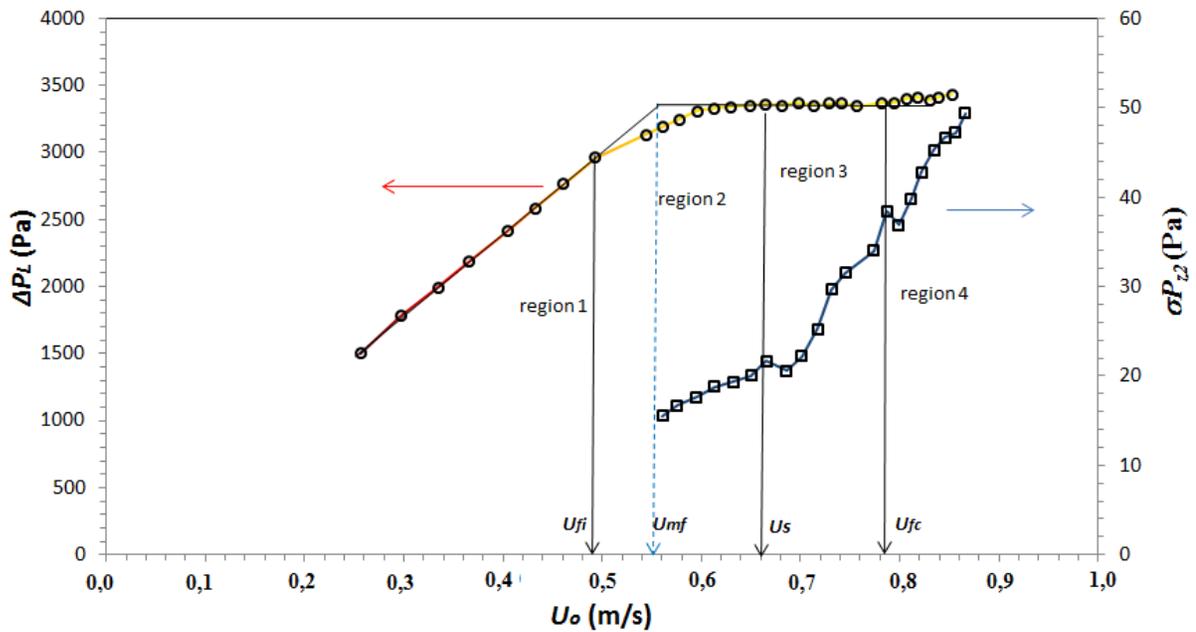


Figura C.34 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z2}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VG)_3$

### C.2.3. Ensaios com a mistura plástico (5%) e vidro fino (95%)

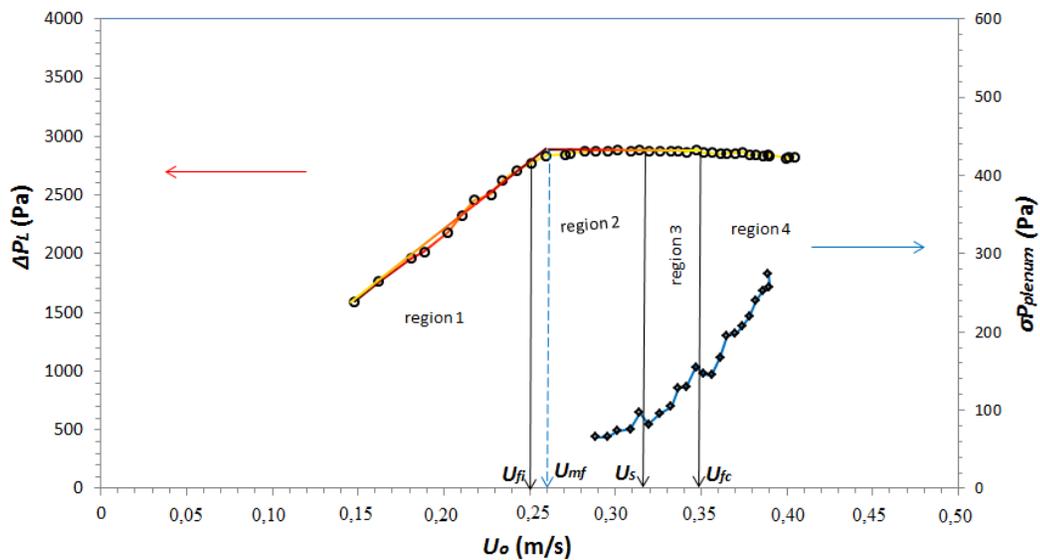


Figura C.35 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos no *plenum* em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VF)_1$ .

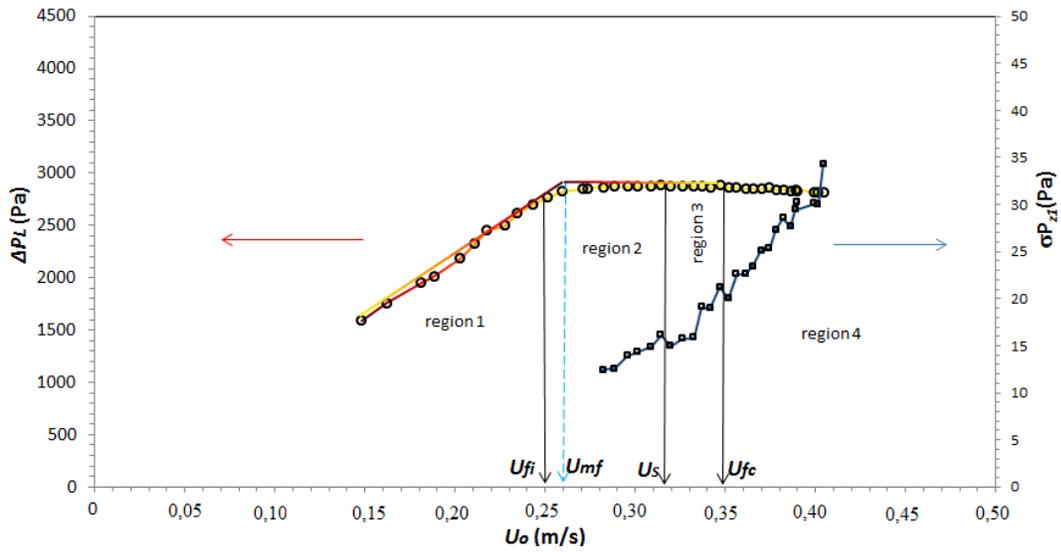


Figura C.36 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z1}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VF)_1$

