

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

THIAGO MIRANDA DOS SANTOS

**ESTUDO DA DEFLUIDIZAÇÃO, SEGREGAÇÃO E CAOS DE
MISTURAS BINÁRIAS AREIA-SERRAGEM EM LEITO FLUIDIZADO
BORBULHANTE**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2015

THIAGO MIRANDA DOS SANTOS

**ESTUDO DA DEFLUIDIZAÇÃO, SEGREGAÇÃO E CAOS DE
MISTURAS BINÁRIAS AREIA-SERRAGEM EM LEITO FLUIDIZADO
BORBULHANTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica – Área de Concentração: Térmica e Fluidos.

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

Coorientador: Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tuset

PONTA GROSSA

2015

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.08/16

S237 Santos, Thiago Miranda dos

Estudo da defluidização, segregação e caos de misturas binárias areia-serragem
em leito fluidizado borbulhante / Thiago Miranda dos Santos. -- Ponta Grossa, 2016.
111 f.: il.; 30 cm.

Orientadora: Profª. Drª. Maria Regina Parise
Coorientador: Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tusset

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa,
2016.

1. Fluidização. 2. Biomassa. 3. Engenharia mecânica. I. Parise, Maria Regina. II.
Tusset, Ângelo Marcelo. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 620.1



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa**

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº 3/2015

**ESTUDO DA DEFLUIDIZAÇÃO, SEGREGAÇÃO E CAOS DE MISTURAS BINÁRIAS
AREIA-SERRAGEM EM LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE**

por

THIAGO MIRANDA DOS SANTOS

Esta dissertação foi apresentada às **13 horas** do dia **17 de dezembro de 2015** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, com Área de **Concentração em Térmica e Fluidos**, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica/Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof^a. Dr^a. Maria Regina Parise
UTFPR/Orientador

Prof. Dr. Júlio Cesar Dainezi de Oliveira
UEM/Membro Titular

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
UTFPR/Membro Titular

Prof. Dr. Angelo Marcelo Tusset
UTFPR/Co-orientador

Visto do Coordenador:

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
(UTFPR)
Coordenador do PPGEM

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se no Departamento de Registros Acadêmicos da UTFPR – Campus Ponta Grossa -

Dedico este trabalho a toda minha Família, em especial a
minha mãe Cleonice Marinke dos Santos e ao meu Pai
Gerson Miranda dos Santos.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao todo poderoso Deus por ter me dado força, paciência e discernimento em todas as atividades realizadas neste trabalho.

Agradeço a toda minha família por me ajudarem nos momentos difíceis da caminhada, em especial aos meus pais Gerson M. dos Santos e Cleonice M. dos Santos que estiveram sempre ao meu lado, me dando apoio, incentivo durante todo o mestrado.

Agradeço a minha orientadora Prof^a. Dr^a. Maria Regina Parise, por todo o conhecimento fornecido durante a realização deste trabalho, pela paciência e dedicação em me ajudar a finalizar esta dissertação e também por contribuir para o meu crescimento não apenas profissional, mas também pessoal.

Agradeço ao meu Co-orientador Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tusset por toda a ajuda prestada e por contribuir com o seu conhecimento para que alguns estudos do trabalho pudessem ser realizados com qualidade.

Agradeço ao Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne por toda a ajuda na realização dos ensaios do trabalho, por contribuir com seu conhecimento nas análises dos resultados, correção do trabalho e pelo incentivo prestado durante todo o mestrado.

Agradeço a meus companheiros de pesquisa que de alguma forma contribuíram para o enriquecimento deste trabalho, em especial aos que ingressaram comigo neste mestrado e prestaram todo seu companheirismo: Felipe Baptista Nishida e Camila Almeida Martins.

Agradeço a meus amigos pelos momentos de estudos, descontrações e auxílios prestados durante esta etapa.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR por disponibilizar o laboratório utilizado para realização dos testes e um ensino de qualidade para a minha formação.

A todas as pessoas que por algum motivo contribuíram para a pesquisa.

Por fim e não menos importante, aos colegas de trabalho da Empresa Makita pelo apoio prestado.

RESUMO

SANTOS, Thiago Miranda dos. **Estudo da defluidização, segregação e caos de misturas binárias areia-serragem em leito fluidizado borbulhante**. 2015. 109 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

Leitos fluidizados borbulhantes (LFB) têm sido utilizados em muitas aplicações industriais, tendo destaque na conversão energética de combustíveis sólidos em reatores de combustão, gaseificação e pirólise rápida. Nos últimos anos, o estudo da fluidodinâmica de misturas areia-biomassa em reatores de LFB vem ganhando importância, devido à necessidade de identificar o surgimento de fenômenos indesejados no escoamento gás-sólido, tais como a defluidização súbita e a segregação de partículas promovida pela natureza polidispersa dos materiais do leito. Com o propósito de contribuir nesta direção, o presente trabalho estuda a fluidodinâmica de misturas areia-serragem em relação aos fenômenos anteriormente descritos e à intensidade do comportamento caótico do leito fluidizado sob várias condições operacionais. Medidas de flutuação de pressão do leito foram obtidas a fim de estudar a defluidização e a segregação de partículas com apoio da técnica de análise espectral Gaussiana, bem como, a presença de caos utilizando wavelet e o teste 0-1. O material do leito foi constituído por misturas de areia quartzosa e serragem de pinus em porcentagens mássicas de 2,5% e 5% de biomassa, nos inventários de leito de 0,5 e 1,0 kg. Os testes experimentais foram realizados numa coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e 1,0 m de altura. Os valores de pressão estática do leito foram registrados utilizando um sistema de aquisição de dados composto de transdutores de pressão de resposta rápida e *software* LabVIEW™ versão 10.0. Os ensaios seguiram um planejamento fatorial 2^2 com três repetições, totalizando 12 experimentos com misturas areia-serragem. Com os resultados foram obtidas as curvas fluidodinâmica e de frequência central, ambas utilizadas para a identificação do estado de mínima fluidização do leito. Adicionalmente, foram elaboradas curvas de variação de concentração de biomassa em função da altura de camadas do leito para a avaliação da intensidade da segregação. Os resultados mostraram que, em todos os casos, a região de defluidização é atingida em uma velocidade superficial do gás próxima ao valor de 0,05 m/s. Em relação ao estudo de segregação, os resultados sugerem que esta tende a ser maior para leitos rasos do que para leitos profundos, não sendo claramente verificado o efeito da porcentagem de biomassa na mistura dentro da faixa testada. Uma análise estatística e gráfico de pareto foram utilizados para confirmar a significância das tendências observadas. Os dados de pressão na condição de mínima fluidização foram utilizados para determinar a presença de comportamento caótico das misturas testadas. Neste sentido, verificou-se que em todos os ensaios o comportamento foi caótico, apresentando na análise quantitativa, ou seja, teste 0-1, resultados do parâmetro K^* superior a 0,9 e na análise qualitativa utilizando *wavelet*, regiões de energias distribuídas.

Palavras-Chave: Leito Fluidizado Borbulhante. Mistura Binária. Biomassa. Defluidização. Segregação. Caos. Flutuação de Pressão.

ABSTRACT

SANTOS, Thiago Miranda dos. **Study of defluidization, segregation and chaos of sand-sawdust binary mixtures in bubbling fluidized bed.** 2015. 109 p. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Federal University Technology of Paraná. Ponta Grossa, 2015.

Bubbling fluidized beds (LFB) have been used in many industrial applications, with emphasis on energy conversion of solid fuel combustion reactor, gasification and fast pyrolysis. In recent years, the study of fluid dynamics mixture of sand-biomass LFB reactors is gaining importance due to the need to identify the emergence of undesired phenomena in the gas-solid flow, such as sudden defluidization and segregation of particles promoted by the nature polydispersed of the bed material. In order to contribute in this direction, the present work studies the fluid mixtures sand-sawing in relation to the previously described phenomena and chaotic behavior intensity of the fluidized bed under various operating conditions. Bed pressure fluctuation measurements were taken to study the defluidization and segregation of particles with the Gaussian spectral technique's support as well as the presence of chaos using wavelet and 0-1 Test. The bed material consisted of quartz sand and mixtures of pine sawdust with mass percentages of 2.5% and 5% and the inventories of 0.5 and 1.0 kg. Experimental tests were performed in a Plexiglas column of internal diameter 0.11 m and 1.0 m of height. The static pressure values of the bed were recorded using a data acquisition system composed of fast response pressure transducers and software LabVIEW™ version 10.0. The tests followed a 2² factorial design with triplicate, totaling 12 experiments with mixtures sand-sawdust. Thus, with the results were obtained fluid dynamics and curves of central frequency, both used to identify the state of minimum fluidization of the bed. Additionally, the biomass concentration variation curves were prepared according to the layers height of the bed for evaluating the intensity of the segregation. The results showed that in all cases the defluidization region is reached in superficial gas velocity around of 0.05 m/s. Compared to the study of segregation, the results suggest that it tends to be higher for shallow bed than deep beds, not being clearly seen the effect of the percentage of biomass in the mixture within the range tested. A statistical analysis and Pareto chart were used to confirm the significance of the trends observed. The pressure data in the minimum fluidization condition were used to determine the chaotic behavior of the tested mixtures. Thus, the results showed that in all test, the behavior were chaotic, showing in the quantitative analysis, 0-1 test, results of the K* parameter above 0.9 and in the qualitative analysis using wavelet, presented distributed energy regions.

Keywords: Bubbling Fluidized Bed. Defluidization. Binary Mixture. Biomass. Segregation. Chaos. Pressure Fluctuations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Regimes de fluidização	23
Figura 2: Classificação de Geldart (1973) de partículas fluidizadas com ar em condições ambiente	25
Figura 3: Curva da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás	26
Figura 4: Diagrama esquemático da bancada experimental	32
Figura 5: Esquema do balanço de força sobre uma partícula em uma mistura binária	44
Figura 6: Curva de equilíbrio com porosidade de 0,5.....	49
Figura 7: Ampliação da curva de equilíbrio	50
Figura 8: (a) peneiras com a base vibratória e (b) peneiras padronizadas da série Tyler (<i>International Standard Organization</i>)	51
Figura 9: Partícula de biomassa.....	52
Figura 10: Desenho esquemático do sistema experimental.....	53
Figura 11: Fotografia do sistema experimental. 1: coluna de fluidização; 2: transdutor de pressão; 3: ciclone; 4: filtro de mangas.....	54
Figura 12: Fotografia do sistema experimental. 1: inversor de frequência; 2: placa de orifício.....	54
Figura 13: Leito fluidizado a uma frequência do inversor de 14 Hz ($u_o \cong 0,25$ m/s)..	61
Figura 14: Dados coletados no LabView™ estruturados no Excel.....	62
Figura 15: Leito fluidizado em condição de mínima fluidização (0,057 m/s)	63
Figura 16: Fluxograma das etapas para obtenção da curva fluidodinâmica	63
Figura 17: Separação do leito fluidizado em camadas.....	64
Figura 18: Fluxograma das etapas do processo de retirada de biomassa/areia do leito para análise da segregação.....	65
Figura 19: Perfil da frequência central - reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $m_{\text{areia}} = 0,5$ kg	71
Figura 20: Perfil da frequência central - reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $m_{\text{areia}} = 1$ kg	72
Figura 21: Perfil da frequência central - reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1$ kg, $R_m = 5\%$	72
Figura 22: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5$ kg, $R_m = 5\%$..	73

Figura 23: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$	74
Figura 24: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$	74
Figura 25: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 5\%$. Ensaio 1: $I_m = 1,0 \text{ kg}$; Ensaio 2: $I_m = 0,5 \text{ kg}$	76
Figura 26: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 2,5\%$. Ensaio 3: $I_m = 1,0 \text{ kg}$; Ensaio 4: $I_m = 0,5 \text{ kg}$	77
Figura 27: Estimativa do efeito sobre o ângulo de inclinação da curva de segregação.....	78
Figura 28: Histórico no tempo.	80
Figura 29: Diagrama de fase.	80
Figura 30: Transformada rápida de Fourier (FFT).....	81
Figura 31: Resultado da Wavelet obtido do Toolbox do Matlab™.....	81
Figura 32: Histórico da pressão do leito (Pa) no tempo.	82
Figura 33: Diagrama de fase da pressão do leito (Pa).	83
Figura 34: Transformada rápida de Fourier.....	84
Figura 35: Resultado da Wavelet obtido do Toolbox do Matlab™.....	85
Figura 36: Estimativa do efeito sobre o valor do parâmetro K^*	87
Figura A1: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$	97
Figura A2: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$..	97
Figura A3: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$..	98
Figura A4: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$	98
Figura A5: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$	99
Figura A6: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$..	99

Figura A7: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $l_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$.	100
Figura A8: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $l_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$	100
Figura A9: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $l_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$	101
Figura A10: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $l_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$	101
Figura A11: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $l_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$	102
Figura A12: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $l_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$	102
Figura A13: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $l_m = 0,5 \text{ kg}$	103
Figura A14: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $l_m = 1,0 \text{ kg}$	104
Figura B1: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 5\%$, $l_m = 1,0 \text{ kg}$	105
Figura B2: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 5\%$, $l_m = 0,5 \text{ kg}$	105
Figura B3: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 2,5\%$, $l_m = 1,0 \text{ kg}$	106
Figura B4: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 2,5\%$, $l_m = 0,5 \text{ kg}$	106
Figura B5: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 5\%$, $l_m = 1,0 \text{ kg}$	107
Figura B6: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 5\%$, $l_m = 0,5 \text{ kg}$	107
Figura B7: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 2,5\%$, $l_m = 1,0 \text{ kg}$	108

Figura B8: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 2,5\%$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$	108
Figura B9: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 5\%$, $I_m = 1,0 \text{ kg}$	109
Figura B10: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 5\%$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$	109
Figura B11: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 2,5\%$, $I_m = 1,0 \text{ kg}$	110
Figura B12: Perfil de segregação. Condições experimentais: $D_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $D_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 2,5\%$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Correlações da literatura para determinar a velocidade de mínima fluidização	28
Tabela 2: Correlações da literatura para misturas binárias contendo biomassa	34
(Continua).....	34
Tabela 2: Correlações da literatura para misturas binárias contendo biomassa	35
(Conclusão)	35
Tabela 3: Análise granulométrica da biomassa.....	51
Tabela 4: Características físicas do material.....	53
Tabela 5: Matriz de planejamento dos tratamentos experimentais com as suas repetições.....	59
Tabela 6: Planejamento Fatorial 2^2 com triplicata	68
Tabela 7: Ângulos de inclinação das curvas de segregação.....	75
Tabela 8: Resultados da ANOVA dos efeitos sobre a intensidade da segregação ...	78
Tabela 9: Valores de K^* obtidos para cada experimento	85
Tabela 10: Resultados da ANOVA dos efeitos sobre o parâmetro K^*	86

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinas

a	Constante (adimensional)
A	Área da seção transversal (m ²)
$A_e(f_k)$	Amplitude espectral medida (referente à transformada de Fourier do sinal normalizado) (Hz)
C	Coeficiente de descarga (adimensional)
\bar{D}	Diâmetro médio de Sauter (m)
D	Diâmetro da placa de orifício (m)
d	Diâmetro (μm)
d_j	Diâmetro da partícula <i>jetsam</i> (m)
d_f	Diâmetro da partícula <i>floatsam</i> (m)
F	Força de arrasto (N)
F_a	Pseudo-frequência de escala (Hz)
F_b	Parâmetro de largura de banda positiva (Hz)
f_c	Frequência central (Hz)
F_c	Frequência central <i>wavelet</i> (Hz)
\bar{F}	Força de arrasto média (N)
f	Frequência do sinal (Hz)
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
$G(f_k)$	Distribuição exponencial Gaussiana (adimensional)
I_m	Inventário da mistura do leito (kg)
k	0, 1, 2, ..., N -1; N = 2048
K^*	Coeficiente de teste 0-1 (adimensional)
L	Altura do leito (m)
m_b	Massa das partículas de biomassa (kg)
$M(c)$	Vetores de dados (adimensional)
m_i	Massa das partículas do material inerte do leito (kg)

\dot{m}	Vazão mássica do ar (kg/s)
MS	Média dos quadrados (adimensional)
N	Força líquida de interação entre as partículas-fluido (N)
n	Número de réplicas utilizadas no experimento (adimensional)
P_1	Pressão absoluta a montante da placa de orifício (Pa)
R	Relação mássica (adimensional)
s	Razão de densidades (adimensional)
SS_A	Soma dos quadrados de A (adimensional)
SS_B	Soma dos quadrados de B (adimensional)
SS_{AB}	Soma dos quadrados de AB (adimensional)
SS_{TT}	Total da soma dos quadrados (adimensional)
SS_E	Erro da soma dos quadrados (adimensional)
u	Velocidade (m/s)
v_{tubo}	Velocidade do ar na tubulação (m/s)
W	Perda de pressão estática (Pa)
W	Força hidrodinâmica total (N)
x	Fração mássica do sólido (%)
x_f	Fração mássica da partícula <i>floatsam</i> (%)
x_j	Fração mássica da partícula <i>jetsam</i> (%)
\bar{x}	Valor médio da série x_i (adimensional)
X	Vetores de dados (adimensional)
y	Índice de polidispersão (adimensional)

Símbolos gregos

β	Relação entre o diâmetro do orifício da placa e o diâmetro da tubulação (adimensional)
Δ	Período de amostragem
ΔP	Queda de pressão (Pa)
ε	Porosidade do leito (adimensional)

μ	Viscosidade dinâmica (kg/m·s)
π	Constante matemática
ρ	Densidade (kg/m ³)
$\bar{\rho}$	Densidade média do sólido (kg/m ³) $\bar{\rho} = x_1\rho_1 + (1 - x_1)\rho_2$
ρ_e	Densidade efetiva (kg/m ³)
ρ_f	Densidade da partícula <i>flotsam</i> (kg/m ³)
ρ_j	Densidade da partícula <i>jetsam</i> (kg/m ³)
σ	Desvio padrão aplicado a distribuição exponencial gaussiana (Hz)
σ_x	Desvio do quadrado da série (Pa ²)
\emptyset	Esfericidade da partícula (adimensional)
e	Fator de compressibilidade (adimensional)
∇P	Gradiente de pressão absoluta (Pa)
∇p	Gradiente líquido de pressão (Pa)
$\Psi(X)$	<i>Wavelet</i>

Subscritos

o	Superficial do gás
1	Índice referente ao material inerte
2	Índice referente à biomassa
ap	Aparente
b	Biomassa
<i>cir</i>	Circunscrito
c	Referente à frequência central
e	Espectral
f	Fluido
g	Gás
G	Referente à distribuição Gaussiana
i	Referente à partícula retida em cada peneira (adimensional)

<i>ins</i>	Inscrito
<i>L</i>	Leito
<i>m</i>	Mistura do Leito
<i>m</i>	Média da distribuição
<i>mf</i>	Mínima fluidização
<i>p, mf</i>	Referente à partícula na mínima fluidização
<i>p</i>	Partícula
<i>P</i>	Referente à flutuação de pressão
<i>r</i>	Real

Sobrescritos

<i>T</i>	Transposta
----------	------------

Números adimensionais

Ar Número de Arquimedes

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2}$$

Re_{p,mf} Número de Reynolds da partícula na mínima fluidização

$$Re_{p,mf} = [33,7^2 + 0,048Ar]^{1/2} - 33,7$$

Re_D Número de Reynolds

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Re Número de Reynolds da partícula

$$Re = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{24,5 \rho_f \mu}$$

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	18
1.1 PROBLEMA.....	20
1.2 JUSTIFICATIVA	20
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 Objetivo Geral	21
1.3.2 Objetivos Específicos.....	21
CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE	23
2.1 FUNDAMENTOS DA FLUIDIZAÇÃO	23
2.1.1 Classificação das Partículas Sólidas.....	24
2.1.2 Obtenção da velocidade de mínima fluidização	25
2.1.3 Obtenção da velocidade de mínima fluidização por correlações	27
2.2 MEDIDAS DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO	28
2.3 MISTURAS BINÁRIAS COM BIOMASSA	31
2.3.1 Velocidade de mínima fluidização em misturas binárias com biomassa.....	32
2.3.2 Segregação.....	36
2.4 CAOS EM LEITO FLUIDIZADO	39
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 MATERIAIS	43
3.1.1 Caracterização das partículas de areia e biomassa.....	50
3.2 SISTEMA EXPERIMENTAL	53
3.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS E TRATAMENTO DOS DADOS	57
3.3.1 Variáveis do experimento.....	57
3.3.2 Matriz do planejamento experimental	58
3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	60
3.4.1 Determinação do estado de mínima fluidização.....	65
3.4.2 Estudo de segregação das partículas	66
3.4.3 Tratamento estatístico dos resultados experimentais	66
3.4.4 Estudo de caos	69
3.4.4.1 <i>Wavelet</i>	69
3.4.4.2 Teste 0-1	70
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	71

4.1 DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO	71
4.2 ANÁLISE DA SEGREGAÇÃO	75
4.3 ANÁLISE DE CAOS	79
4.3.1 Análise qualitativa	79
4.3.2 Análise quantitativa	85
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .	88
5.1 CONCLUSÕES	88
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS.....	90
APÊNCIDE A – CURVA FLUIDODINÂMICA DOS ENSAIOS REALIZADOS	97
APÊNCIDE B – CURVA DE SEGREGAÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	105

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Fluidização é uma operação que envolve o contato entre um leito formado por partículas sólidas e o fluxo ascendente de fluido (líquido ou gasoso), proporcionando uma boa mistura entre as fases. Devido à possibilidade de obtenção de altas taxas de transferência de calor e de massa, os sistemas de leito fluidizado têm sido reconhecidos como excelente alternativa para aplicação em diversas operações industriais (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Em particular, o leito fluidizado gás-sólido tem sido aplicado com sucesso na combustão, gaseificação e pirólise de carvão e de biomassa, na recuperação de energia de gases e de sólidos quentes, e na secagem de partículas, entre outros.

Nos últimos anos, a preocupação com a eficiência energética e impacto ambiental de sistemas térmicos que utilizam combustíveis fósseis vem ganhando espaço nas discussões sobre a preservação de recursos naturais e a redução de custos dos processos. As estimativas na redução desses combustíveis a médio e longo prazo estão promovendo o desenvolvimento ou utilização acelerada de fontes alternativas, novos processos e/ou equipamentos mais eficientes (SANTOS *et al.*, 2012). Neste contexto, a biomassa surge como um dos principais recursos para o suprimento de energia sustentável nas próximas décadas. A biomassa é um material orgânico derivado de materiais de plantas e animais, sendo principalmente representada para fins energéticos, pela lenha, plantações, resíduos agrícolas, dejetos bovinos e suínos, entre outros. Ela é considerada uma das principais alternativas para diversificar a matriz energética dos países e, conseqüentemente, para reduzir a dependência de combustíveis fósseis (SAIDUR *et al.*, 2011).

Nos processos de fluidização envolvendo a termoconversão de combustíveis (combustão, gaseificação e pirólise), leitos compostos apenas por partículas de biomassa dificilmente atingem uma condição apropriada de fluidização, devido ao formato irregular, baixa densidade, alta umidade e tamanho disperso de partícula. Assim, nesses casos, torna-se necessário o uso de material inerte com propriedades mais homogêneas, como por exemplo, a areia, esferas de vidro ou alumina, formando um leito de mistura binária com melhores condições de fluidização (CUI e GRACE, 2007).

Dentre os fenômenos indesejados que têm merecido atenção na operação de um leito fluidizado gás-sólido composto por misturas binárias estão à segregação

e a defluidização. A intensidade com a qual estes acontecem afeta mistura dos sólidos, bem como a continuidade dos processos, sendo dependente das propriedades físicas das partículas presentes e da velocidade superficial do gás (KUNII e LEVENSPIEL, 1991; JOSEPH *et al.*, 2007, RAO *et al.*, 2011).

Na segregação de misturas binárias, partículas de um dos materiais do leito tendem a se concentrar em determinadas regiões, afetando a homogeneidade das propriedades do leito. Em reatores termoquímicos, por exemplo, este fenômeno pode produzir o colapso da fluidização, devido à presença de regiões de alta temperatura que promovem o amolecimento ou fusão das cinzas e, conseqüentemente, a aglomeração de partículas. Já, no caso da defluidização, o leito de partículas perde a sua característica fluida, levando à interrupção da mistura dos sólidos presentes e, portanto, à perda de eficiência dos processos envolvidos. Ambos os fenômenos tendem a ocorrer ou a se intensificar quando a velocidade superficial do gás atinge um valor próximo ao da mínima fluidização dos sólidos.

Para estudar esses fenômenos indesejados, técnicas baseadas em medidas de flutuação de pressão durante a operação de um leito de mistura binária tem-se mostrado úteis, apresentando as vantagens de simplicidade e característica não intrusiva. Através da análise dos sinais de pressão consegue-se identificar o estado fluidodinâmico de leitos fluidizados, levando à verificação de alguns fenômenos importantes, como intensidade da turbulência, formação de bolhas, coalescência, deslocamento e erupção de bolhas (CHEN e BI, 2003). As flutuações de pressão no leito fluidizado são geralmente monitoradas através de transdutores de pressão conectados ao leito. As técnicas utilizadas para medir as flutuações de pressão no leito fluidizado são baseadas em análise temporal (domínio do tempo), espectral (domínio da frequência) e de caos, que avalia sistemas não-lineares.

A revisão da literatura mostra que os estudos de defluidização, segregação e caos de misturas binárias compostas por biomassas e material inerte são relativamente escassos e/ou controversos. Assim, visando contribuir no fornecimento de informações que ajudem a entender melhor os fenômenos fluidodinâmicos destas misturas, o presente trabalho propõe identificar o estado da defluidização, determinar a intensidade da segregação e da existência de caos de misturas binárias areia-serragem utilizando a técnica da análise espectral Gaussiana, a qual é baseada em medidas de flutuação de pressão no leito.

1.1 PROBLEMA

Como avaliar a partir de sinais de flutuação de pressão o comportamento dos fenômenos de defluidização e segregação, bem como, a presença de caos durante a operação de um leito fluidizado borbulhante com misturas de serragem e areia em diferentes proporções mássicas e inventário de sólidos?

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar dos avanços alcançados nas últimas décadas na caracterização de sistemas de leito fluidizado gás-sólido, pesquisas relacionando a fluidodinâmica de misturas binárias de biomassa e inerte são ainda incipientes na literatura. Mais estudos tornam-se necessários, especialmente, para entender melhor o surgimento de fenômenos indesejados que podem afetar a operação de diversos processos ou aplicações industriais. Com a tendência de uma maior participação da biomassa em sistemas de termoconversão de combustíveis sólidos envolvendo, por exemplo, a geração de vapor e/ou eletricidade em sistemas de potência, a produção de gás de síntese de alta qualidade em processos de gaseificação e a geração de bio-óleos ou matérias primas de alto valor agregado em processos de pirólise rápida, é preciso conhecer mais sobre a dinâmica de sistemas gás-sólido com misturas binárias nas quais a biomassa participa. Nestas aplicações, a segregação pode ocasionar uma concentração de calor, criando pontos de altas temperaturas que fundem as cinzas e leva ao fenômeno da aglomeração das partículas e, conseqüentemente, a defluidização total do leito. Em termos de transferência de calor, pode afetar a eficiência da troca térmica pelo aparecimento dos gradientes de temperatura na região dos trocadores de calor inseridos no leito. Adicionalmente, altas temperaturas localizadas aumentam as chances de produzir NO_x térmico, indesejável no gás efluente. Por outro lado, a partir da identificação em tempo real do estado próximo à defluidização do leito pode-se minimizar a formação de bolhas e aumentar a transferência de calor, melhorando a homogeneidade da mistura com redução no consumo de energia durante a fluidização do sistema gás-sólido.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar experimentalmente a identificação do estado de defluidização, a intensidade da segregação e a presença de caos de misturas binárias areia-serragem de pinus em função das propriedades do leito.

1.3.2 Objetivos Específicos

Constituem objetivos específicos deste trabalho:

- Selecionar e preparar o material inerte e a biomassa de estudo, caracterizando também as suas propriedades físicas para fluidização;
- Executar ensaios experimentais alterando a razão de mistura de biomassa e o inventário total de sólidos, com a finalidade de identificar o estado de defluidização e avaliar a segregação da mistura, a partir de medidas de flutuação de pressão no leito e aplicação da técnica da análise espectral gaussiana.
- Analisar a dinâmica do comportamento do experimento através dos testes estatísticos “*Wavelet*” e “0-1”, determinando para quais parâmetros o experimento atinge um comportamento caótico.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O texto desta dissertação foi dividido em cinco capítulos. Além do Capítulo 1 que contextualiza o tema de estudo, o Capítulo 2 traz o estado da arte sobre o assunto, onde são abordados aspectos teóricos de fluidização gás-sólido e trabalhos da literatura que englobam medidas de flutuação de pressão, qualidade de fluidização, segregação em misturas binárias, e caos. O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados neste trabalho, destacando o procedimento de escolha dos sólidos e as suas características físicas, a descrição do sistema experimental, o procedimento de realização dos testes experimentais com aplicação

da análise espectral Gaussiana e as condições definidas no planejamento experimental. No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos do presente trabalho. No Capítulo 5, apresentam-se a conclusão e considerações finais do trabalho. Por fim, neste mesmo capítulo, são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre os fundamentos da fluidização. Em seguida, descrevem-se as características dos fenômenos de defluidização, segregação em misturas binárias, e caos em leito fluidizado, bem como, as técnicas utilizadas para a identificação destas situações. Finalmente, são apresentados alguns trabalhos encontrados na literatura sobre esses temas.

2.1 FUNDAMENTOS DA FLUIDIZAÇÃO

Como descrito anteriormente, a fluidização é uma operação que envolve o contato entre um leito formado por partículas sólidas e o fluxo ascendente de fluido (líquido ou gasoso). Em um sistema gás-sólido, a fluidização é alcançada quando a velocidade superficial do gás é igual ou superior à velocidade de mínima fluidização (u_{mf}). Assim, o sistema passa a ter o comportamento de fluido.

Com o objetivo de identificar alguns fenômenos que ocorrem em um sistema de fluidização, como a defluidização e segregação, faz-se necessário um conhecimento prévio dos regimes existentes em um leito fluidizado. A Figura 1 apresenta os esquemas dos regimes de fluidização gás-sólido.

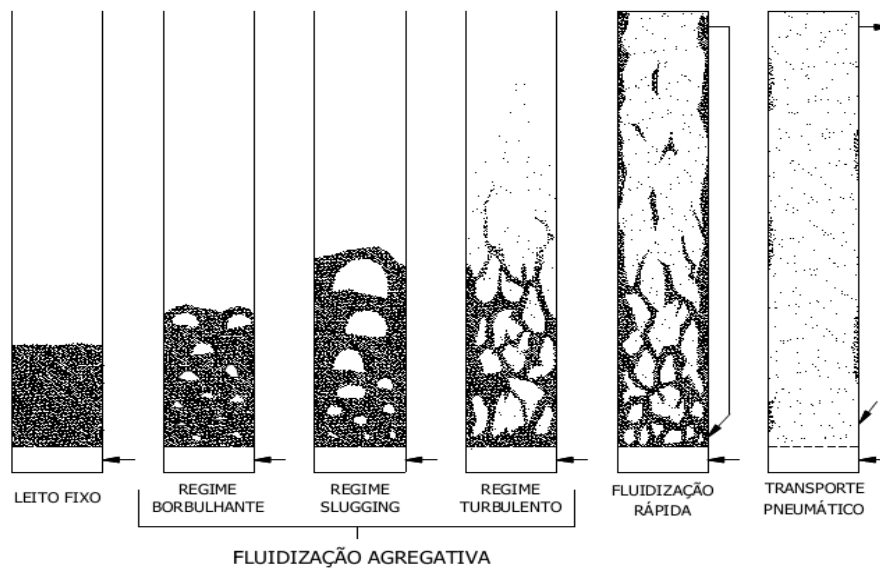


Figura 1: Regimes de fluidização
Fonte: Adaptado de Grace et al. (1997)

Segundo Kunii e Levenspiel (1991), a partir do momento em que um fluido escoar em sentido ascendente através da coluna do leito a uma velocidade baixa, o mesmo apenas passa pelos interstícios das partículas, fazendo com que não ocorra entre elas um afastamento significativo. Este regime de fluidização é denominado leito fixo. Aumentando-se a velocidade do gás, atinge-se um ponto em que as partículas ficam suspensas pelo fluxo gasoso ascendente. A queda de pressão do leito torna-se igual ao peso das partículas por área da seção transversal. Nesse ponto, a velocidade superficial do gás alcança a denominada velocidade de mínima fluidização das partículas (u_{mf}).

Com o incremento da velocidade do gás ocorre a expansão do leito e observa-se o surgimento de bolhas, caracterizando o regime borbulhante. Em se tratando de vazões de gás superiores e colunas com diâmetros reduzidos, podem surgir bolhas que ocupam praticamente todo o diâmetro do recipiente onde ocorre a fluidização, constituindo-se o regime de escoamento pistonado (*slugging*). Para velocidades ainda maiores, verifica-se um movimento mais vigoroso das partículas, caracterizando o regime turbulento.

A partir do momento em que as partículas sólidas começam a ser elutriadas do leito, ou seja, quando a velocidade terminal das partículas é ultrapassada, inicia-se a fluidização rápida e o transporte pneumático. Na fluidização rápida, as partículas sólidas circulam através do sistema de fluidização.

2.1.1 Classificação das Partículas Sólidas

Geldart (1973) apud KUNII e LEVENSPIEL (1991), classificou as partículas sólidas em quatro grupos de acordo com seu comportamento fluidodinâmico, baseada em observações visuais do comportamento do leito em condição ambiente. Esta classificação foi realizada como descrito a seguir:

- Grupo C – Composto por partículas coesivas ou muito finas. A fluidização normalmente é difícil para este tipo de sólidos, pois as forças interpartículas são maiores do que as decorrentes da ação do gás. Ex: farinha de trigo e pó de arroz.
- Grupo A – Partículas com diâmetro pequeno e/ou densidade baixa (menor que 1400 kg/m^3). Estes sólidos fluidizam facilmente, com uma fluidização

suave em baixas velocidades do gás e um regime borbulhante controlado com pequenas bolhas em altas velocidades. Ex: FCC (*Fluid catalytic cracking*).

- Grupo B - Partículas apresentam diâmetro médio na faixa de 40 a 500 μm , e densidade entre 1400 e 4000 kg/m^3 . Estes sólidos fluidizam bem com uma ação borbulhante robusta e bolhas que crescem de forma ampla. Ex: Areia.
- Grupo D – Partículas jorráveis, grandes e/ou densas. Leitos com altas profundidades destes sólidos são difíceis de fluidizar. Eles se comportam de forma irregular criando uma grande explosão de bolhas. Apresenta pequena expansão do leito. Ex: Esfera de vidro, ervilha. Diâmetro da partícula maior que 1 mm.

Esta classificação é ilustrada na Figura 2.