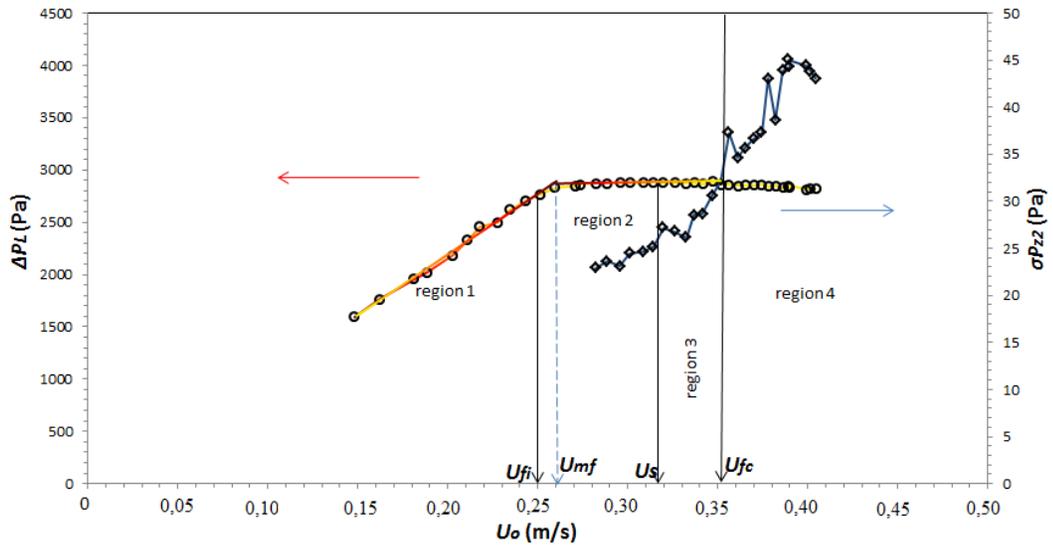


Figura C.37 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z2}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VF)_1$

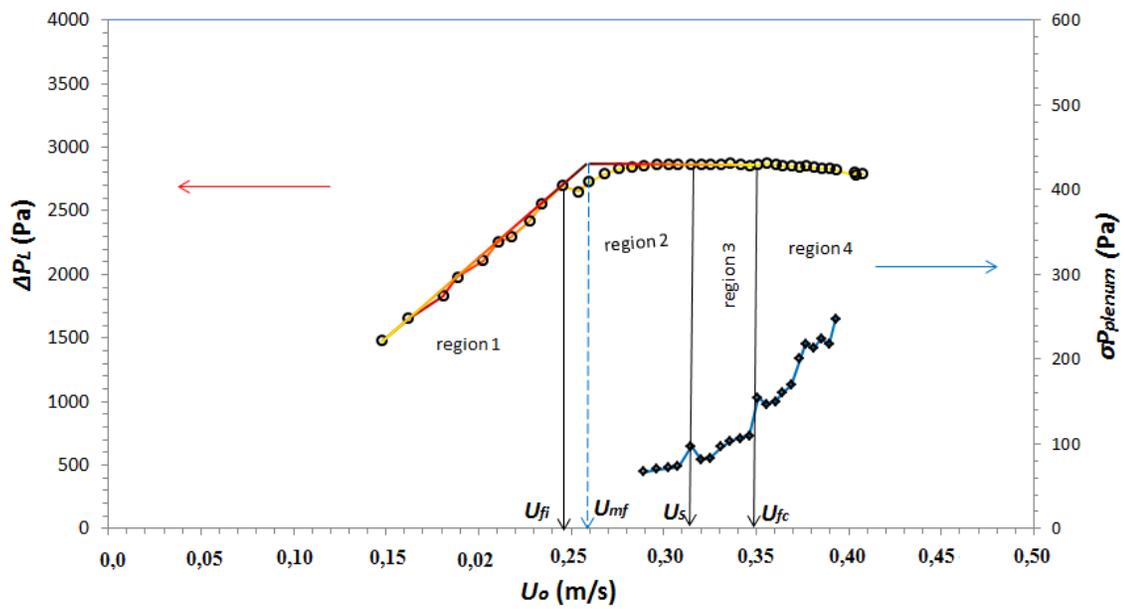


Figura C.38 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos no *plenum* em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VF)_2$ .

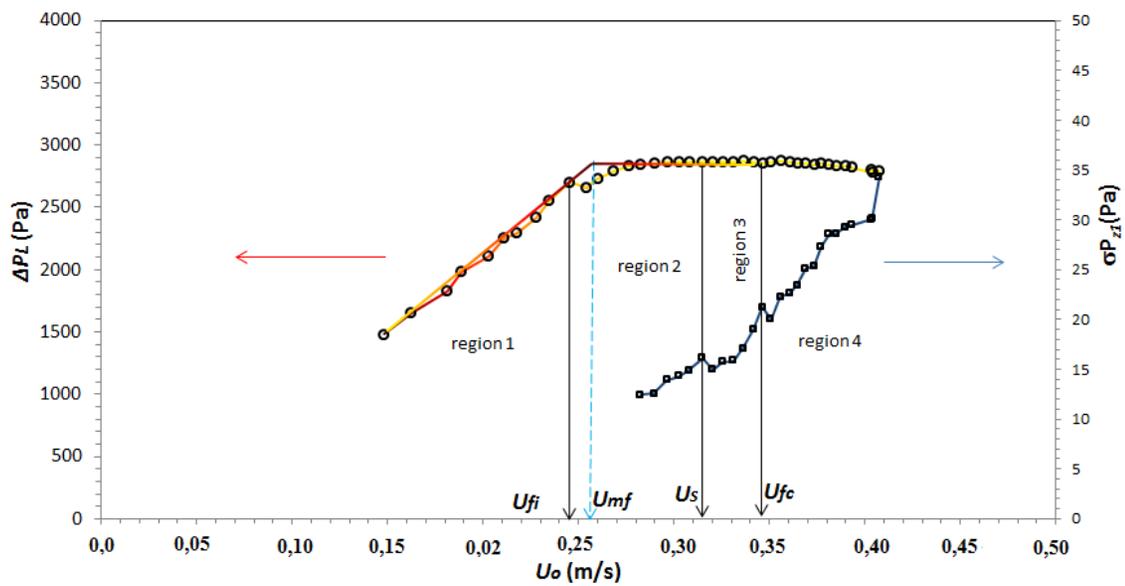


Figura C.39 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z1}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VF)_2$ .