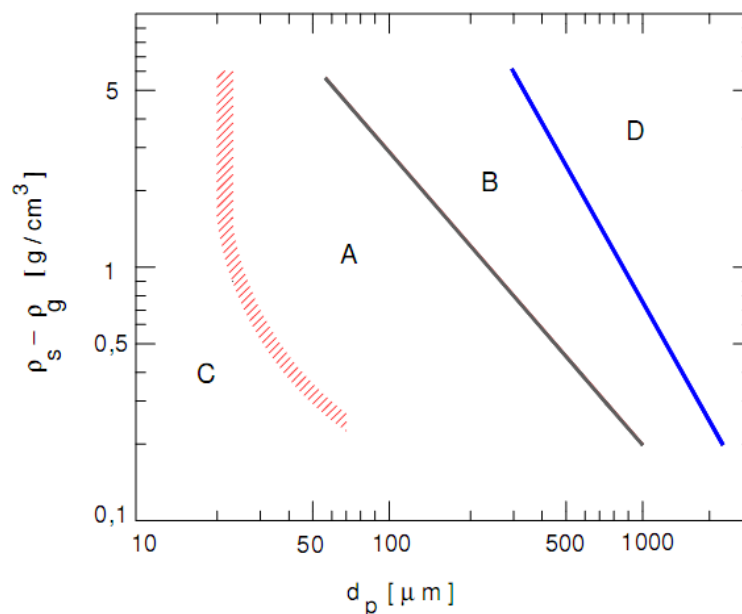


Figura 2: Classificação de Geldart (1973) de partículas fluidizadas com ar em condições ambiente

Fonte: adaptada de Kunii e Levenspiel (1991)

2.1.2 Obtenção da velocidade de mínima fluidização

Segundo Felipe e Rocha (2004), a velocidade de mínima fluidização pode ser obtida experimentalmente por pelo menos três métodos diferentes, ao passo que o mais difundido, é o método da queda de pressão. Além disso, pode ser determinada por correlações empíricas encontradas na literatura, que serão apresentadas na próxima seção.

No presente trabalho utiliza-se o método da queda de pressão (curva fluidodinâmica). A Figura 3 apresenta um diagrama esquemático de uma curva fluidodinâmica envolvendo a queda de pressão no leito (ΔP) em função da velocidade de mínima fluidização (u_{mf}).

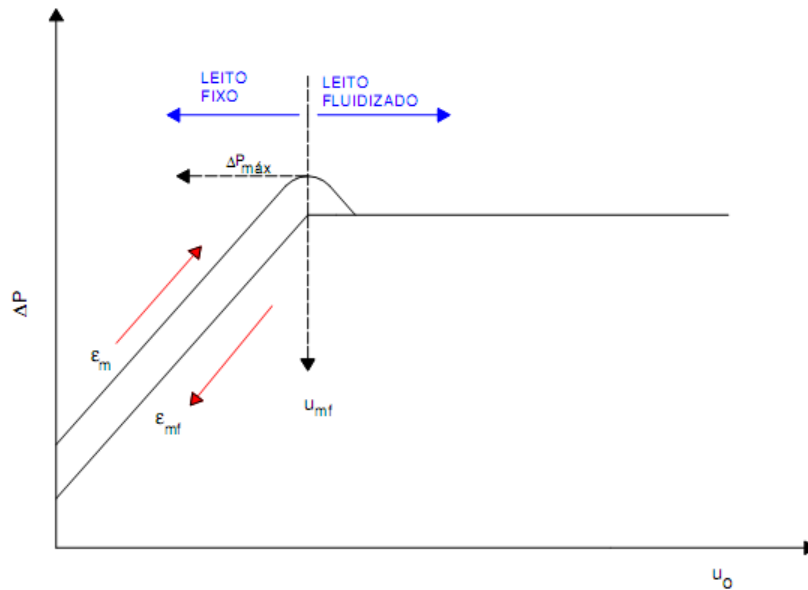


Figura 3: Curva da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás
Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991)

Como mencionado anteriormente, de acordo com Kunii e Levenspiel (1991), quando a velocidade superficial do gás (u_o) é baixa, o leito é considerado fixo e a queda de pressão do leito é proporcional ao aumento da velocidade do gás. Em um determinado ponto, atinge-se um valor máximo de queda de pressão ($\Delta P_{m\acute{a}x}$), acima do peso do leito por área de seção transversal. Até atingir a queda de pressão máxima, a porosidade do leito é (ϵ_m). Aumentando a velocidade superficial do gás, o leito começa a se expandir e a porosidade aumenta para (ϵ_{mf}), e assim, a queda de pressão atinge o peso das partículas por área de seção transversal, permanecendo praticamente constante com o aumento da velocidade superficial do gás (u_o).

2.1.3 Obtenção da velocidade de mínima fluidização por correlações

Outra maneira bastante utilizada para se obter a velocidade de mínima fluidização (u_{mf}) é por meio de correlações encontradas na literatura. De acordo com Kunii e Levenspiel (1991), vários autores desenvolveram correlações empíricas para se determinar a velocidade de mínima fluidização do leito (como por exemplo, ERGUN e ORNIG, 1952; WEN e YU, 1966; GELDART e ABRAHAMSEM, 1981; KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Estas correlações estão descritas das Equações 1 a 4, respectivamente.

$$\frac{\Delta P_{mf}}{L_{mf}} = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})^2 \mu_f u_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi d_p)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon_{mf}) \rho_f u_{mf}^2}{\varepsilon_{mf}^3 \phi d_p} \quad (1)$$

Onde ΔP_{mf} é a queda de pressão na mínima fluidização (Pa), L_{mf} é a altura do leito na mínima fluidização (m), ε_{mf} é a porosidade do leito na mínima fluidização, μ_f é a viscosidade dinâmica do fluido (kg/m.s), u_{mf} é a velocidade de mínima fluidização (m/s), ϕ é a esfericidade da partícula, d_p é o diâmetro da partícula (m) e ρ_f a densidade do fluido (kg/m³)

$$\text{Re}_{p,mf} = [33,7^2 + 0,048Ar]^{1/2} - 33,7 \quad (2)$$

Onde $\text{Re}_{p,mf}$ é o Reynolds da partícula na mínima fluidização e Ar é o número de Arquimedes.

$$u_{mf} = \frac{(d_p)^2 (\rho_p - \rho_f) g}{1650 \mu_f} \quad \text{Re}_{p,mf} < 20 \quad (3)$$

Onde ρ_p é a densidade da partícula (kg/m³) e g , a aceleração da gravidade (m/s²).

$$u_{mf} = \frac{(\rho_p - \rho_f)^{0,934} g^{0,934} d_p^{1,8}}{111\mu_f^{0,87} \rho_f^{0,066}} \quad d_p < 100\mu_f \quad (4)$$

A porosidade do leito na mínima fluidização (ε_{mf}) e o número de Arquimedes (Ar) são definidos pelas Equações 5 e 6, respectivamente:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\rho_L}{\rho_p} \quad (5)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2} \quad (6)$$

Na Tabela 1 são apresentadas outras correlações encontradas na literatura para determinação da velocidade de mínima fluidização.

Tabela 1: Correlações da literatura para determinar a velocidade de mínima fluidização

Autor	Equação
Pillai e Raja Rao (1971)	$u_{mf} = \frac{7,01 \times 10^{-4} d_p^2 g (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g}$
Saxena e Vogel (1977)	$u_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_f d_p} \left(\sqrt{25,28^2 + 0,0571 Ar} - 25,28 \right)$
Babu et al. (1978)	$u_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_f d_p} \left(\sqrt{25,25^2 + 0,0651 Ar} - 25,25 \right)$
Richardson e Jeronimo (1979)	$u_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_f d_p} \left(\sqrt{25,7^2 + 0,0365 Ar} - 25,7 \right)$
Thonglimp et al. (1984)	$u_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_f d_p} \left(\sqrt{31,6^2 + 0,0425 Ar} - 31,6 \right)$

Fonte: Autoria própria

2.2 MEDIDAS DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO

Nos processos que utilizam leito fluidizado gás-sólido é fundamental manter a estabilidade do estado de fluidização, para obter uma boa mistura entre as fases gasosa e sólida, e, conseqüentemente um alto desempenho do sistema. Entretanto, pode ser difícil manter a qualidade de fluidização em processos que ocorrem em temperaturas elevadas e/ou com alto conteúdo de umidade das partículas. Estes fatores podem resultar no decréscimo da movimentação das partículas no leito e na aceleração da condição de defluidização (MARONGA, 1998).

Neste contexto, nas últimas décadas, vários métodos têm sido utilizados para monitorar a transição de regimes fluidodinâmicos, para assim avaliar a qualidade da fluidização. Dentre as técnicas, estão inseridas as medidas de flutuação de pressão no leito.

De acordo com Schouten e Van den Bleek (1998), os sinais de pressão podem ser avaliados por três vias:

- pela análise estatística;
- pela análise espectral;
- pela análise de caos;

A análise de séries temporais opera no domínio do tempo (estudando geralmente desvio padrão e variância da amplitude do sinal), no domínio da frequência (utilizando transformada rápida de Fourier, *FFT*) ou em espaço-estado (caos), este último sendo usado em análise de séries temporais não lineares (JOHNSSON *et al.*, 2000). Segundo Felipe e Rocha (2004), uma descrição dos regimes de fluidização pode ser obtida a partir da análise de séries de tempo de sinais de diferentes medidas físicas, como temperatura, porosidade local (obtida através de sondas de fibra ótica e de capacitância), análise de imagens, concentração de sólidos local e, principalmente, por meio das medidas de pressão.

Os sinais das séries temporais mais utilizados na determinação da velocidade de mínima fluidização podem ser avaliados por duas maneiras. Inicialmente, os sinais podem ser caracterizados de forma direta, ou seja, são avaliados pelo desvio padrão e variância de amplitude de sinal. Outra maneira de analisar as séries temporais é transformar para o domínio da frequência e caracterizar o espectro de potência de frequência resultante, neste caso, utilizando a transformada rápida de Fourier (*FFT*).

Cen *et al.* (1985) utilizaram as correlações estatísticas de flutuações de pressão para obter características do fluxo do fluido em um leito fluidizado

borbulhante. Os autores verificaram que as flutuações de pressão foram ocasionadas pela coalescência e erupção das bolhas.

Um dos parâmetros de grande importância é o ponto no qual se inicia a fluidização. Em um sistema de leito fluidizado, a fluidização se inicia a partir do momento em que a velocidade do gás é suficiente para ocasionar o equilíbrio de forças entre o peso das partículas e o arraste proporcionado pela passagem do gás. Deste ponto em diante, a queda de pressão no leito é praticamente constante, mesmo que a velocidade do gás seja aumentada. Estas flutuações de pressão dentro de leitos fluidizados são atribuídas às bolhas existentes no mesmo. Assim, quando maior as bolhas encontradas em um leito, maior é o desvio padrão das flutuações de pressão.

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

Felipe (2004) utilizou medidas de flutuação de pressão no domínio da frequência para distinguir diferentes regimes de fluidização. O autor realizou os experimentos com 12 tipos de materiais sólidos pertencentes aos grupos A, B e C de Geldart (1973). Os regimes fluidodinâmicos foram: Leito fixo, fluidização particulada, fluidização borbulhante simples, múltipla e explosiva, *slugging* e flutuante. Para capturar as medidas de flutuação de pressão, foram utilizados transdutores de pressão absolutos e diferenciais. Foram utilizadas duas colunas de fluidização em acrílico, com diâmetro interno e altura de 0,11 m e 1,5 m, e 0,14 m e 0,80 m, respectivamente.

Para identificar e diferenciar os regimes de fluidização, o autor observou que a frequência dominante e a banda são semelhantes para os espectros de mesmo regime e sólidos diferentes. De acordo com Felipe e Rocha (2004), a banda do espectro de frequência deve-se à diversidade de tamanho das bolhas de gás formadas durante a fluidização.

O autor verificou que com o aumento da velocidade superficial do gás, o espectro de frequência é deslocado para a direita, bem como a banda vai se tornando mais estreita. Isto vai ocorrendo até alcançar o regime *slugging*, onde o

espectro é caracterizado por apresentar um pico único que, para o autor, é devido ao fato das bolhas apresentarem tamanho mais uniforme neste regime.

Parise *et al.* (2008) desenvolveram a metodologia de análise espectral Gaussiana, para identificar a região onde o fenômeno de defluidização está acontecendo em um leito fluidizado gás-sólido. Tal técnica utiliza a Transformada de Fourier e o conceito de distribuição Gaussiana para o processamento de medidas de flutuação de pressão no leito. Os experimentos realizados por Parise *et al.* (2008) mostraram que a técnica tem grande potencial para ser utilizada em processos em leito fluidizado gás-sólido.

Mais recentemente, He *et al.* (2014) estudaram a fluidodinâmica da transição do regime borbulhante para o turbulento em leito fluidizado gás-sólido, utilizando medidas de flutuação de pressão. A análise dos sinais foi realizada no domínio do tempo, via desvio padrão da flutuação de pressão, e no domínio da frequência, utilizando espectro de potência. Os autores utilizaram partículas do grupo B e D de Geldart. Os ensaios foram realizados em uma coluna de 200 x 200 mm. A taxa de amostragem dos dados foi de 50 Hz com número de pontos superiores a 9000. De acordo com os autores, o desvio padrão da flutuação de pressão inicialmente aumenta para valores superiores da velocidade de transição. Com os espectros de potência, os pesquisadores observaram que com o incremento da velocidade do ar, a frequência dominante inicialmente aumenta e após estabiliza-se na faixa de 1,5 a 3,0 Hz.

2.3 MISTURAS BINÁRIAS COM BIOMASSA

A fluidização de misturas não é uma operação simples, pois, a biomassa geralmente é constituída de partículas irregulares com diferentes densidades. Os efeitos das propriedades físicas dos componentes da mistura na qualidade de fluidização não são bem entendidos e o uso de correlações empíricas é comum (OLIVEIRA *et al.*, 2013). As partículas de biomassa são de geometria variável (grandes distribuições de tamanhos e formatos), fazendo com que as características da fluidização sejam imprevisíveis (CUI e GRACE, 2007).

Estudos têm sido desenvolvidos para investigar os aspectos fluidodinâmicos de biomassa em leitos fluidizados, tais como o efeito da segregação de partículas no

leito e a influência da razão mássica inerte/biomassa na velocidade mínima de misturas (RAO e BHEEMARASETTI, 2001).

De acordo com Oliveira *et al.* (2013), o tamanho do material que irá compor o sistema e a escolha de uma relação inerte/biomassa que promova boas misturas e diminua a segregação da fase sólida dentro do leito são fundamentais para o sucesso do processo de pirólise rápida em um leito fluidizado.

2.3.1 Velocidade de mínima fluidização em misturas binárias com biomassa

Como mencionado no item 2.3, os efeitos da fluidização em sistemas composto por misturas binárias ainda não são bem entendidos. Com isso, correlações empíricas são frequentemente utilizadas para a obtenção da u_{mf} da mistura.

Rao e Bheemarasetti (2001) estudaram misturas de areia e biomassa em leito fluidizado e desenvolveram equações para prever a velocidade mínima de fluidização baseadas na densidade efetiva e diâmetro efetivo da mistura. Nesse estudo foram utilizados serragem, casca de arroz e casa de amendoim em pó. A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático da bancada experimental utilizada.

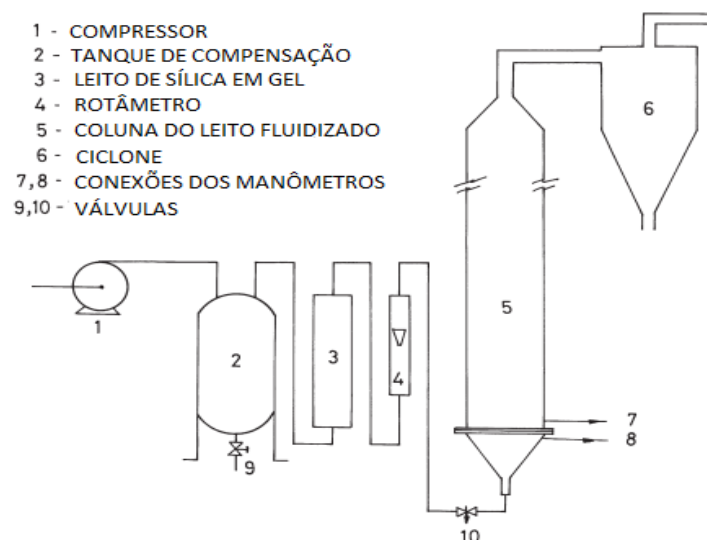


Figura 4: Diagrama esquemático da bancada experimental
 Fonte: Adaptado de Rao e Bheemarasetti (2001)

A coluna do leito fluidizado foi de 0,05 m de diâmetro interno e um tubo de aço inoxidável de 1,0 m. As densidades das areias utilizadas foram 2500 e 2700 kg/m³ e o tamanho médio das partículas esteve nas faixas 477,5 e 302,5 µm. A dimensão média da casca de arroz foi de 2 mm de largura, 1 mm de espessura e 10 mm de comprimento. O diâmetro médio da partícula de serragem foi 900 µm e o diâmetro médio da partícula da casca de amendoim em pó foi de 1000 µm. A quantidade de biomassa utilizada na mistura foi 2, 5, 10 e 15% em massa. Em todos os experimentos, a massa de biomassa e de areia na coluna de fluidização foi mantida em 200 g. Os pesquisadores verificaram que a velocidade de mínima fluidização aumentou com o incremento da porcentagem em peso de biomassa, e também com o aumento da densidade da areia e com o decréscimo no tamanho das partículas de areia. De acordo com os autores, os resultados mostraram que as correlações desenvolvidas para prever as velocidades de mínima fluidização podem prevê-las satisfatoriamente para valores de até 10% de biomassa.

Abdullah *et al.* (2003) realizaram um estudo onde um dos objetivos foi determinar a velocidade de mínima fluidização de uma mistura. Os autores utilizaram diversos tipos de biomassa (tais como serragem, casca de amendoim, casca de coco, carvão e cinzas, fibra de palmeira e casca de arroz) com diferentes densidades e tamanhos. Os ensaios foram realizados em uma coluna de 60 mm de diâmetro interno. A velocidade de mínima fluidização obtida para a serragem, com diâmetro médio de partículas de 0,786 mm, foi de 0,22 m/s. Os autores verificaram que apenas as partículas de biomassa Geldart tipo B (serragem, casca de amendoim, casca de coco, carvão e cinzas) possuem boa fluidização. Observaram também que quanto maior a densidade de *bulk* (a granel), melhor é a qualidade de fluidização do leito.

Paudel e Feng (2013) realizaram experimentos em uma coluna de fluidização de 0,145 m de diâmetro interno e altura de 1 m para determinar as velocidades de mínima fluidização em misturas binárias. Estudos foram realizados utilizando espigas de milho e casca de nozes como biomassa, e, areia, esferas de vidro e alumina como partículas inertes, e também misturas de areia e biomassa. O percentual de biomassa na mistura variou de 10% a 90% em massa. Os resultados mostraram que as correlações propostas previram de maneira satisfatória a velocidade de mínima fluidização das partículas inertes. Para as partículas de

biomassa, os valores previstos ficaram subestimados, devido ao formato, tamanho e densidade peculiar de cada partícula.

Oliveira *et al.* (2013) realizaram um estudo para determinar a velocidade de mínima fluidização de misturas binárias utilizando o diagrama de queda de pressão no leito e também desenvolveram correlações para a velocidade de mínima fluidização das misturas de biomassa e areia. Adicionalmente, incluíram algumas considerações a respeito da segregação. As correlações desenvolvidas levaram em conta o uso de misturas binárias de partículas irregulares de biomassa e areia, variando o formato, tamanho, densidade e a composição da mistura. As biomassas utilizadas foram o bagaço de milho doce, casca de soja e resíduos de tabaco. O material inerte utilizado foi à areia. A coluna de fluidização utilizada foi de acrílico com um diâmetro interno de 0,05 m e altura de 1,52 m. Os resultados mostraram que o comportamento fluidodinâmico das misturas binárias está diretamente relacionado ao tamanho e formato da biomassa e que o sistema apresentou um bom regime de fluidização (com baixa segregação) para mistura de areia e biomassa quando foi utilizado à areia com o menor diâmetro (0,35 mm).

Algumas correlações experimentais desenvolvidas para o cálculo da velocidade de mínima fluidização em misturas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Correlações da literatura para misturas binárias contendo biomassa

(Continua)

Autor (es)	Biomassa	Inerte	% de biomassa	Correlação
Noda <i>et al.</i> (1986)	Madeira, soja e outros grãos 576 a 1250 µm	Areia 454 µm		$AR_{\varepsilon_{mf}}^2 + BR_{\varepsilon_{mf}} = Ar$ $A = 36,2 \left(\frac{d_j \rho_f}{d_f \rho_j} \right)^{-0,196}$ $B = 1397 \left(\frac{d_j \rho_f}{d_f \rho_j} \right)^{0,296}$
				Leito completamente misturado
Bilbao <i>et al.</i> (1987)	Palha de trigo 346; 502; 794; 1264 e 1788 µm		0 a 15%	$u_{mf} = u_{mf,f} - (u_{mf,f} - u_{mf,j})X_j$ $X_j = \frac{x_j}{x_j + \frac{\rho_j(1-x_j)}{\rho_f}}$ $u_{mf,f} = 50 \cdot d_f^{0,84}$

Rao e Bheemarasetti (2001)	Casca de arroz (2x1x10) mm ³ ;			$u_{mf} = \frac{d_s^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650\mu}$
	Serragem de madeira 800 a 1000 µm e Casca de amendoim 800 a 1200 µm	Areia 355 a 600 µm e 250 a 355 µm	0 a 15%	$d_s^2 = K' \left\{ d_f \left(\frac{\rho_j d_f}{\rho_f d_j} \right) \right\}^2$
				$\rho_s = x_j \rho_j + x_f \rho_f$
				$K' = 20d_f + 0,36$
				d_j em metros

Tabela 2: Correlações da literatura para misturas binárias contendo biomassa

(Conclusão)

Autor (es)	Biomassa	Inerte	% de biomassa	Correlação
Si e Guo (2008)	Serragem de madeira 125 µm e Farinha de trigo 84 µm	Areia 482 µm		$u_{mf} = \frac{\mu}{d_s \rho} \left\{ \left[C_1^2 + C_2 \frac{d_s^2 \rho_s (\rho_s - \rho_g) g}{\mu} \right]^{1/2} - C_1 \right\}$ $C_1 = 25,65 (\phi_f^{0,21} \phi_j^{0,15})$ $C_2 = 0,056 (\phi_f^{-0,045} \phi_j^{0,025})$
Di Maio et al. (2012)	Várias (Dados coletados na literatura) 64 a 2000 µm	Vários (Dados coletados na literatura) 70 a 775 µm	4 a 80%	$u_{mf} = \frac{g \varepsilon_{mf}^2}{180(1 - \varepsilon_{mf})\mu} \bar{\rho} (\bar{d} d_f)^2$ $\bar{\rho} = \rho_j \alpha_j + \rho_f (1 - \alpha_j)$ $\bar{d} = \left[\frac{\alpha_j}{d_j/d_f} + 1 - \alpha_j \right]^{-1}$ $\varepsilon_{mf} = 1 - \alpha_j - \alpha_f$
Paudel e Feng (2013)	Espiga de milho 1040 µm e Casca de noz 856 µm	Areia 240 µm	0 a 100%	$Re_{\varepsilon_{mf}} = \left\{ 30,28^2 + \left[0,046(1 - x_f) + 0,108 x_f^2 \right] Ar \right\}^{1/2} - 30,28$ $Re_{\varepsilon_{mf}} = (30,28^2 + 0,108 Ar)^{1/2} - 30,28$

Adaptado: Pécora et al. (2013)

Pécora et al. (2013) realizaram um estudo experimental da velocidade mínima de fluidização de misturas de biomassa e areia. As biomassas estudadas

foram casca de café (espécie *Coffea arábica*) e bambu gigante (espécie *Dendro calamus giganteus*) com diâmetros médios de Sauter de 944 μm e 669 μm , respectivamente. O sistema de leito fluidizado utilizado tinha uma coluna principal de 0,10 m de diâmetro interno e 2 m de altura, sendo que, o ar foi utilizado como gás de fluidização. Neste trabalho, os autores testaram três diferentes concentrações de biomassa na mistura (2,5%, 5% e 10%, em massa). Os pesquisadores também compararam os resultados experimentais com as correlações encontradas na literatura para a previsão da velocidade de mínima fluidização e identificaram que estas equações são válidas para as misturas estudadas. Também foi identificada a influência da concentração de biomassa na mistura sobre o valor da velocidade de mínima fluidização, sendo que, quanto maior a concentração de biomassa, maior a velocidade de mínima fluidização da mistura.

2.3.2 Segregação

A segregação em uma mistura de sólidos é a separação das partículas no leito em forma de camadas. No caso de misturas areia-biomassa, quando a velocidade de mínima fluidização é atingida, pequenas bolhas começam a se formar e transportar as partículas de biomassa do leito. Na medida em que as bolhas se rompem, elas depositam as partículas de biomassa na superfície do leito, gradualmente aumentando o efeito da segregação com o incremento da velocidade do gás (ZHANG *et al.*, 2009).

Uma das vantagens de utilizar sistema de leito fluidizado no regime borbulhante é a habilidade de fornecer boas misturas de sólidos em um sistema com multicomponentes, como por exemplo, em sistemas de reatores. No entanto, o nível de homogeneidade no interior do leito pode ser insuficiente em baixas velocidades, onde a agitação induzida das bolhas não é alta para garantir a mistura dos sólidos, assim, as partículas tendem a estratificar e a segregação pode surgir como um empecilho para o sistema (CUI e GRACE, 2007).

Em um sistema de leito fluidizado com mistura binária, a tendência para a segregação pode ser afetada principalmente pelas propriedades do sólido e a velocidade superficial do gás. Em se tratando de prever a intensidade e direção da segregação, os problemas permanecem sem solução, particularmente com o formato irregular das partículas sólidas (DI RENZO *et al.*, 2013).

Bilbao *et al.* (1988) desenvolveram um modelo de mistura para avaliar a segregação utilizando areia e palha. Em seus experimentos foi utilizado uma coluna de vidro de 8 cm, com uma placa distribuidora porosa. Foi utilizado ar como fluido de fluidização. Em cada experimento, uma vez atingido o estado estacionário do leito, a passagem de ar era cessada, e retirava-se cada camada do leito com espessura de 1 cm. A fração volumétrica real da areia e o perfil axial do experimento foram obtidos para cada camada. Foi observado que o perfil axial de concentração depende da velocidade do ar, da fração volumétrica real da areia e do tamanho das partículas de areia e palha. Também foi concluído que o grau da mistura sólida aumentou com o incremento da velocidade do ar, da fração volumétrica da areia no leito e com tamanhos menores das partículas de areia a palha. Quando a velocidade superficial do gás é maior que a velocidade de mínima fluidização da areia e menor que a velocidade de mínima fluidização da mistura, a areia tende a permanecer na parte inferior do leito. As partículas de areia penetram somente um pouco na parte da palha e percorre por gravidade através dos poros entre as partículas de palha, auxiliando na sua agitação. Neste caso a recirculação da areia não é suficiente para movimentar a palha e uma forte segregação é causada.

Fan e Fox (2008) desenvolveram um modelo multi-fluido para leito fluidizado polidisperso, e o fenômeno da segregação e da mistura foram estudados para um sistema binário e sistemas com uma constante distribuição do tamanho das partículas (PSD – *Particles size distribution*). Neste trabalho, o modelo foi baseado na aproximação Euler-Euler, e o método da quadratura direta de momentos (DQMOM) foram utilizados para descrever a segregação de partículas. Os modelos de predições foram validados com dados de simulações e dados experimentais disponíveis na literatura. As simulações para o sistema binário foram comparados com os experimentos realizados por Goldschmidt *et al.* (2003) e o modelo multi-fluido reproduziu o fenômeno de segregação e mistura destes experimentos. Eles verificaram que quando a velocidade superficial do gás é baixa, ou seja, menor que a mínima fluidização para partículas grandes, o fenômeno da segregação é percebido. As partículas maiores se movimentam para o fundo do leito e as partículas menores para o topo, formando uma rica camada (*jetsam*) no fundo onde o leito defluidizou. Quando a velocidade superficial do gás foi igual ou superior que a velocidade de mínima fluidização, mais bolhas foram observadas no leito, e misturas

mais homogêneas foram alcançadas. Em tal situação o fenômeno da segregação no leito foi fortemente reduzido e a taxa de segregação foi muito baixa.

Neste mesmo trabalho, o primeiro sistema investigado teve uma distribuição gaussiana do tamanho das partículas com um desvio padrão considerado elevado (0,3). O segundo sistema teve uma distribuição log-normal com desvio de 0,5. Como esperado, a distribuição gaussiana mostrou uma segregação significativa, no entanto, a distribuição log-normal apresentou um valor maior de segregação. Os resultados da simulação foram comparados com o *DPS – discrete particle simulation*, conduzidos por Dahl e Hrenya (2005). Estas comparações mostraram que modelo multi-fluido pode reproduzir a segregação ao longo da altura do leito, porém, não pode reproduzir a segregação horizontal através do leito.

Tabrizi *et al.* (2013) investigaram a segregação em um leito fluidizado utilizando diferentes partículas. A bancada experimental foi composta por um sistema gás-sólido contínuo com o leito de 0,11 m de diâmetro interno e 0,50 m de altura. Partículas binárias foram de Alumina (Al_2O_3) com diâmetros de 150 e 470 μm . Foi investigado o efeito do fluxo de ar de entrada, altura do leito inicial e relação volumétrica de partículas. Os resultados mostraram que em misturas homogêneas de duas partículas diferentes, quando aumenta-se a velocidade de entrada de ar, ocorre o início da segregação. A eficiência da segregação aumenta a partir do aumento do fluxo de ar para diferentes misturas e alturas da coluna de fluidização. Outro fator observado foi que a eficiência está em relação direta com a fração de volume das partículas.

Cluet *et al.* (2015) estudaram a segregação de partículas de madeiras em um leito fluidizado borbulhante. Neste estudo, foram apresentados os resultados de porosidade e segregação dos experimentos realizados em um leito fluidizado com material inerte e partículas de madeira. O material inerte utilizado foi a olivina não ferrosa grosseira e a fina, com diâmetro médio de 378 e 237 μm , respectivamente. A densidade foi de 3250 kg/m^3 para ambas as partículas e a esfericidade de 0,82 (grosseiras) e 0,78 (finas). A bancada experimental foi composta de um sistema para entrada de ar, distribuidor, uma coluna de fluidização, um sistema de injeção de madeira e um sistema de aquisição de dados. A coluna de fluidização possuía diâmetro interno de 242 mm e altura de 2,5 m, com espessura de 8 mm. A placa distribuidora com diâmetro de 242 mm e 10 mm de altura foi perfurada por 230 furos com diâmetro de 2,5 mm organizados em espaço quadrangulares. O ar foi

alimentado por um soprador MPR de 2.2 kW e 2900 rpm. Os resultados mostraram que para a mesma velocidade superficial do gás, a olivina grosseira apresentou uma porosidade mais variável ao longo da altura do leito. Estes materiais inertes foram misturados com dois tipos de madeira. Para o caso da olivina grosseira, a presença de partículas de madeira não tem efeito significativo na porosidade. Já para a olivina fina, as partículas de madeira afetaram a porosidade, resultando em uma porosidade menor na parte superior do leito.

Os resultados baseados na segregação mostraram que as características da madeira afetaram a homogeneidade axial da mistura, ao passo que a mistura é maior com partículas de madeira com menor esfericidade e maior densidade. A velocidade de fluidização também afetou a mistura, sendo que, quando $u_o < 3 U_{mf}$, as partículas de biomassa tenderam a segregar mais do que quando $u_o > 3 U_{mf}$, exceto para a madeira (chips) com olivina grosseira. Por outro lado, com $u_o = 6,5 U_{mf}$, a qualidade da mistura foi muito pouco melhor do que o sistema com $u_o = 5 U_{mf}$.

2.4 CAOS EM LEITO FLUIDIZADO

Caos ocorre em muitos sistemas naturais e de engenharia, sendo que, historicamente ele foi considerado como um fenômeno da natureza aleatória. Enquanto que o termo controle de caos geralmente é usado para denotar a área de estudos de inter-relações entre a teoria do controle e teoria de sistemas dinâmicos não-lineares que estuda o comportamento irregular caótico de sistemas determinísticos (RAFIKOV e BALTHAZAR, 2006).

De acordo com Piccirillo *et al.* (2016), para a análise de comportamento caótico, a aplicação *wavelet* e Teste 0-1 tem demonstrado ser eficiente em distinguir de forma consistente se o comportamento é periódico ou caótico, sendo ferramentas indicadas para dados experimentais.

Neste contexto, Lu e Li (1999) utilizaram a análise *wavelet* para avaliar os sinais de flutuação de pressão em um leito fluidizado borbulhante. Eles transformaram os sinais originais de flutuação de pressão através da análise discreta de *wavelet*. Os experimentos foram realizados em uma coluna de vidro de 33 mm de diâmetro interno e 600 mm de altura. O material utilizado foi o FCC com diâmetro de 0,076 mm e densidade de 929,5 kg/m³, sendo utilizada uma placa distribuidora porosa sinterizada. A frequência de amostragem foi de 100 Hz e 700

pontos eram coletados a cada *loop* do sistema. Os autores concluíram que a análise de *wavelet* é uma ferramenta eficiente para analisar os sinais de flutuação de pressão em leito fluidizado borbulhante. O *wavelet* pode filtrar os sinais de flutuação de pressão e obter sinais detalhados, os quais refletem o comportamento das bolhas presentes no leito. Os picos de frequência destes sinais podem representar a frequência de borbulhamento, e o valor do pico médio pode representar o tamanho das bolhas.

Ren *et al.* (2001) utilizaram *wavelet* para verificar o comportamento dinâmico em leitos fluidizados. A partir das análises dos espectros de *wavelet* de vários sinais de pressão medidos em leitos fluidizados, os autores verificaram que os sinais podem ser decompostos em três escalas de componentes: escala micro (tamanho da partícula), escala meso (tamanho do *cluster*) e escala macro (tamanho único). O componente de escala micro pode ser extraído pelo método de filtragem do *wavelet*. Os componentes de escala meso e macro podem ser distinguidos pelo valor mínimo da função do espectro de *wavelet*. Depois de separados, estes componentes podem ser regenerados com a transformação de *wavelet* inversa. O método dos componentes principais foi aplicado para a separação das fases a partir dos sinais medidos por uma sonda óptica. Este método além de escolher o valor máximo do espectro de *wavelet* como um parâmetro ótimo de escala, também reduz o tempo de computação dos dados, porém ainda retém o benefício oferecido pelo método direto. Com isso, eles concluíram que a análise de *wavelet* oferece uma excelente ferramenta para estudar o comportamento dinâmico em leitos fluidizados, especialmente em aspectos de resolução de escala, identificação e separação das fases presentes no leito.

Ellis *et al.* (2003) realizaram um estudo para investigar o comportamento dinâmico em um leito fluidizado gás-sólido com regime turbulento baseados em sinais de pressão, utilizando análise de caos e *wavelet*. A coluna do leito fluidizado tem um diâmetro de 0,29 m e 4,5 m de altura. O distribuidor foi uma placa de alumínio perfurada contendo 98 furos de 5,6 mm de diâmetro configurados em um triângulo equilátero com espaçamento de 32 mm. Partículas FCC com diâmetro médio de 78 μm e densidade de 1560 kg/m^3 foram utilizadas como material do leito. Eles concluíram que tratar os dados a partir de um leito fluidizado turbulento como uma combinação de bolhas discretas co-existent e em fase densa é inapropriado, pois, a operação do leito neste regime turbulento mostra um amplo espectro de

porosidades e um comportamento com uma delineação não muito clara entre as duas fases. Por outro lado, a análise de caos levou à conclusão de que existem diferenças entre os movimentos de grande e pequena escala em um leito fluidizado turbulento.