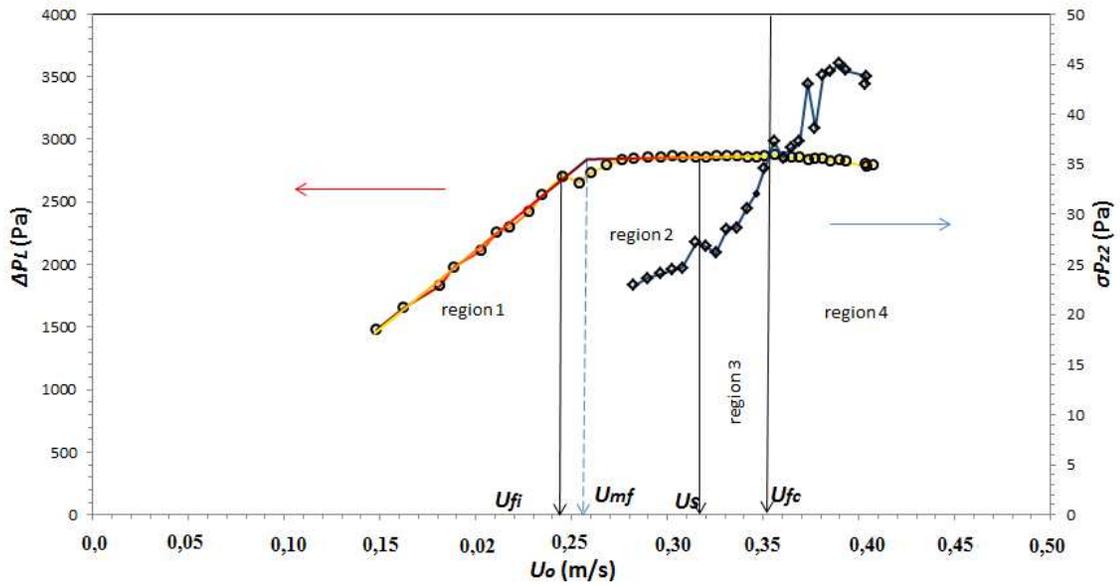


Figura C.40 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z2}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VF)_2$

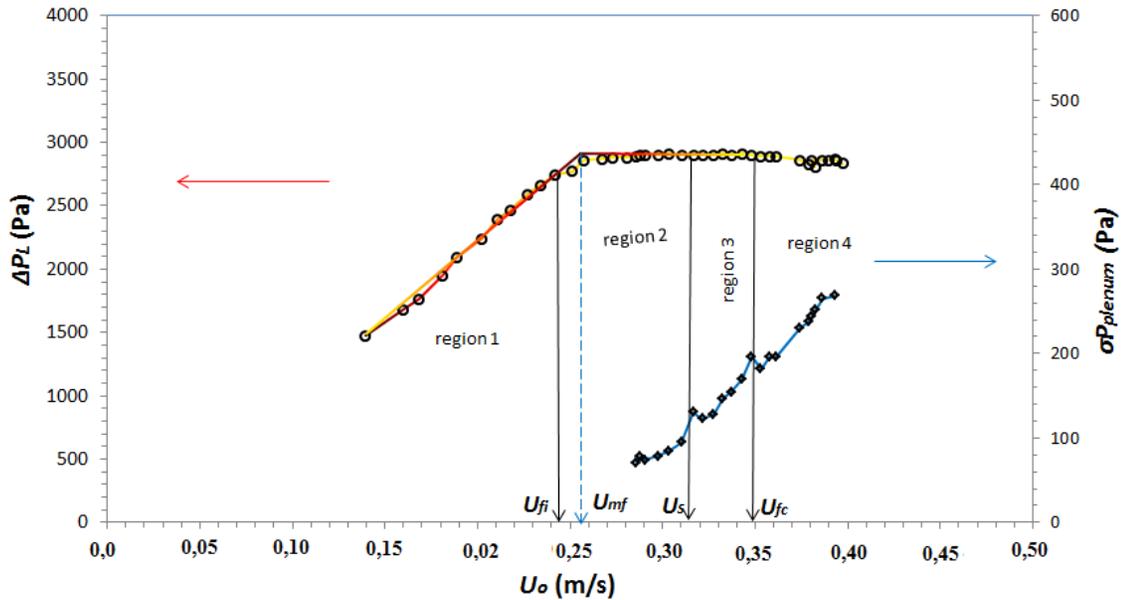


Figura C.41 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos no *plenum* em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VF)_3$ .

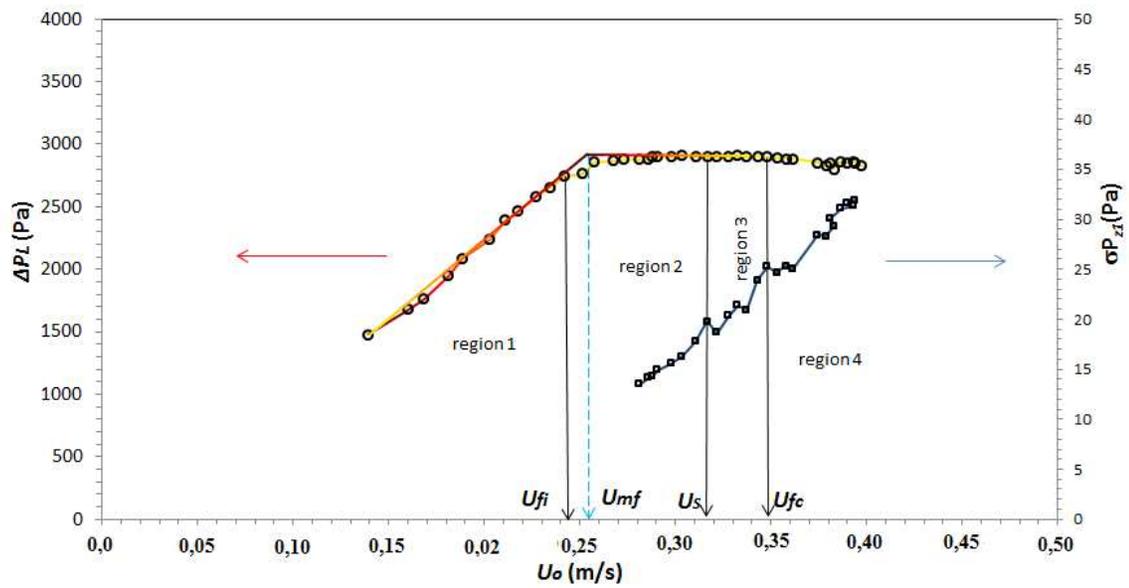


Figura C.42 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z1}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VF)_3$

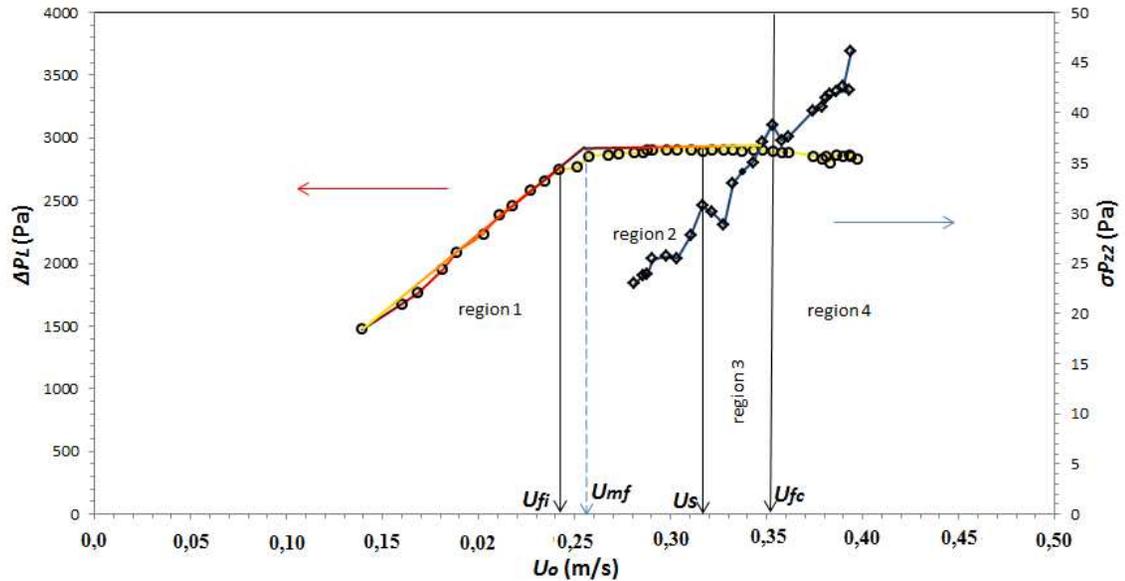


Figura C.43 – Queda de pressão no leito e desvio padrão medidos em  $P_{z2}$  em função da velocidade superficial do gás, mistura  $(PL-VF)_3$

## APÊNDICE D - CÁLCULO DE VAZÃO POR MEIO DE PLACA DE ORIFÍCIO UTILIZANDO A NORMA ASME MFC-14M-2003

A vazão de ar é medida utilizando uma placa de orifício construída segundo a norma ASME MFC-14M-2003. As medidas da queda de pressão através da placa de orifício e da pressão manométrica à montante da placa são realizadas por dois transdutores de pressão diferencial da marca Smar e modelo LD301-D2. A temperatura do ar de fluidização é determinada através de um termopar tipo T.

O calculo será feito no programa feito em Adobe Flash Player 9 desenvolvido por Cárdenas-Fonseca (2009). A interface do programa é mostrada na Fig. D.1.

O algoritmo de solução da equação transcendental que permite o cálculo da vazão é baseado no método de Newton-Raphson, Portanto, o processo de cálculo da vazão de ar é iterativo. O qual se inicia assumindo-se um número de Reynolds ( $Re_D$ ) e, após isso, é determinado o coeficiente de descarga ( $C$ ), calculada a descarga de ar ( $\dot{m}$ ) e a vazão ( $\dot{V}$ ), depois se calcula o novo número de Reynolds e se compara com o número de Reynolds assumido inicialmente, se estes dois valores estão dentro de uma margem de diferença considerada aceitável, o cálculo é finalizado. Caso contrário, o número de Reynolds calculado é substituído pelo inicialmente assumido com uma correção do método de Newton-Raphson e se repete os passos anteriores.

As variáveis de entrada e equações utilizadas para os cálculos são apresentadas a seguir:

### Dados de entrada:

Pressão barométrica:  $P_{atm}$  [mmHg]

Pressão à montante da placa de orifício:  $P_{mont}$  [mmca]

Temperatura a montante:  $T$  [°C]

Diâmetro da placa de orifício:  $d_o$  [mm]

Diâmetro do duto de medida:  $d_t$  [mm]

Diâmetro interno da coluna do leito:  $D$  [mm]

Pressão diferencial na placa de orifício:  $\Delta P$  [mmca]

Coefficiente de compressão adiabática:  $k = \frac{c_p}{c_v}$  [adimensional]

Constante do gás:  $R = \frac{\bar{R}}{M}$  [J/(mol.K)]

## Cálculos

**Massa específica do ar** (através da equação dos gases ideais) com  $R = 287,05$  [J/kg.K].

$$\rho = \frac{P_{atm} + P_{mont}}{R.T} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (D.1)$$

Onde  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica e  $P_{mont}$  é a pressão manométrica medida na placa e orifício como transdutor diferencial (Fig. 3.3(10)), e T a temperatura media com o termopar tipo J

**Viscosidade dinâmica do ar na linha:**

$$\mu = 3,6 \cdot 10^{-8} \cdot T + 1,7718 \cdot 10^{-5} \quad [kg/(m.s)] \quad (D.2)$$

Na Eq. (D.2) a temperatura deve ser dada em graus Celsius.

**Razão de diâmetros da placa de orifício ( $\beta$ ):**

$$\beta = \frac{d_o}{d_t} \quad (D.3)$$

Onde  $d_o$  e  $d_t$  referem-se ao diâmetro do orifício da placa e da tubulação onde a placa está inserida, respectivamente.

### Coefficiente de descarga:

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

Observações: nesta expressão empírica para o coeficiente de descarga ( $C$ ), o diâmetro do tubo ( $d_t$ ), deve ser usado em polegadas.