Si *et al.* (2011) avaliaram a caracterização dos sinais de flutuação de pressão em um leito fluidizado acústico. Os sinais de pressão das partículas FCC foram capturados utilizando um transdutor de pressão conectado ao leito fluidizado acústico. O sistema experimental foi composto de uma coluna de acrílico de 1600 mm de altura e 140 mm de diâmetro interno. O distribuidor utilizado foi uma placa porosa com uma espessura de 2 mm e tamanho do poro de 2 mm. O diâmetro médio das partículas FCC utilizadas foi de 81,5 μm e densidade de 1800 kg/m^3 . Os resultados mostraram que a velocidade de mínima fluidização tem um valor mínimo quando a frequência das ondas sonoras chega a 150 Hz, e diminuem com o aumento do nível da pressão sonora, na mesma frequência sonora. Pela análise de *wavelet*, concluiu-se que a partir dos escalogramas obtidos é possível identificar a situação do leito, bem como a passagem das bolhas. Esta é uma ferramenta eficiente para analisar os sinais de pressão em um leito fluidizado acústico. Assim, a frequência dominante diminuiu com o aumento do nível da pressão sonora e com uma determinada frequência sonora de 150 Hz. Outro aspecto verificado foi que a frequência dominante reduziu com o incremento da frequência sonora de 50 a 150 Hz, porém, aumentou no intervalo de 150 a 500 Hz.

Mais recentemente, Tahmasebpoor *et al.* (2015) relataram o desenvolvimento das análises de séries temporais não lineares baseadas no método RQA (*Recurrence quantification analysis*) para caracterizar o comportamento hidrodinâmico de leitos fluidizados gás-sólido e uma comparação com os resultados obtidos pela análises de *wavelet* foi realizada. Os ensaios experimentais foram realizados variando as condições do leito, como por exemplo, o diâmetro interno do leito (5, 9, 15 cm), o tamanho da partícula (150, 300 e 600 μm), altura do leito em proporções de (1, 1,5 e 2) e velocidade superficial do gás (0,1 – 1,7 m/s). Ambos os métodos mostraram que utilizando partículas maiores e proporções mais altas, a contribuição de estruturas macro aumenta no sistema. Aumentando a velocidade do gás, partículas mais finas inicialmente perdem suas contribuições e depois de passar uma velocidade de transição (por volta de 0,3, 0,5 e 0,7 m/s para areias com

diâmetro médio de 150, 300 e 600 μ m, respectivamente) suas contribuições aumentam novamente.

Por outro lado, o teste 0-1, proposto por Gottwald e Melbourne (2004; 2005), está se tornando uma ferramenta cada vez mais popular para a detecção da ocorrência de caos em sistemas dinâmicos (GOTTWALD e MELBOURNE, 2004; 2005). Isto pode ser observado pelo grande número trabalhos publicados recentemente na literatura com aplicações em vários tipos de sistemas (BERNARDINI e LITAK, 2015). De acordo com Bernardini e Litak (2015), entre as razões do sucesso dessa técnica, existe a extrema simplicidade da sua implementação numérica e o fato de que pode ser aplicado diretamente na saída do sistema, independentemente das características deste.

Apesar da ampla aplicação do teste 0-1 para determinar o comportamento caótico observado por Bernardini e Litak (2015), não foram encontrados na literatura trabalhos em que considerassem sua aplicação na determinação de comportamento caótico em leite fluidizado.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta detalhes referentes aos materiais utilizados e aos métodos adotados na realização desta pesquisa, visando o cumprimento dos objetivos traçados. Inicialmente, descreve-se a metodologia utilizada para a escolha e a caracterização dos materiais que compõem o leito de sólidos. Posteriormente, detalham-se os equipamentos que compõem a bancada experimental, bem como, o procedimento para a realização dos ensaios. Finalmente, apresentam-se os procedimentos utilizados no tratamento dos dados obtidos, visando diagnosticar o comportamento dos fenômenos de defluidização e segregação, assim como verificar a presença de caos das misturas areia-serragem em função das condições operacionais impostas.

3.1 MATERIAIS

Nesse trabalho, o material do leito foi composto por misturas binárias compostas por serragem de *pinus* (biomassa) e areia quartzosa (inerte), ambos obtidos de empresas fornecedoras localizadas na cidade de Ponta Grossa/PR. A escolha desses materiais se deu pelo fato do aumento, nos últimos anos, no interesse pelo uso de biomassa lignocelulósica misturada a areia em reatores de leito fluidizado borbulhante, direcionado à obtenção de calor e/ou eletricidade em usinas termelétricas, gás de síntese em sistemas modernos de gaseificação e matérias primas de alto valor agregado em processos de pirólise rápida. A fluidodinâmica de misturas areia-biomassa em leito fluidizado borbulhante tem sido também objeto de diversas pesquisas (RAO e BHEEMARASETTI, 2001; PAUDEL E FENG, 2013; PÉCORA *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2013; DI MAIO *et al.* 2012), dando possibilidades para o confronto dos resultados apresentados por alguns destes trabalhos com os obtidos no presente estudo.

As características físicas da biomassa e da areia de interesse para este trabalho foram: diâmetro médio de Sauter das partículas, esfericidade e densidade real e aparente. A partir do conhecimento do diâmetro médio de Sauter para as partículas de serragem e com base no modelo de segregação de partículas foi proposto por Di Maio *et al.* (2012), foi escolhido o diâmetro médio das partículas de areia. Este modelo fundamenta-se na comparação do peso da partícula com a força

hidrodinâmica de arrasto atuando sobre uma única partícula de uma determinada espécie, imersa em um sistema completamente misturado, assumindo condições de suspensão ideal (Figura 5).

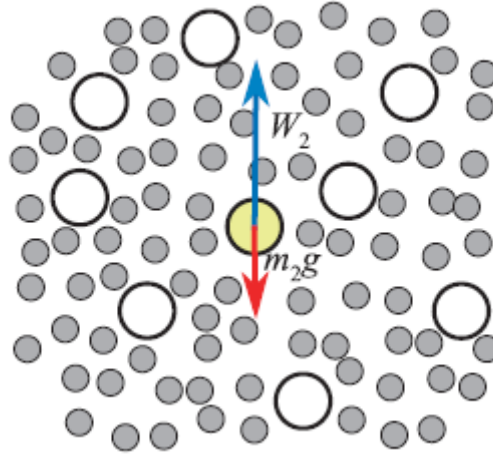


Figura 5: Esquema do balanço de força sobre uma partícula em uma mistura binária
Adaptado: Di Maio *et al.* 2012

Neste modelo, outras forças como a do arrasto entre as partículas ou das interações entre as mesmas não foram consideradas, representando apenas um balanço de forças realizado pela ação do fluido em cada partícula separada. As partículas menores e mais densas são denotadas como espécie 1 e as maiores e menos densas como espécie 2. Se a partícula maior tende a segregação para cima, o balanço de força ao longo da coluna do leito deverá ser descrito pela desigualdade 7:

$$\rho_2 \pi \frac{D_2^3}{6} g < W_2 |_{u_0} \quad (7)$$

Onde ρ e D é a densidade do sólido (kg/m^3) e o diâmetro da partícula (m), respectivamente; g é a aceleração da gravidade (m/s^2), W_2 é a força hidrodinâmica total (N) agindo sobre as partículas a uma velocidade superficial do gás (u_0) para a qual toda a mistura do leito é fluidizada em condições onde o peso total do leito é suportado pela ação do fluxo de gás. A outra direção de segregação é obtida se o sinal oposto for aplicado na Equação 7. Na sequência, a solução será procurada para a Equação 7 na forma de igualdade, com a relação sendo discriminada entre as duas direções de segregação.

Em sistemas densos, tal força (W_2) é frequentemente decomposta em uma força do gradiente de pressão do fluido e um termo F explícito dependente da velocidade, que corresponde ao arrasto:

$$W_2|_{\bar{u}_s} = -\pi \frac{D_2^3}{6} \nabla P + F_2|_{u_0} \quad (8)$$

Onde F e ∇P é a força de arrasto (N) e o gradiente de pressão absoluta (Pa), respectivamente.

Vale a pena notar que tal decomposição é apenas formal, surgida da similaridade com líquidos e útil para computar os dois termos facilmente. De fato, o gradiente de pressão na equação (acima), em geral refere-se a uma escala que é muito maior do que o tamanho da partícula, possivelmente a escala total do sistema (então isso se torna mensurável). Portanto, tal conceito não pode ser confundido com o gradiente de pressão local ao redor da superfície da partícula, um dado que tem se tornado disponível nos mais recentes trabalhos.

O gradiente de pressão absoluta é composto de um termo de Arquimedes devido à densidade do gás e à força de flutuação generalizada, devido ao fato de que o gás suporta as outras partículas:

$$-\nabla P = \rho g - \nabla p \quad (9)$$

Onde g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e ∇p é o gradiente líquido de pressão (Pa).

O segundo termo do lado direito da Equação 9 é o responsável pela pressão que cai através do leito (GIBILARO, 2001). Denotando $-\nabla p$ como o gradiente líquido de pressão, a força líquida de interação partícula-fluido N agindo nas espécies 2 pode ser definida por:

$$N_2|_{\bar{u}_s} = -\pi \frac{D_2^3}{6} \nabla P + F_2|_{u_0} \quad (10)$$

Onde N é a força líquida de interação entre as partículas-fluido (N).

Relembrando que as condições de suspensão estão sendo assumidas para a condição inicial com o leito misturado o gradiente de pressão através do leito pode ser facilmente computado a partir do peso total do leito por unidade de volume:

$$-\nabla P = \bar{\rho}(1 - \varepsilon)g \quad (11)$$

Onde $\bar{\rho} = x_1\rho_1 + (1 - x_1)\rho_2$ é a densidade média do sólido (kg/m^3) pela fração mássica do sólido x e ε é a porosidade do leito.

A tarefa mais difícil é expressar corretamente a força de arrasto agindo sobre a partícula imersa em uma mistura binária. A formulação a seguir, originada em termos adimensionais pelo Hoef *et al.* (2005), é selecionada principalmente devido a sua simplicidade, apesar de várias melhorias ou outras possibilidades existirem. Isso fornece a seguinte expressão direta (Equação 12) que relata a força agindo sobre a partícula da espécie 1 para a média da força de arrasto no sistema.

$$F_2 = y_2^2 \bar{F} \quad (12)$$

Onde y é o índice de polidispersão e \bar{F} é a força de arrasto média (N).

O índice de polidispersão e força de arrasto média são apresentados pelas equações 13 e 14, respectivamente:

$$y_i = \frac{D_i}{\bar{D}} \quad (13)$$

Onde \bar{D} é o diâmetro médio de Sauter (m).

$$\bar{F} = \sum_i \frac{x_i}{y_i^3} F_i \quad (14)$$

O diâmetro médio (\bar{D}) representa o diâmetro médio de Sauter, como mostra a Equação 15:

$$\bar{D} = \left(\sum_i \frac{x_i}{D_i} \right)^{-1} \quad (15)$$

Onde x é a fração mássica dos sólidos.

Devido às condições assumidas de fluidização, ao invés de calcular a média da força de arrasto em termos da velocidade, porosidade, entre outras, a mesma é obtida avaliando o peso em suspensão de uma partícula (média equivalente). A Equação 11 foi elaborada para expandir o termo do lado esquerdo em termos da contribuição de cada espécie de sólidos, como é mostrado na Equação 16:

$$\frac{6}{\pi} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \sum_i \frac{x_i F_i}{D_i^3} = \bar{\rho} (1 - \varepsilon) g \quad (16)$$

Com as definições da força média \bar{F} (Equação 14) e o índice de polidispersão y_i (Equação 13), a força média é:

$$\bar{F} = \bar{\rho} \frac{\pi}{6} \bar{D}^3 g \quad (17)$$

Como consequência, o cálculo explícito da velocidade superficial do gás requerida para suspensão não é necessário. Similarmente, não é requerido especificação do regime do fluxo. A única condição é que o leito deve estar completamente suspenso pelo fluido. Já que a Equação 7 é aplicada essencialmente na fase densa (emulsão), é assumido que as bolhas não tem um diâmetro dominante. Tais condições são obtidas para um leito misturado homogeneamente, utilizando uma fluidização suave. De fato, uma vez que a segregação aparece, os resultados gerais discutidos aqui não são diretamente aplicáveis, devido à diferença gradual de concentração que se desenvolve ao longo do eixo, ao passo que, o correspondente balanço de força deveria ser aplicado. No entanto, pelo fato de que parte do leito pode ir para a defluidização como consequência da segregação, o balanço peso e arrasto podem ser inaplicáveis em tais condições.

Utilizando os resultados obtidos nas Equações 10, 12 e 17, a forma explícita da Equação 7 é:

$$\rho_2 \frac{\pi}{6} D_2^3 g = \bar{\rho} (1 - \varepsilon) \frac{\pi}{6} D_2^3 g + \varepsilon \bar{\rho} \frac{\pi}{6} D_2^2 \bar{D} g \quad (18)$$

Ou,

$$\bar{s} = 1 - \varepsilon + \varepsilon \bar{d} \quad (19)$$

Onde \bar{s} é a taxa de densidade média inversa e \bar{d} é a taxa do diâmetro médio, que são apresentados pelas Equações 20 e 21, respectivamente.

$$\bar{s} = \frac{\rho_2}{\bar{\rho}} \quad (20)$$

$$\bar{d} = \frac{\bar{D}}{D_2} \quad (21)$$

O resultado apresentado pela Equação 19, expresso como função das seguintes densidades e razão de tamanhos das espécies, são apresentados nas equações 22 e 23, respectivamente:

$$s = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (22)$$

$$d = \frac{D_1}{D_2} \quad (23)$$

Com isso, lê-se:

$$s = \frac{(1 - d)(1 - \varepsilon)x_1 + d}{(1 - x_1)[\varepsilon + (1 - \varepsilon)d] + x_1} \quad (24)$$

A partir deste modelo, foi possível obter a curva de equilíbrio utilizando o software *EESTM – Engineering Equation Solver*, considerando uma porosidade de 0,5. As linhas de equilíbrio são ilustradas na Figura 6.

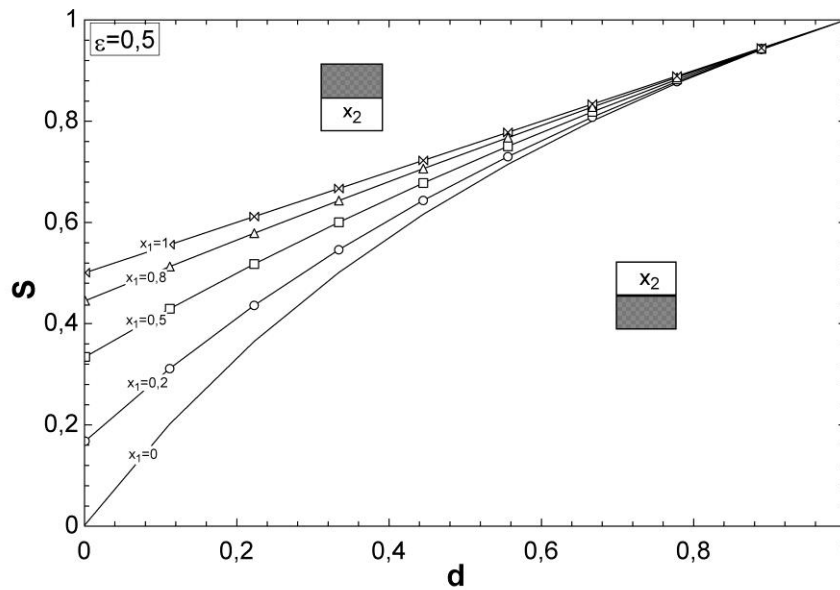


Figura 6: Curva de equilíbrio com porosidade de 0,5

Cada curva de equilíbrio apresentada na Figura 6 representa o percentual de areia presente no leito. Por exemplo, em $x_1 = 1$ significa que 100% da massa presente no leito é composta por areia e em $x_1 = 0,8$, 80% é areia e 20% é biomassa (x_2). Como já mencionado no trabalho, a razão mássica utilizada será de 2,5% e 5% de biomassa, sendo assim, o percentual de areia (x_1) irá variar de 95 a 97,5%.

Para uma melhor visualização, a Figura 7 apresenta uma ampliação das curvas de equilíbrio da Figura 6, especificando-se o ponto estimado inicialmente para encontrar o diâmetro da areia apropriado a partir das propriedades descritas no item 3.1.1. De acordo com as propriedades dos materiais do leito esse ponto encontra-se em $s = 0,608$ e $d = 0,233$.