Segundo a norma, a Eq. (D.4) é aplicável para configurações de canto (corner taps), fornecendo coeficientes dentro de  $\pm 0,75\%$  do valor obtido por calibração quando o diâmetro do tubo está entre 12 e 40 mm,  $0,1 \leq \beta \leq 0,8$  e  $Re_D > 1000$ .

### Descarga de ar:

$$\dot{m} = 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot C \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_o^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho} \cdot \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (D.5)$$

Onde

### Vazão volumétrica de ar:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad (D.6)$$

### Número de Reynolds no tubo

$$Re_D = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_L \cdot \mu} \quad (D.7)$$

Nos testes realizados nesta pesquisa o valor de  $Re_D$  foi calculado para a menor velocidade utilizada nas provas 0,13 m/s onde o valor calculado foi superior a 1000, valor mínimo exigido pela norma.

No programa desenvolvido no software Adobe Flash Player 9 determina-se a velocidade superficial do gás onde é utilizada a equação D.8, na Fig. D.1 é apresentada a tela do programa.

### Velocidade superficial do gás na coluna do leito fluidizado

$$U_o = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D_L^2} \quad (D.8)$$

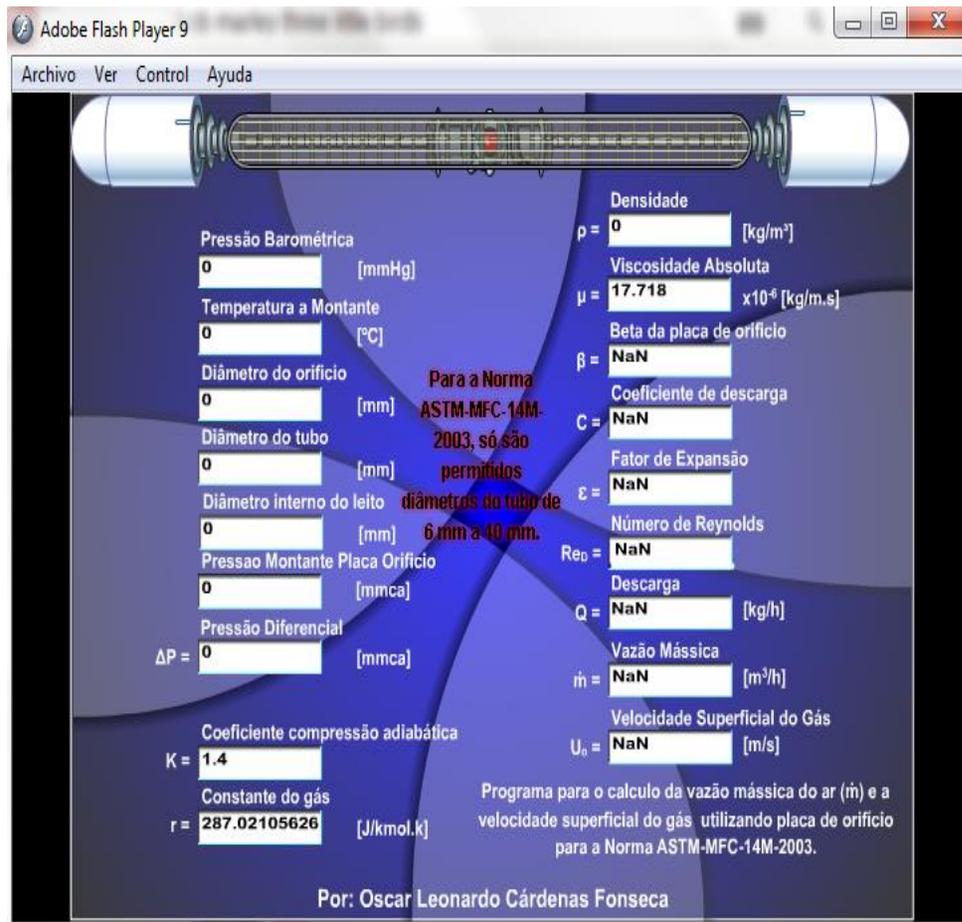


Figura D.1 - Apresentação do programa para o cálculo da vazão de ar desenvolvido por Cárdenas-Fonseca (.2009).

## APÊNDICE E - PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A seguir, é apresentado o programa desenvolvido no software Matlab 7.0 para a aquisição dos sinais de pressão dos três transdutores de pressão instalados no leito:

- (iv) Transdutor localizado no *plenum*, cuja medida de pressão é simbolizada por  $P_{plenum}$ ;
- (v) Transdutor localizado a uma altura  $z_1$ , localizada 35 mm acima da placa distribuidora, cuja medida de pressão é simbolizada por  $P_{z1}$ .
- (vi) Transdutor localizado a uma altura  $z_2$ , localizada 115 mm acima da placa distribuidora, cuja medida de pressão é simbolizada por  $P_{z2}$ .

```
%% PROGRAMA para aquisição de dados dos transdutores capacitivos
%
%TÍTULOS DE LAS COLUMNAS

%Titulos = {'Media 1', 'Media 4', 'Media 5', 'Despadrao 1',
'Despadrao 2'}

%xlswrite('Experimentos.ods',Titulos)

%INICIALIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE CONTROL

orden = 1;

i = 1;

while orden > 0

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% PROGRAMA para aquisição de dados dos transdutores capacitivos

%

%% Parte 1 - Aquisição de dados

%

% Parametros de aquisição
```

```

ActualRate = 200; % taxa de aquisição

duration = 50

; %1 second acquisition

%

%AI = analoginput('adaptor'); % Placa de aquisição - Entrada
analoga

AI = analoginput('nidaq','dev1');

set(AI,'InputType','SingleEnded')

chan1 = addchannel(AI,0); % Canais de aquisição de dados Pplenum

set(chan1,'InputRange',[-10,10]) % Faixa de tensão de entrada do
sensor de referencia Pplenum

chan2 = addchannel(AI,2); % Canais de aquisição de dados Pz1

set(chan2,'InputRange',[-10,10]) % Faixa de tensão de entrada do
sensor de referencia Pz1

chan3 = addchannel(AI,3); % Canais de aquisição de dados Pz2

set(chan3,'InputRange',[-10,10]) % Faixa de tensão de entrada do
sensor de referencia Pz2

%chan4 = addchannel(AI,4); % Canais de aquisição de dados

%set(chan4,'InputRange',[-10,10]) % Faixa de tensão de entrada do
sensor de referencia smar 4

%chan5 = addchannel(AI,5); % Canais de aquisição de dados

%set(chan5,'InputRange',[-10,10]) % Faixa de tensão de entrada do
sensor de referencia smar 3

%

set(AI,'SampleRate',ActualRate) % Ajuste taxa de aquisição

set(AI,'SamplesPerTrigger',duration*ActualRate) % Ajuste da
quantidade de pontos ou dados a coletar

```

```

set(AI,'TriggerType','Manual') % Ajuste do Inicio de aquisição a
manual

%

blocksize = get(AI,'SamplesPerTrigger');

Fs=ActualRate; %Frequência de amostragem

t=1/ActualRate:1/ActualRate:duration; %Dados de tempo (Vector)

t=t'; %Configuração do vector tempo

%

start(AI) % Inicio da leitura de dados

trigger(AI) % Inicio da aquisição de dados

wait(AI,duration + 1) % Espera até que o processo finalize

%

data = getdata(AI); % Obtenção dados adquiridos

size(data) % configuração dos dados

p1=data(:,1); % Obter dados canal 1, correspondentes ao sensor
Pplenum

p2=data(:,2); % Obter dados canal 2, correspondentes ao sensor
Pz1

p3=data(:,3); % Obter dados canal 3, correspondentes ao sensor
Pz2

%p4=data(:,4); % Obter dados canal 2, correspondentes ao sensor 4

%p5=data(:,5); % Obter dados canal 3, correspondentes ao sensor 3

p1c=8391.5*p1-15889; % combio de voltagem a pressão (pa)

p2c=1847.7*p2-2969.2; % combio de voltagem a pressão (pa)

p3c=668.2*p3-1395.7; % combio de voltagem a pressão (pa)

```

```

%p4c=6828*p4-13113; % combio de voltagem a pressão (pa)
%p5c=6782.1*p5-13529; % combio de voltagem a pressão (pa)
%
media1 = mean(p1c); %media sensor samrt Pplenum
media2 = mean(p2c); %media densor Pz1
media3 = mean(p3c); %media sensor Pz2
%media4 = mean(p4c); %media sensor 4
%media5 = mean(p5c); %media sensor 3
%
delete(AI) % Acabar a aquisição de dados
clear AI
%
%
%%Cálculo flutuações
%
% Normalização da pressão
p1n=p1c-mean(p1c);
p2n=p2c-mean(p2c);
p3n=p3c-mean(p3c);
%
%Cálculo da amplitude da flutuação
%
ap1=std(p1c);

```

```

ap2=std(p2c);
ap3=std(p3c);
%
%Calculo FFT
T=1/ActualRate;
L=duration*ActualRate;
NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
P1 = fft(p1n,NFFT)/L;
P2 = fft(p2n,NFFT)/L;
P3 = fft(p3n,NFFT)/L;
f = ActualRate/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
P1mag=2*abs(P1(1:NFFT/2+1));
P2mag=2*abs(P2(1:NFFT/2+1));
P3mag=2*abs(P3(1:NFFT/2+1));
%
% Plot single-sided amplitude spectrum.
%figure(1),plot(f,P1mag)
%title('Espectro de frecuencia')
%xlabel('Frequency (Hz)')
%ylabel('|P(f)|')
%figure(2),plot(f,P2mag);
%title('Espectro de frecuencia')
%xlabel('Frequency (Hz)')

```

```

%ylabel('|P(f)|')

%figure(3),plot(f,P3mag);

%title('Espectro de frecuencia')

%xlabel('Frequency (Hz)')

%ylabel('|P(f)|')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Total(i,:) = [media3,media2,media1,ap3,ap2,ap1];

% p1c = matrequ(P1,p1c);

% p2c = matrequ(P2,p2c);

% t = matrequ(t);

% p1n = matrequ(P1,p1n);

% p2n = matrequ(P2,p2n);

% P1mag = matrequ(P1,P1mag);

% P2mag = matrequ(P2,P2mag);

% Pressoes = [p1c,p2c,t,p1n,p2n,P1,P2,P1mag,P2mag];

% NovoArquivo = strcat('prueba',num2str(i),'.','ods');

% xlswrite(NovoArquivo,Pressoes)

resposta = input('Desea tomar nuevamente datos? 1/0: ');

if resposta == 1

i = i + 1;

else

orden = 0;

end

```

```
end  
  
%NovaFila = strcat('A',num2str(i+1),':','E',num2str(i+1));  
  
xlswrite('Experimentos.ods',Total)
```

## **APÊNDICE F - VERIFICAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO**

Um transdutor de pressão é um dispositivo que converte a pressão aplicada num sinal elétrico. Os transdutores utilizados nesta pesquisa são apresentados no Capítulo 3 onde é feita a descrição do sistema experimental, os quais são três: dois da marca Smar e modelo LD301-D2 e um da marca Rosemount e modelo 3051. Em cada um, o sinal de saída corresponde a um valor de corrente contínua na faixa de 4 a 20 mA. Considerando, portanto, que estes transdutores convertem a pressão em sinal elétrico, há necessidade de se obter uma função da grandeza de medição (pressão) pela grandeza intermediária (elétrica) na saída, chamada de curva de calibração, para que, após a aquisição de dados, seja possível convertê-los na grandeza de medição. Também há necessidade de se determinar a incerteza de medição de cada um dos instrumentos.

A verificação foi feita nas instalações do laboratório do Centro de Estudos do Petróleo (CEPETRO) da UNICAMP que possui uma bancada (calibrador) com um transdutor Druck limited DPI 615 apresentado na Fig. F.3, com as seguintes características:

- 52 intervalos de 2,5 mbar a 700 bar
- Exatidão de 0,025% FE (Fundo de Escala)
- Bomba de pressão/vácuo combinada integrada
- Recurso para teste de loop de 4 a 20 mA
- Interface RS232 e documentação completa da versão
- Até 11 sensores por instrumento



•  
•  
• Figura F.3 - Calibrador de pressão Druck limited DPI 615.  
•

A tensão de alimentação de 24 VDC para os transdutores utilizados foi fornecida por uma fonte de alimentação 24 VDC conforme ilustrado na Fig. 3.9 e 3.12 do item 3.2.1, que apresenta o esquema de conexões destes sensores.