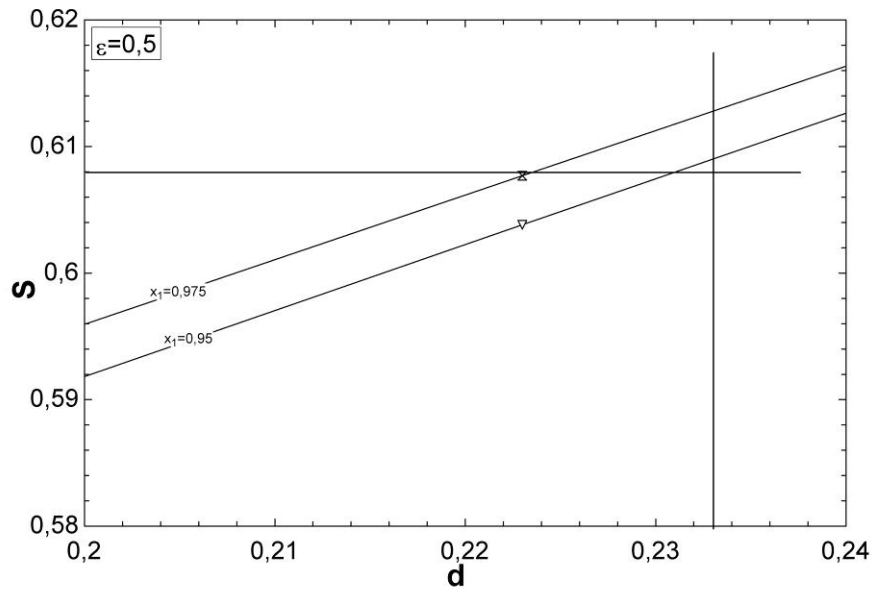


Figura 7: Amplia o da curva de equilíbrio

As duas curvas de equilíbrio apresentadas acima representam as razões mássicas utilizadas nos ensaios experimentais do trabalho. Com o intuito de validar a tendência de segrega o após a realiza o dos ensaios, foi encontrado o valor da razão de densidades (s) e diâmetros (d). A partir disso, foram esboçadas duas retas (horizontal e vertical) para identificar o ponto da intersec o dessas duas retas. Por defini o, se este ponto está exatamente sobre a curva de equilíbrio, não haverá segrega o da mistura. Se este ponto estiver logo   esquerda da curva de equilíbrio, significa que as partículas menos densas e maiores tendem a segregar para baixo (*jetsam*); no último caso, se o ponto estiver logo   direita da curva de equilíbrio, as partículas menos densas e maiores tendem a segregar para cima (*floatsam*).

Como pode ser observado na Figura 7, para as duas razões mássicas (2,5 e 5%), espera-se que as partículas de biomassa apresentem uma tendência de segrega o para cima.

3.1.1 Caracteriza o das partículas de areia e biomassa

Inicialmente foi realizada a análise granulométrica utilizando uma bancada vibratória com peneiras da série Tyler (Figura 8) para a obten o do diâmetro médio de *Sauter* da biomassa.

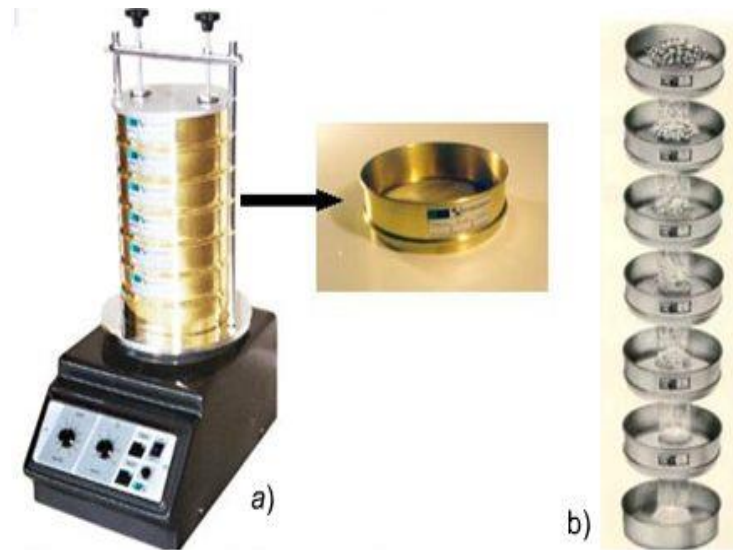


Figura 8: (a) peneiras com a base vibratória e (b) peneiras padronizadas da série Tyler (International Standard Organization)

Para a análise granulométrica das partículas de serragem, inicialmente, foi realizada a pré-seleção das mesmas, retirando as de diâmetro mais grosseiro para facilitar o peneiramento. Após este procedimento, iniciou-se o processo de separação utilizando as peneiras padronizadas com uma base vibratória. Para a obtenção do diâmetro de *Sauter* foram realizados 3 ensaios com o tempo de peneiramento de 5 minutos cada. Para determinar a massa retida em cada peneira, as mesmas foram pesadas e assim o valor era descontado da peneira vazia. As peneiras e malhas utilizadas estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Análise granulométrica da biomassa

+d (μm)	-d (μm)	d _i (μm)	Malha
3400	1700	2550	12
1700	850	1275	20
850	425	637,5	40
425	0	212,5	0

Fonte: Autoria própria

O diâmetro médio de *Sauter* encontrado após os peneiramentos foi de 777 μm e também pode ser verificado na Tabela 4.

Em seguida, a esfericidade (ϕ) das partículas foi determinada pelo método de Peçanha e Massarani (1986), sendo aquela definida pela razão do maior diâmetro inscrito (d_{cir}) e do menor diâmetro circunscrito (d_{ins}) na área projetada da partícula (Equação 25). Para isso, foi utilizada uma câmera da marca Evolution[®] LC,

acoplada ao microscópio óptico da marca Olympus®, modelo BX60, e enviadas ao software AnalySIS®, pertencentes ao Laboratório de Preparação Metalográfica da UTFPR/Ponta Grossa. Para cada material sólido utilizado, foi calculada a esfericidade de 30 partículas aleatórias, e considerado o valor médio da esfericidade.

$$\phi = \frac{d_{ins}}{d_{cir}} \quad (25)$$

A Figura 9 apresenta uma foto obtida de um microscópio digital de uma partícula de biomassa, a qual foi utilizada para representar os diâmetros inscritos e circunscritos.

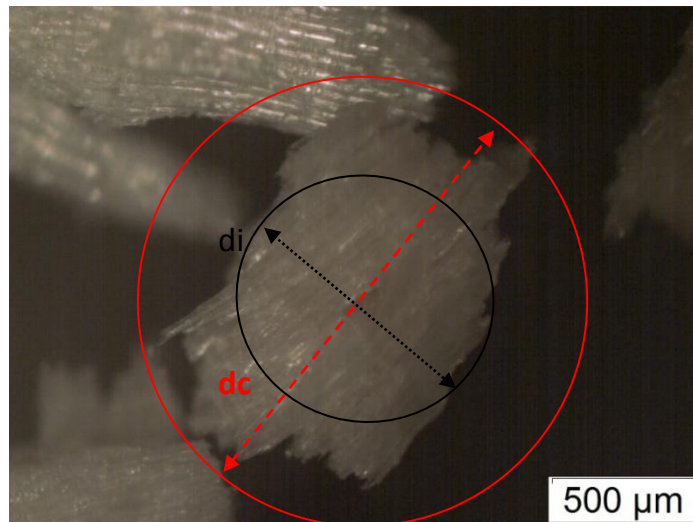


Figura 9: Partícula de biomassa
Fonte: Autoria própria

Por fim, a densidade real da serragem, ρ_r , definida como a razão entre a massa da partícula e o volume ocupado pela mesma excluindo os poros, foi determinada utilizando picnômetro a gás hélio, pertencente ao Departamento de Engenharia de Materiais da UEPG/PG.

A densidade aparente da areia, ρ_{ap} , definida como a razão entre a massa da partícula e o volume total ocupado pela mesma, foi obtida por picnometria líquida, que é uma técnica baseada no deslocamento de líquido pela adição de partículas sólidas. É importante ressaltar que houve a necessidade da densidade da serragem ser obtida pelo picnômetro a gás hélio devido ao fato de não ter sido possível de determinar por picnometria líquida.

As características físicas da areia e da serragem são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4: Características físicas do material

Material	\bar{D} (μm)	ϕ	ρ_r (kg/m^3)	ρ_{ap} (kg/m^3)
Serragem	777	0,55 \pm 0,11	1536,2	----
Areia	181 (-212+150)*	0,72 \pm 0,08	----	2522,7 \pm 31,7

* abertura da peneira

Fonte: Autoria própria

3.2 SISTEMA EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram realizados em uma unidade de fluidização que está instalada no Laboratório de Sistemas Gás-Sólido da UTFPR/Ponta Grossa. Na Figura 10 pode ser observado um desenho esquemático do sistema experimental utilizado.

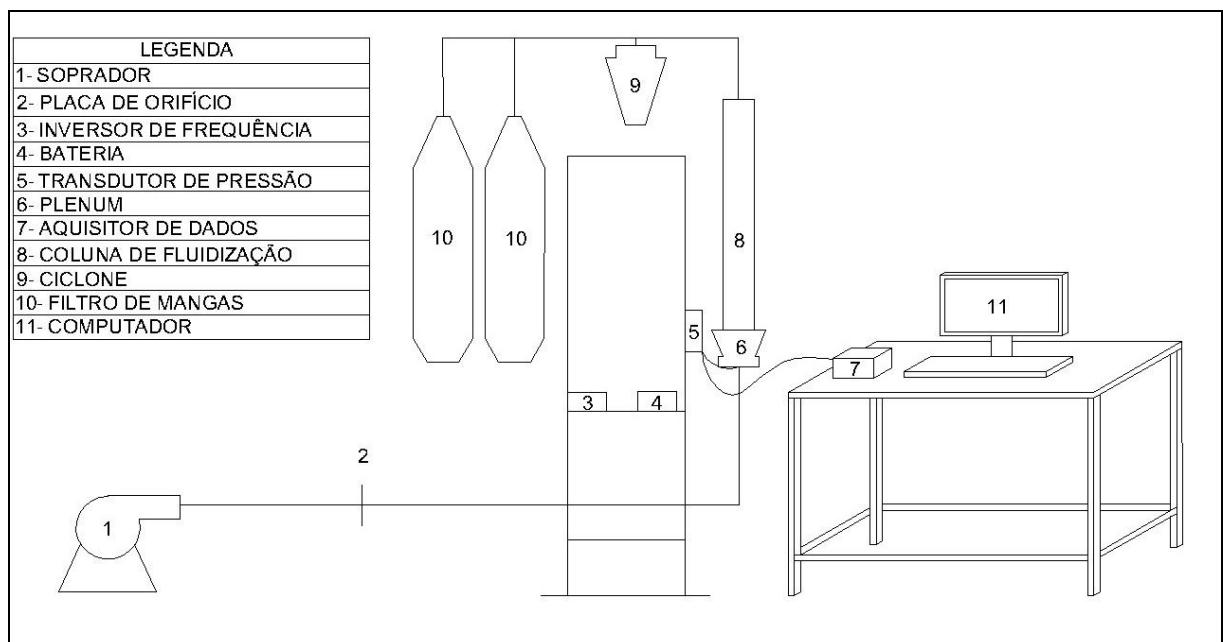


Figura 10: Desenho esquemático do sistema experimental

Fonte: Autoria própria

O sistema experimental também pode ser visualizado nas Figuras 11 e 12.

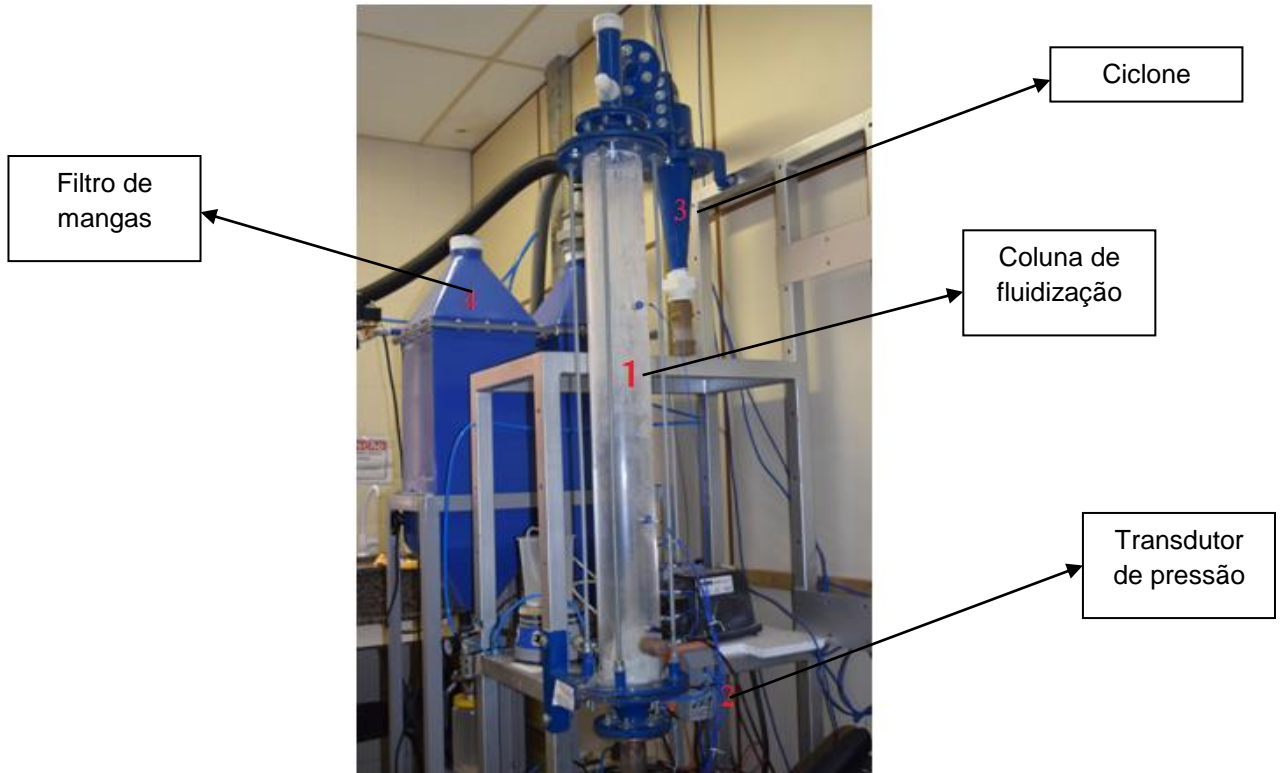


Figura 11: Fotografia do sistema experimental. 1: coluna de fluidização; 2: transdutor de pressão; 3: ciclone; 4: filtro de mangas.
Fonte: Autoria própria

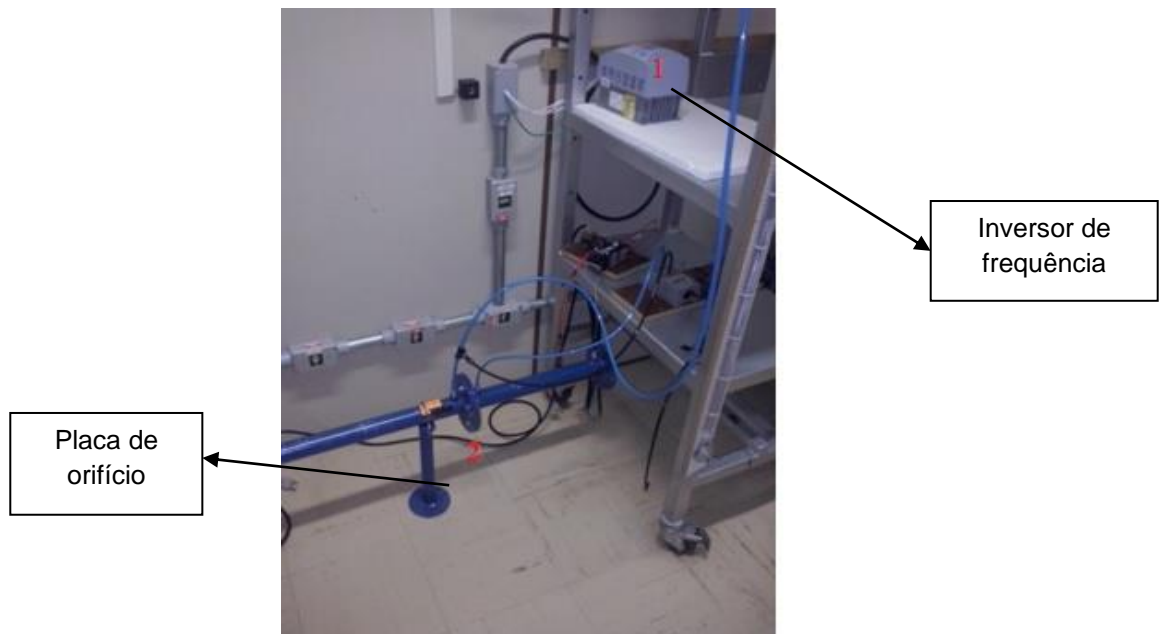


Figura 12: Fotografia do sistema experimental. 1: inversor de frequência; 2: placa de orifício
Fonte: Autoria própria

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

A vazão mássica do ar destinado ao leito de partículas foi determinada mediante uma placa de orifício com diâmetro de orifício de 0,010 m e incerteza inferior a 1%, obtida pelas Equações 26 a 32. A placa foi construída a partir da Norma NBR-ISO 5167-1, ABNT (1994).

$$\dot{m} = e \cdot C \cdot A_{or} \left(\frac{2 \cdot \rho \cdot \Delta P}{1 - \beta^4} \right)^{0,5} \quad (26)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica do ar (kg/s), A_{or} é a área da seção transversal da placa de orifício e e é o fator de compressibilidade, dado por:

$$e = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta P}{K P_1} \quad (27)$$

Onde ΔP é a queda de pressão na placa de orifício (Pa), P_1 é a pressão absoluta a montante da placa de orifício (Pa), β é a relação entre o diâmetro do orifício da placa e o diâmetro da tubulação e K é o coeficiente de perda, dada por:

$$K = \frac{2w}{\rho v_{tubo}^2} \quad (28)$$

Onde ρ é a densidade do ar (kg/m³), v_{tubo} é a velocidade do ar na tubulação (m/s) e w é a queda de pressão estática (Pa), dada por:

$$w = \frac{\sqrt{1 - \beta^4} - C \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4} + C \beta^2} \Delta P \quad (29)$$

Onde C é coeficiente de descarga, dado pela seguinte equação:

$$c = \left[0,5991 + \frac{0,0044}{D} + \left(0,3155 + \frac{0,0175}{D} \right) \left(\left(\frac{d}{D} \right)^4 + 2 \left(\frac{d}{D} \right)^{16} \right) \right] \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4} n \left(\frac{0,52}{30 D} \right) - 0,192 + \left(16,48 - \frac{1,16}{D} \right) \left(\left(\frac{d}{D} \right)^4 + 4 \left(\frac{d}{D} \right)^{16} \right) \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4}{Re_D}}$$

Onde Re_D é o número de Reynolds.

A partir da Equação 26 foi possível calcular a velocidade do ar na entrada do leito (velocidade superficial do gás), dada por:

$$u_o = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_L} \quad (31)$$

Onde u_o é a velocidade superficial do ar (m/s), \dot{m} é a vazão mássica do ar (kg/s), ρ é a densidade do ar no *plenum* (kg/m³) e A_L é a área da seção transversal do leito (m²), dada por:

$$A_L = \frac{\pi d_L^2}{4} \quad (32)$$

Onde d_L é o diâmetro interno do leito (m).

A pressão manométrica na linha e a queda de pressão através da placa de orifício foram obtidas utilizando transdutores de pressão (Cole Parmer®, modelo 98073-14, de 0 a 12442 Pa, e do modelo 68071-14, de 0 a 6227 Pa, respectivamente). Os sinais de pressão provenientes do plenum foram obtidos utilizando um transdutor diferencial de pressão (Cole Parmer®, modelo 68071-14, com faixa de 0 a 6227 Pa). Todos os transdutores de pressão utilizados foram acoplados a um sistema de aquisição de dados (National Instruments™, modelo NI USB 6211). Os sinais de pressão foram visualizados e processados a partir de um microcomputador (AMD FX(tm)- 8120 Eight- Core, 3,1 GHz, memória 4,0 GB) com *software* LabView™ versão 10.0. Os transdutores foram energizados por duas baterias de 12 V cada (marca: *Unipower*, 7A) evitando-se, dessa forma, que os sinais de pressão sofressem interferência de ruídos gerados pela rede elétrica e/ou de outras fontes, como ondas eletromagnéticas.

Com o intuito de separar o ar das partículas que por ventura fossem elutriadas do leito, a parte superior da coluna de fluidização foi conectada a um ciclone *Swift* e, este, a um filtro de mangas do tipo jato pulsante da marca Multiman®.

A placa distribuidora utilizada neste trabalho foi confeccionada em aço comercial, sendo do tipo perfurada com arranjo triangular. A placa possui diâmetro de orifício de 1,2 mm, espaçamento de 4,25 mm e espessura de 3,5 mm. Na parte superior dessa placa foi instalada uma tela de aço inoxidável com abertura de 75 µm, evitando assim que as partículas passassem pelos seus orifícios.

3.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS E TRATAMENTO DOS DADOS

3.3.1 Variáveis do experimento

Para este estudo optou-se pela execução de experimentos definidos por um planejamento fatorial completo do tipo 2^2 , no qual, uma variável de resposta de interesse foi estudada a partir das mudanças em dois fatores controláveis (número do expoente) nos níveis alto e baixo (número da base).

A partir da análise dos trabalhos encontrados na literatura, optou-se pela escolha da relação mássica biomassa/mistura do leito (R_m) e do inventário da mistura do leito (I_m) como as variáveis de entrada ou fatores controláveis do planejamento fatorial a serem estudados. Estas duas variáveis foram definidas conforme indicado pelas Equações 33 e 34:

$$R_m = \frac{m_b}{I_m} \quad (33)$$

$$I_m = m_b + m_i \quad (34)$$

onde, m_b representa a massa das partículas de biomassa (serragem) e m_i , a massa das partículas do material inerte do leito (areia).

A escolha dos níveis alto e baixo de cada variável controlável foi realizada com base nos resultados obtidos em experimentos preliminares realizados no sistema de fluidização. No caso da escolha do nível alto de R_m foi selecionado o valor de 5%, valor próximo ao utilizado em fornalhas de leito fluidizado (BASU, 2006). Como valor inferior I_m foi escolhido a metade desta quantidade. Já, no caso

do inventário da mistura do leito (I_m), o valor alto foi definido de tal forma que a razão entre a altura total do leito fixo e o diâmetro interno da coluna de fluidização (H_m/D_L) fosse um pouco inferior a 1,0, a fim de evitar a possibilidade do aparecimento do fenômeno *slugging* no escoamento gás-sólido (KUNNI e LEVENSPIEL, 1991).

A partir das considerações descritas anteriormente foi encontrado experimentalmente que com $R_m = 5\%$ (relação de mistura com maior participação de biomassa), o inventário total máximo da mistura serragem-areia precisava estar próximo ao valor de 1,0 kg. Assim, os valores de 1,0 kg e 0,5 kg foram estabelecidos como os valores alto e baixo para I_m , respectivamente.

3.3.2 Matriz do planejamento experimental

O planejamento fatorial completo 2^2 foi considerado a opção de programação mais adequada dos ensaios experimentais, devido à possibilidade de analisar os efeitos e as interações das variáveis de processo com um número relativamente pequeno de combinações ou tratamentos, e que por sua vez, permitisse a realização de repetições em quantidade apropriada sem a necessidade de um número excessivo de ensaios (BARROS NETO *et al.*, 2003). Em estudos com sistemas ou fenômenos complexos, representado neste estudo pela fluidodinâmica de sistemas gás-sólido, as repetições de ensaios experimentais tornam-se essenciais para a verificação da significância estatística dos efeitos das variáveis controláveis sobre as respostas de interesse envolvendo o erro experimental.

A organização das combinações ou dos tratamentos experimentais executados neste estudo está representada na matriz de planejamento da Tabela 5 com o nível alto sendo identificado pelo sinal "+", e o nível baixo, pelo sinal "-".

Tabela 5: Matriz de planejamento dos tratamentos experimentais com as suas repetições.

TESTE	Relação mássica biomassa/mistura do leito (R_m)		Inventário da mistura do leito (I_m)		Resultado (\bar{y})
	Nível	Valor (%)	Nível	Valor (kg)	
1	+	5,0	+	1,0	\bar{y}_1
2	+	5,0	-	0,5	\bar{y}_2
3	-	2,5	+	1,0	\bar{y}_3
4	-	2,5	-	0,5	\bar{y}_4
1*	+	5,0	+	1,0	\bar{y}_1^*
2*	+	5,0	-	0,5	\bar{y}_2^*
3*	-	2,5	+	1,0	\bar{y}_3^*
4*	-	2,5	-	0,5	\bar{y}_4^*
1**	+	5,0	+	1,0	\bar{y}_1^{**}
2**	+	5,0	-	0,5	\bar{y}_2^{**}
3**	-	2,5	+	1,0	\bar{y}_3^{**}
4**	-	2,5	-	0,5	\bar{y}_4^{**}

Fonte: Adaptado de Barros Neto *et al.* (2003). * = Duplicata, ** = Triplicata.

Dessa forma, foram obtidas quatro combinações entre as variáveis ou fatores controláveis e mais duas repetições por tratamento, totalizando doze testes experimentais. Ensaio realizados em triplicata têm sido apontados como a opção mais apropriada por pesquisadores para analisar a significância estatística de efeitos com boa precisão (PASSARI *et al.*, 2011).

A variável de resposta (\bar{y}) para este estudo corresponde ao ângulo de inclinação (medido em graus), da linha de regressão obtida a partir dos resultados de concentração de biomassa nas cinco camadas de material do leito (identificadas de A até E). No cálculo deste ângulo relacionam-se as variáveis adimensionais correspondentes à ordenada e à abscissa, conforme Equações 35 e 36:

$$y = h/L \quad (35)$$

Onde y é a ordenada definindo as alturas do leito, h é a altura de cada camada no leito (cm) e L a altura total do leito.

$$x = (Pe - Rm)/Rm \quad (36)$$

Onde x é a abscissa definindo a centralização do percentual de biomassa, Pe é o percentual de biomassa retirado de cada camada (%) e Rm é a razão mássica utilizada no ensaio.

Com a adimensionalização é possível determinar um gráfico de intensidade de segregação centralizado no percentual de biomassa, sendo assim, válido para comparação de todos os casos analisados.

Para determinação do ângulo de inclinação da curva de segregação, foi obtida uma linha de tendência linear na forma:

$$y = mx + b \quad (37)$$

Onde b é o ponto onde a linha intercepta o eixo y e m o coeficiente angular da equação.

O arco tangente de m é o ângulo de inclinação da linha de tendência, descrito pela Equação 38:

$$\arctg = m * 180/\pi \quad (38)$$

3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realização dos ensaios experimentais, foi adotado o seguinte procedimento: Inicialmente foi ligado o sistema de automação e aquisição dos dados composto por um inversor de frequência, computador, conexões das baterias, termopares. Os materiais (areia e biomassa) foram pesados separadamente utilizando um copo de béquer e uma balança semi-analítica. Após a pesagem, primeiramente foi inserido o material inerte (areia) no interior da coluna do leito, em seguida, foi inserida a biomassa (serragem). Em paralelo, o *software* LabView™ foi iniciado, bem como a preparação dos caminhos nos quais os arquivos eram salvos.

Antes de iniciar os testes, o inversor foi ligado a uma frequência de 14 Hz (referente à velocidade superficial do gás em aproximadamente 0,25 m/s), acionando-se o soprador do sistema. Esta frequência foi definida por proporcionar uma boa mistura às partículas no leito, sem que as mesmas fossem elutriadas. O sistema foi mantido por 5 minutos nesta frequência com o intuito de proporcionar uma boa homogeneidade da mistura (Figura 13).

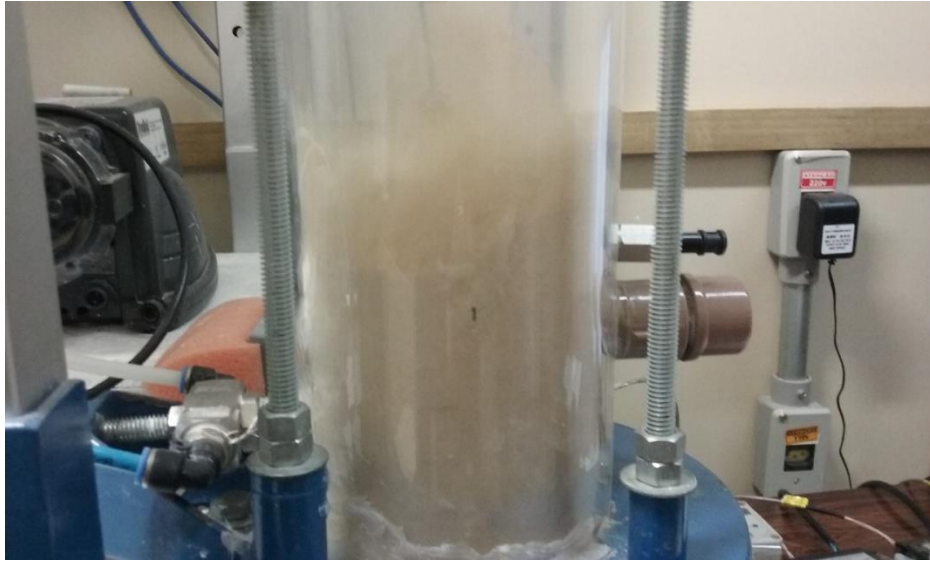


Figura 13: Leito fluidizado a uma frequência do inversor de 14 Hz ($u_o \cong 0,25$ m/s)
Fonte: Aatoria própria

Finalizado este tempo de condicionamento do leito, o teste foi iniciado reduzindo a velocidade superficial do gás até atingir o regime de leito fixo. A velocidade superficial do gás era reduzida por meio do inversor de frequência com decréscimos de 0,16 Hz. A partir do leito fixo, foram coletados mais 10 pontos de pressão, a fim de construir a curva fluidodinâmica com uma quantidade de pontos adequada nesta região. Finalizado o teste, o inversor e o soprador foram desligados para a construção da curva fluidodinâmica do sistema.

Os dados foram agrupados em uma planilha do Excel®, como mostra a Figura 14. Em seguida, construiu-se a curva fluidodinâmica. Com estes dados foi possível identificar a região de defluidização do leito e, a partir desta informação, conseguiu-se que o sistema fosse mantido com uma velocidade superficial do gás na região onde a segregação pode ser potencializada, verificando assim, a intensidade de segregação para diferentes proporções de misturas.

	A	B	C	D	E	F	G
4	u_0 (m/s)	$f_{central}$ (Hz)	$P_{leito-placad}$ (Pa)	F_{invers} (Hz)	P_{leito_vazio} (Pa)	P_{leito} (Pa)	
5	0,22	7,06	881,33	14,00	20,13	861,20	
6	0,21	7,15	893,10	13,84	19,21	873,89	
7	0,21	7,03	885,67	13,68	18,42	867,25	
8	0,20	7,06	884,98	13,52	17,32	867,66	
9	0,20	7,06	884,26	13,36	16,41	867,84	
10	0,20	7,06	894,63	13,20	16,41	878,22	
11	0,19	7,04	878,81	13,04	14,73	864,08	
12	0,19	6,96	873,30	12,88	13,85	859,45	
13	0,18	7,01	870,70	12,72	12,98	857,72	
14	0,18	7,04	873,21	12,56	12,01	861,19	
15	0,17	6,90	868,78	12,40	11,26	857,51	
16	0,17	6,90	858,05	12,24	10,45	847,61	
17	0,16	6,92	857,72	12,08	9,51	848,21	
18	0,16	7,07	848,84	11,92	8,66	840,18	
19	0,16	6,97	845,55	11,76	7,82	837,73	
20	0,15	6,94	823,71	11,60	7,12	816,59	
21	0,15	7,02	819,78	11,44	6,19	813,59	
22	0,14	6,80	812,12	11,28	5,49	806,63	
23	0,14	6,85	830,60	11,12	4,48	826,12	
24	0,13	6,88	816,46	10,96	3,57	812,89	
25	0,13	6,75	789,36	10,80	2,85	786,51	
26	0,12	6,64	788,84	10,64	1,99	786,84	
27	0,12	6,63	783,83	10,48	1,21	782,62	
28	0,11	6,75	781,79	10,32	0,24	781,55	

Figura 14: Dados coletados no LabView™ estruturados no Excel
Fonte: Autoria própria

Após a elaboração da curva fluidodinâmica (pressão estática *versus* velocidade superficial do gás) e verificação da região de defluidização, o sistema foi acionado novamente a uma frequência do inversor de 14 Hz e mantido por 5 minutos. Em seguida, esta frequência foi reduzida até um ponto dentro da região de defluidização do sistema (Figura 15), obtido através da curva fluidodinâmica, sendo que, neste ponto, o sistema foi mantido por 10 minutos. Por fim, todo o sistema de aquisição de dados, inversor de frequência e soprador foram desligados.

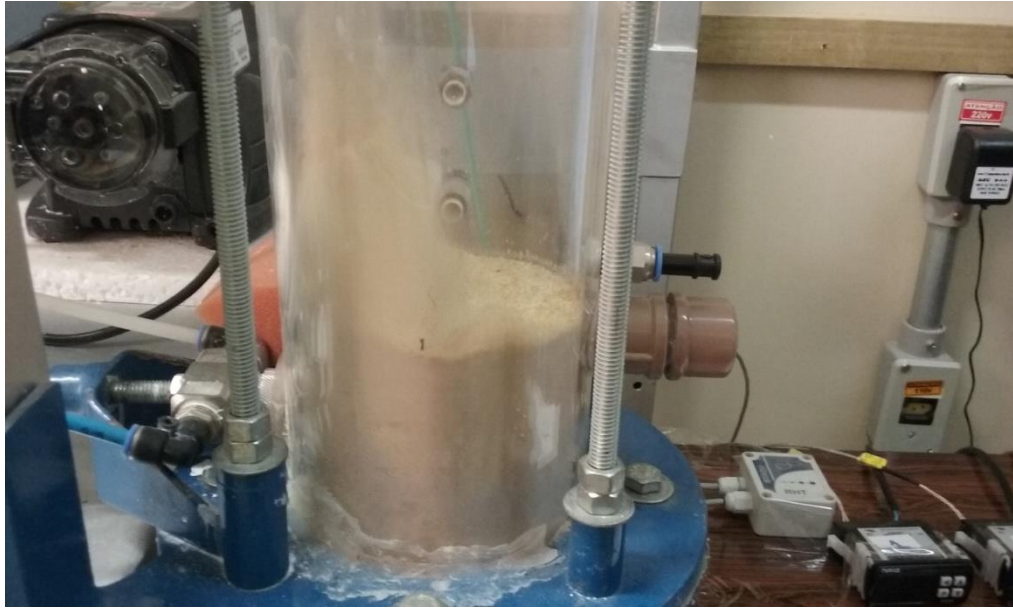


Figura 15: Leito fluidizado em condição de mínima fluidização (0,057 m/s)
Fonte: Autoria própria

As etapas do procedimento experimental para obtenção da curva fluidodinâmica são resumidas no fluxograma da Figura 16.