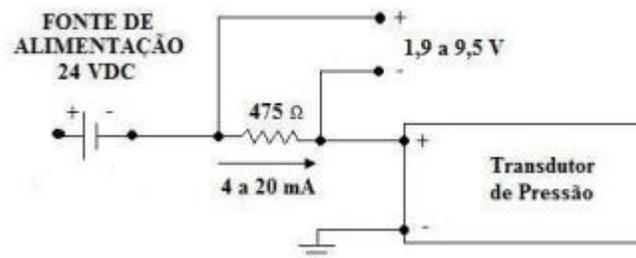


Figura 3.9 - Diagrama de conexão do transdutor de pressão SMAR LD301 – D2.

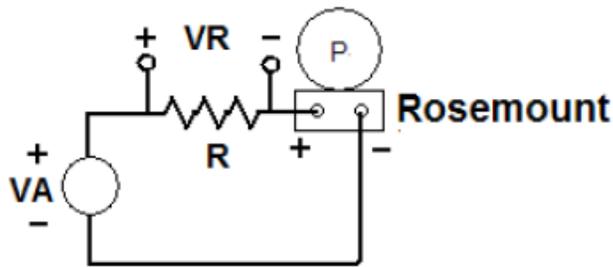


Figura 3.12 - Circuito de alimentação do transdutor Rosemount 3051.

A seguinte metodologia foi utilizada para a realização da verificação dos transdutores:

- Para diferentes pressões aplicadas simultaneamente aos instrumentos dentro da faixa de medição, realizar um conjunto de medições da tensão elétrica através dos resistores (Fig. 3.9 e 3.12) no caso dos transdutores sendo verificados e da pressão no caso do transdutor utilizado como padrão.
- Reduzir os dados e obter a função da pressão *versus* a tensão elétrica, para posterior utilização no programa de processamento de dados, assim como a incerteza de medição de cada um.

Portanto, foram realizadas medições de parâmetros como a pressão relativa e a voltagem analógica obtendo-se tabelas de dados que representam o comportamento dos transdutores na faixa estudada. Sendo de 0 a 60000 Pa para o transdutor Smar LD 301-D2, de 0 a 5000 Pa para o transdutor smar LD301 D1 e de 0 a 90000 Pa para o transdutor Rosemount.

Os resultados dos testes permitiram a obtenção da curva de calibração de cada transdutor para ser inserida ao programa de processamento de dados. As incertezas combinadas foram de  $\pm 1,14$  Pa para o transdutor Rosemount 3051 e de  $\pm 1,13$  Pa para os transdutores Smar LD 301-D2 com intervalo de confiança de 95%.

As curvas correspondentes para cada transdutor são apresentadas nas Figs. F.4 a F.6.

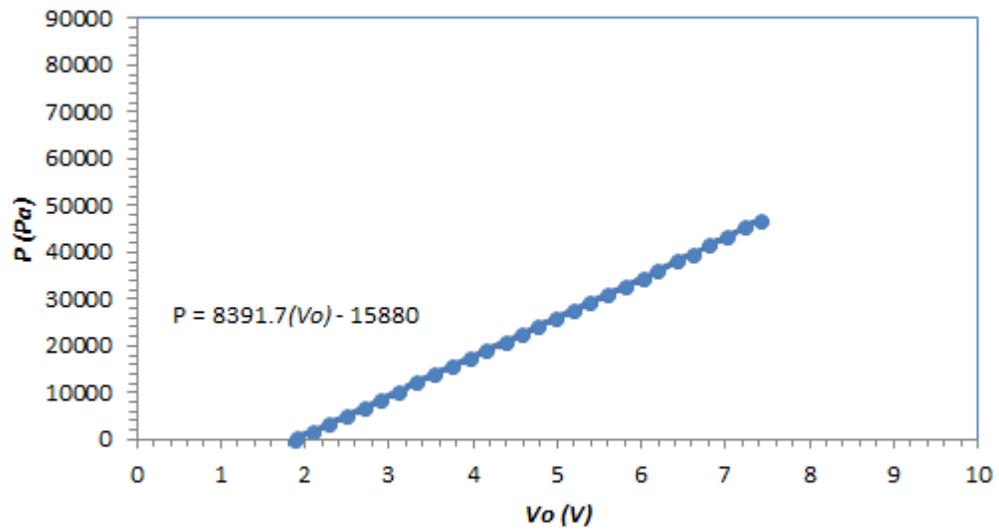


Figura F.4 - Curva do transdutor Smar LD301 – D2 serial. U462197 ( $P_{plenum}$ ).

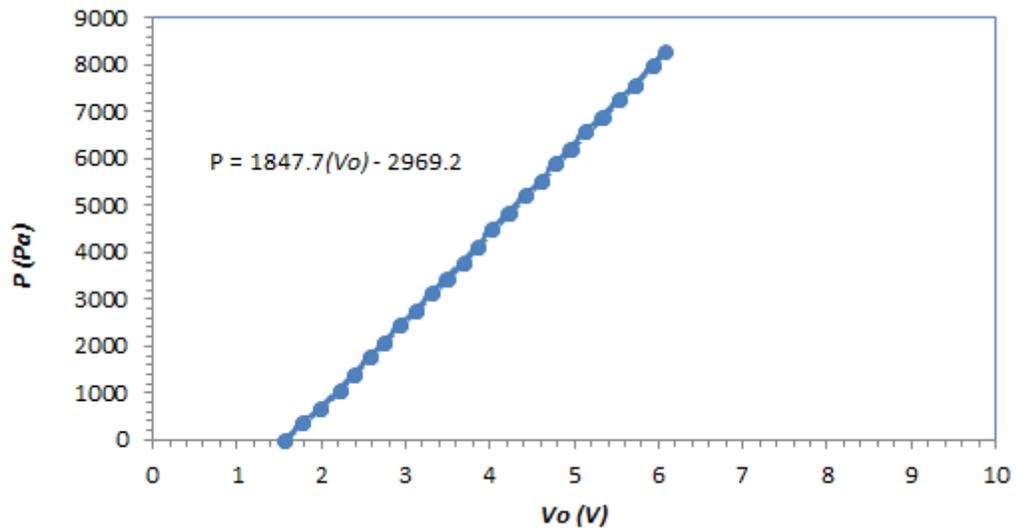


Figura F.5 - Curva do transdutor Rosemount de referência 3051 ( $P_{z1}$ ).

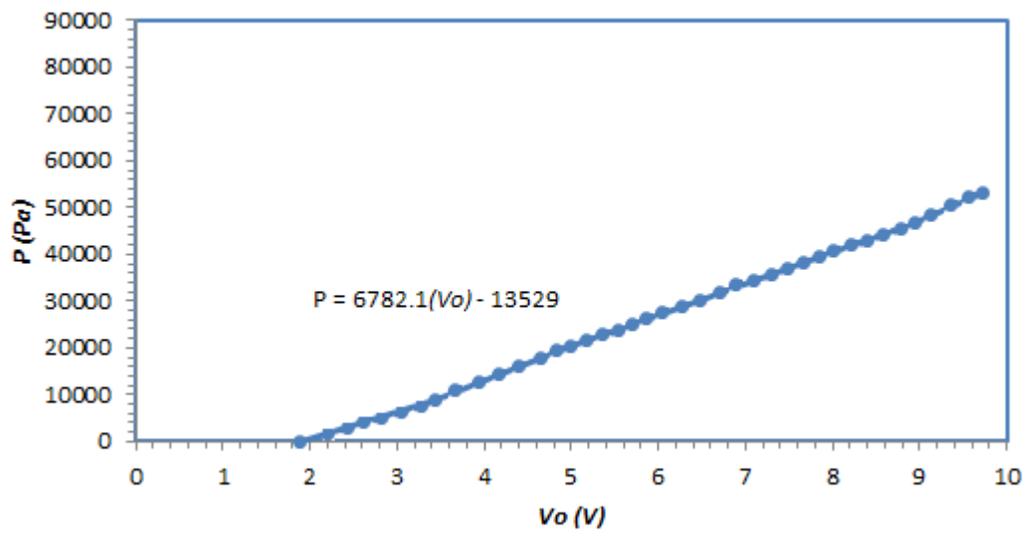


Figura F.6 - Curva do transdutor Smar LD301 – D2 serial. U209494 ( $P_{z2}$ ).

## APÊNDICE G - MÉTODO PARA CÁLCULO DE PREPARAÇÃO DAS MISTURAS BINÁRIAS

O método descrito neste apêndice foi utilizado para preparação das misturas binárias compostas pelos materiais A (*flotsam*) e B (*jetsam*) na composição desejada para os testes.

A altura do leito foi mantida constante em todos os testes, portanto, conhecida a massa específica do leito empacotado livremente de cada material ( $\rho_{b,A}$  e  $\rho_{b,B}$ ), e admitindo que não exista interação entre os materiais, é possível obter o volume do leito correspondente à massa  $m_A$  e  $m_B$ , de cada material presente nas misturas ( $V_A$  e  $V_B$ ).

$$V_A = \frac{m_A}{\rho_{b,A}} \quad (\text{G.1})$$

$$V_B = \frac{m_B}{\rho_{b,B}} \quad (\text{G.2})$$

Nos testes, o volume do leito  $V_L$  foi mantido constante (o diâmetro da coluna é constante e a altura do leito foi fixada em 0,15 m nos testes realizados).

A densidade da mistura ( $\rho_{mis}$ ) pode ser obtida por:

$$\rho_{mis} = \frac{m_{mis}}{V_{mis}} = \frac{m_{mis}}{V_L} = \frac{m_A + m_B}{V_A + V_B} = \frac{m_A + m_B}{\frac{m_A}{\rho_{b,A}} + \frac{m_B}{\rho_{b,B}}} \quad (\text{G.3})$$

Sendo que o volume do leito é dado por:

$$V_L = \frac{\pi D_L^2}{4} H_L \quad (\text{G.4})$$

Onde  $D_L$  e  $H_L$  correspondem ao diâmetro e à altura do leito, respectivamente. Nos testes realizados  $H_L$  foi mantida em 0,15 m.

A equação G.3 é verdadeira se os materiais permanecerem separados, um sobre o outro, gerando um empacotamento com duas camadas, onde a fração mássica ( $X_A$  e  $X_B$ ) de cada material é fornecida por:

$$X_A = \frac{m_A}{m_A + m_B} \quad (\text{G.5})$$

$$X_B = \frac{m_B}{m_A + m_B} \quad (\text{G.6})$$

Ou seja:  $X_A = 1 - X_B$  (G.7)

sendo que:

$$m_A = X_A m_{mis} \quad (\text{G.8})$$

$$m_B = X_B m_{mis} \quad (\text{G.9})$$

Substituindo as equações (G.8) e (G.9) em (G.3), obtém-se:

$$\rho_{mis} = \frac{m_{mis}}{\frac{X_A m_{mis}}{\rho_{b,A}} + \frac{X_B m_{mis}}{\rho_{b,B}}} = \frac{m_{mis}}{m_{mis} \left( \frac{X_A}{\rho_{b,A}} + \frac{X_B}{\rho_{b,B}} \right)} = \frac{1}{\left( \frac{X_A}{\rho_{b,A}} + \frac{X_B}{\rho_{b,B}} \right)} \quad (\text{G.10})$$

Substituindo (G.7) em (G.10).

$$\rho_{mis} = \frac{1}{\left( \frac{1 - X_B}{\rho_{b,A}} + \frac{X_B}{\rho_{b,B}} \right)} = \frac{m_{mis}}{V_L} \quad (\text{G.11})$$

Logo:  $m_{mis} = \frac{V_L}{\left( \frac{1 - X_B}{\rho_{b,A}} + \frac{X_B}{\rho_{b,B}} \right)}$  (G.12)

Portanto, a quantidade de massa de material A e de material B, na mistura pode ser obtida por:

$$m_A = X_A m_{mis} = X_A \frac{V_L}{\left(\frac{1-X_B}{\rho_{b,A}} + \frac{X_B}{\rho_{b,B}}\right)} = (1 - X_B) \frac{V_L}{\left(\frac{1-X_B}{\rho_{b,A}} + \frac{X_B}{\rho_{b,B}}\right)} \quad (\text{G.13})$$

$$m_B = X_B m_{mis} = X_B \frac{V_L}{\left(\frac{1-X_B}{\rho_{b,A}} + \frac{X_B}{\rho_{b,B}}\right)} \quad (\text{G.14})$$