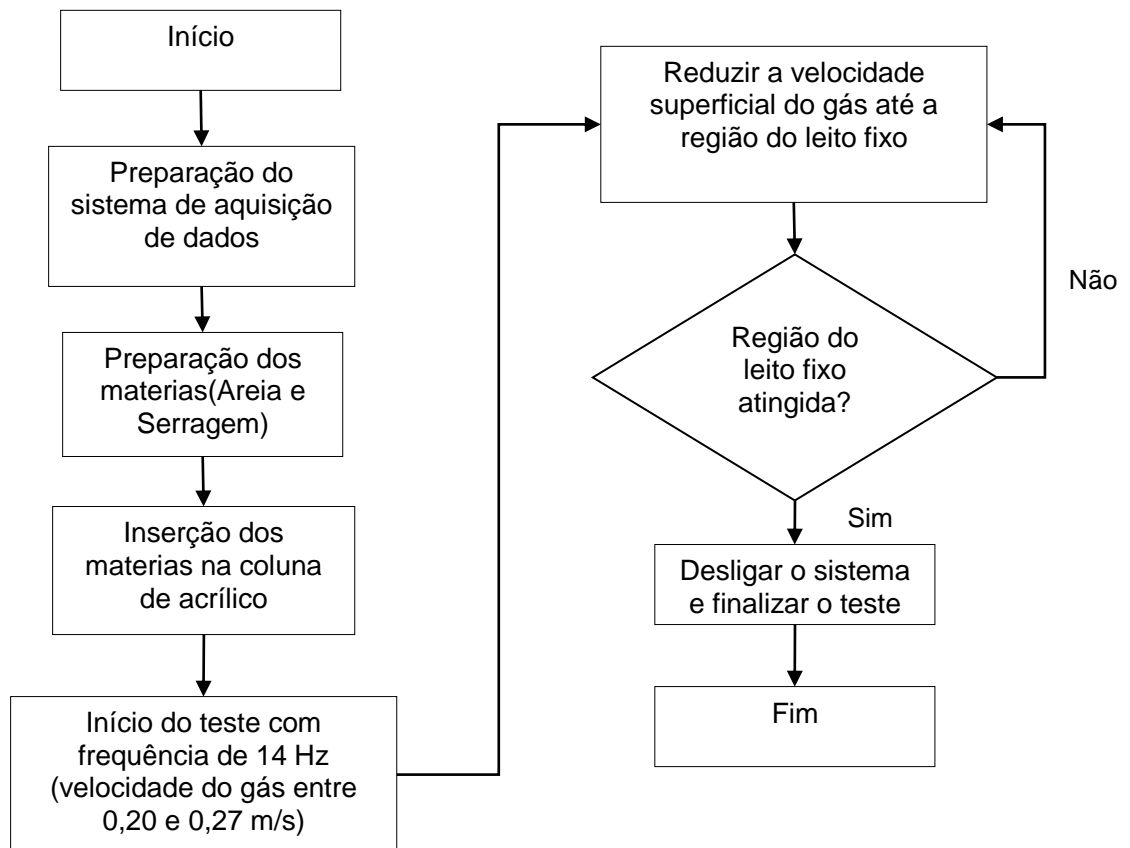


Figura 16: Fluxograma das etapas para obtenção da curva fluidodinâmica
Fonte: Autoria própria

Ao término da primeira parte do ensaio, foi iniciada a etapa de retirada do material do leito, a qual foi realizada por camadas, como mostrado na Figura 17. As camadas foram divididas em tamanhos iguais utilizando régua. Após a divisão, cada camada foi retirada do leito com a ajuda de um aspirador de pó (marca: Electrolux, 1400 W). O material era recolhido e transferido para um copo de béquer, e com o auxílio de uma peneira Tyler mesh 48, com 300 mm de abertura de malha, foi realizada a separação da areia e serragem.

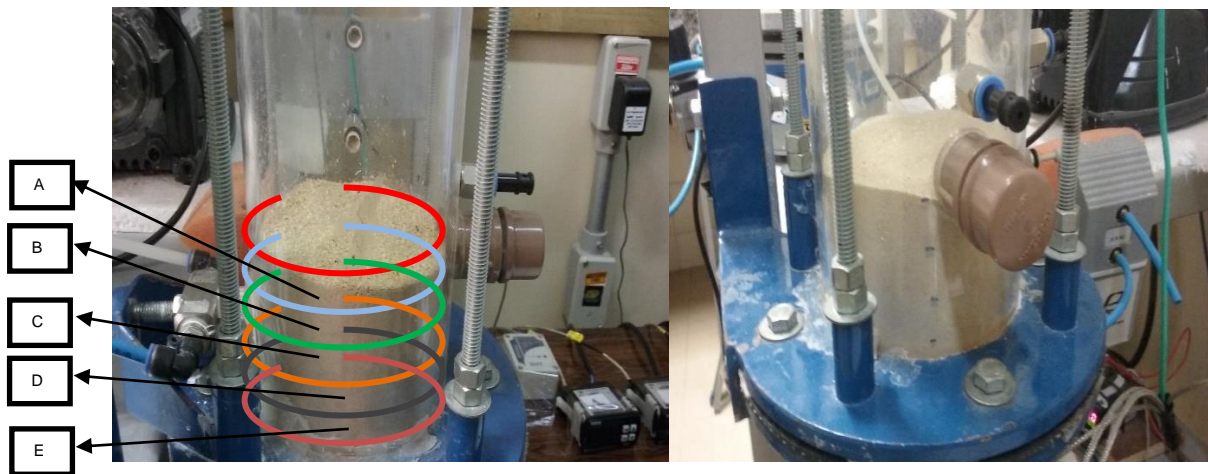


Figura 17: Separação do leito fluidizado em camadas
Fonte: Autoria própria

Esta peneira foi previamente escolhida de tal forma que fosse possível reter apenas as partículas de serragem. Na sequência da separação foi pesada a quantidade de areia e de serragem encontrada naquela camada, bem como, determinado o percentual mássico de cada material utilizando uma balança analítica com faixa de 0 a 200 g e resolução de 0,01 g. Este processo foi repetido para as outras quatro camadas presentes no leito e, no final, a curva de segregação do sistema foi encontrada, sendo esta apresentada nos resultados e discussões. O fluxograma deste processo é ilustrado na Figura 18.

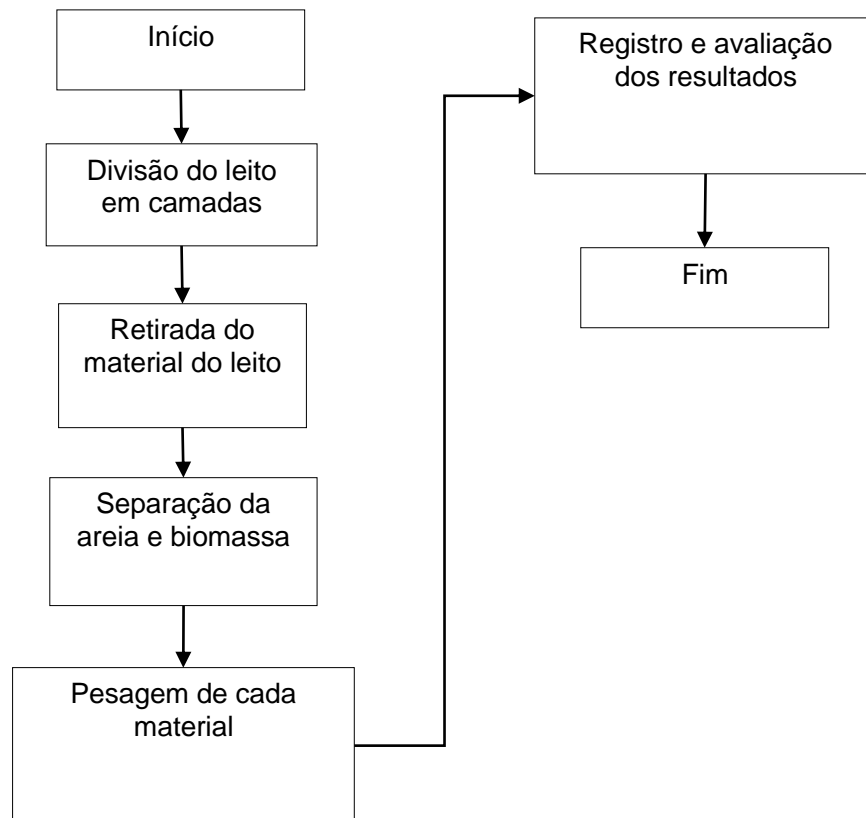


Figura 18: Fluxograma das etapas do processo de retirada de biomassa/areia do leito para análise da segregação
Fonte: Autoria própria

3.4.1 Determinação do estado de mínima fluidização

A determinação do estado de mínima fluidização da mistura areia-biomassa foi realizada a partir da metodologia de análise espectral Gaussiana, desenvolvida por Parise (2007), sendo utilizada para identificar a transição de regime fluidodinâmico do presente trabalho. Para essa finalidade, inicialmente, são coletados 2048 pontos de pressão manométrica no plenum a uma frequência de amostragem de 400 Hz (salientando que este valor de frequência tem sido usado por vários pesquisadores, como por exemplo, BRIENS *et al.*, 2003; BAI *et al.*, 2005, PARISE *et al.*, 2008; PARISE *et al.*, 2009, SILVA *et al.*, 2011 e SILVA, 2015). Após esse procedimento, esses sinais de pressão são filtrados utilizando filtro digital (*IRR*-resposta de impulso infinito - do tipo passa baixa, com topologia *Butterworth*, ordem igual a 30, frequência de corte de 20 Hz) e realiza-se a centralização na média (*mean centring*). A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é aplicada neste sinal de

pressão centralizado, produzindo um espectro de pressão. Em seguida, é realizado um ajuste deste sinal na curva, dada pela Equação 39:

$$G(f_k) = Ae^{-\frac{(f_k - f_m)^2}{2\sigma^2}} \quad (39)$$

Aplicando o logaritmo natural na Equação 39 e utilizando o método dos mínimos quadrados, dado pela Equação 40, a frequência central, f_c , pode ser determinada.

$$e_k = \sum_{k=0}^{N-1} \{\ln[A_e(f_k)] - \ln[G(f_k)]\}^2 \quad (40)$$

O valor da frequência central é o parâmetro utilizado para o estudo da transição de regimes de fluidização do presente trabalho.

3.4.2 Estudo de segregação das partículas

Os ensaios experimentais para o estudo de segregação das misturas binárias areia-serragem foram realizados seguindo a técnica de planejamento fatorial descrita por Montgomery (2004). Mediante esta técnica, o efeito simultâneo de vários fatores controláveis de um experimento pode ser analisado em relação a uma ou várias variáveis de resposta, economizando custos operacionais e tempo de execução. Adicionalmente, o planejamento fatorial permite avaliar o nível de confiança estatística dos resultados alcançados e elaborar modelos empíricos (BARROS NETO *et al.*, 2003).

3.4.3 Tratamento estatístico dos resultados experimentais

Os resultados obtidos dos experimentos foram analisados do ponto de vista dos efeitos produzidos pelas variações dos fatores controláveis sobre a intensidade da segregação (ângulo da linha de regressão das concentrações de biomassa) e do caos induzido na fluidodinâmica do leito fluidizado.

Myers e Montgomery (2002) estabelecem que, para um planejamento fatorial do tipo 2^2 , o efeito médio ou principal (ME), provocado por cada fator (A e B) sobre a resposta de interesse é calculada conforme as Equações 41 e 42, respectivamente:

$$ME_A = \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] \quad (41)$$

$$ME_B = \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] \quad (42)$$

Nas equações anteriores, n representa o número de réplicas utilizadas nos experimentos; a , a combinação de fatores com nível alto de A e nível baixo de B; b , a combinação de fatores com nível baixo de A e nível alto de B; ab , a combinação de ambos fatores no nível alto, e (1) , a combinação de ambos os fatores no nível baixo.

Por outro lado, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), com o propósito de determinar a significância estatística dos efeitos causados pelas duas variáveis controladas sobre as respostas de interesse. Para essa análise, foi necessário calcular os valores das somas dos quadrados (SS) dos efeitos principais e das interações entre variáveis, de acordo com as expressões das Equações 43 a 45.

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{4n} \quad (43)$$

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{4n} \quad (44)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n} \quad (45)$$

Ainda, o total da soma dos quadrados (SS_T), o qual apresenta $4n-1$ graus de liberdade, é determinado conforme a Equação 46:

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{(\sum y)^2}{4n} \quad (46)$$

Na equação anterior, y_{ijk} representa o valor de cada resposta e $\sum y$, a somatória de todos os valores de resposta obtida nos experimentos. Portanto, o erro da soma dos quadrados (SS_E), o qual tem $4(n-1)$ graus de liberdade, foi calculado pela Equação 47:

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (47)$$

A média dos quadrados (MS) dos efeitos principais, da interação entre fatores e do erro foram determinados como sendo a razão entre a respectiva soma dos quadrados e o seu grau de liberdade. Finalmente, o valor da estatística F_0 para cada fonte de variação (A , B , e AB) foram calculados de acordo com a Equação 48 e as respectivas probabilidades (p -values) da distribuição F , a fim de determinar a significância do efeito do fator controlado ao nível de confiança de 95% ($\alpha = 0.05$).

$$F_0 = \frac{MS_{variation}}{MS_{error}} \quad (48)$$

A Tabela 6 ilustra o planejamento fatorial 2^2 em triplicata dos ensaios experimentais realizados no presente trabalho.

Tabela 6: Planejamento Fatorial 2^2 com triplicata

Ensaio	Razão de mistura (%)	Inventário Total (kg)	m_{areia} (kg)	$m_{biomassa}$ (kg)
1	5,0	1,0	0,9500	0,0500
2	5,0	0,5	0,4750	0,0250
3	2,5	1,0	0,9750	0,0250
4	2,5	0,5	0,4875	0,0125
1*	5,0	1,0	0,9500	0,0500
2*	5,0	0,5	0,4750	0,0250
3*	2,5	1,0	0,9750	0,0250
4*	2,5	0,5	0,4875	0,0125
1**	5,0	1,0	0,9500	0,0500
2**	5,0	0,5	0,4750	0,0250
3**	2,5	1,0	0,9750	0,0250
4**	2,5	0,5	0,4875	0,0125

Fonte: Autoria própria

3.4.4 Estudo de caos

Para misturas binárias estudadas, foi realizada a análise de caos utilizando *Wavelet* e o teste 0-1 com o auxílio do *software* Matlab®, conforme as equações principais descritas a seguir.

3.4.4.1 *Wavelet*

O *Wavelet Toolbox*™ da Matlab® é uma ferramenta para a análise de sinais. O *software* inclui um grande número de ondas que podem ser utilizados para efetuar uma análise tanto discreta e contínua (Matlab, 2012). Os valores obtidos com a aplicação da *Wavelet Toolbox*™ da MATLAB® em um conjunto de séries temporais apresentam o módulo dos todos os coeficientes *wavelet* tem um escalograma e o módulo da escala escolhida, com a pseudo-frequência calculada pela relação na Equação 49 (MATLAB, 2012):

$$F_a = \frac{F_C}{a \cdot \Delta} \quad (49)$$

Onde F_C é a frequência central *wavelet* em Hz, F_a é o pseudo-frequência da escala “a”, em Hz, sendo “a” uma constante e Δ é o período de amostragem.

A Equação 50 representa o complexo *Morlet Wavelet* da *Wavelet Toolbox*™ do *software* Matlab®, onde: $(\Psi(x))$ é a *wavelet*, (x) é o deslocamento, (π) é uma constante matemática, (F_B) é o parâmetro de largura de banda positiva, (F_C) representa a frequência central de *Wavelet* em Hz. A fim de obter uma melhor resolução da análise de ondas contínuas, os parâmetros (F_B) e (F_C) devem ser ajustados de acordo com as características do sinal a ser analisado (MATLAB, 2012):

$$\Psi(X) = (\pi F_B)^{-0.5} e^{2i\pi F_C X} e^{-\frac{X^2}{F_B}} \quad (50)$$

3.4.4.2 Teste 0-1

O teste 0-1 para o caos toma como entrada uma série temporal de medições e retorna um único valor escalar (K^*), sendo 0 para comportamento periódico e 1 para comportamento caótico (GOPAL *et al.*, 2013).

O teste 0-1 é muito útil em sistemas onde os expoentes Lyapunov são difíceis de calcular. O teste de 0-1 também tem sido utilizado com sucessora análise de sistemas caóticos (BERNARDINI *et al.*, 2013; LITAK *et al.*, 2009; FELIX *et al.*, 2014; PICCIRILLO *et al.*, 2015a, 2015b; BERNARDINI e LITAK, 2015).

De acordo com Gopal *et al.*(2013) valor de K^* pode ser obtido a partir de:

$$K^* = \frac{\text{cov}(X, M(c))}{\sqrt{\text{var}(X) \text{var}(M(c))}} \quad (51)$$

Onde os vetores $X=[1,2,\dots,n_{max}]$, e $M(c)= [M(1,c),\dots, M(1, n_{max})]$, ($c \in (0, \pi)$) é uma frequência fixa escolhida arbitrariamente, e:

$$M(n, c) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(p(j+n) - p(j))^2 + (q(j+n) - q(j))^2] \quad (52)$$

$$p(i) = \sum_{j=0}^i \frac{(x_j - \bar{x})}{\sigma_x} \cos(jc); \quad q(i) = \sum_{j=0}^i \frac{(x_j - \bar{x})}{\sigma_x} \sin(jc) \quad (53)$$

Onde: \bar{x} e σ_x é o valor médio e desvio quadrado da serie x_i , e N é o tamanho da amostra. Para o caso de $K^* \cong 0$ indica comportamento periódico e $K^* \cong 1$ indica um comportamento caótico.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos testes experimentais obtidos em laboratório. Especificamente, são analisados os resultados referentes ao estado de mínima fluidização, à intensidade da segregação e à presença de comportamento caótico.

4.1 DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO

Nesta seção são apresentados os resultados pertinentes aos ensaios 1, 2, 3 e 4, sendo que os demais resultados estão no Apêndice A.

As Figuras 19 e 20 ilustram o comportamento fluidodinâmico da areia pura com um inventário de 0,5 kg e 1 kg e altura do leito de 4,5 e 9 cm, respectivamente. Na Figura 19, verifica-se que a região de defluidização, caracterizada pela queda pronunciada do valor da frequência central, varia entre 0,02 e 0,05 m/s. Já na Figura 20, a região de defluidização mantém-se entre 0,02 e 0,06 m/s. Comparando essas duas figuras, pode-se observar que os valores da frequência central quando o leito está fluidizando ($u_o > 0,05$ m/s no caso da Figura 19, e $u_o > 0,06$ m/s para a Figura 20) são superiores no ensaio referente à Figura 19, já que neste caso o leito era composto por menos inventário, proporcionando assim maior quantidade de bolhas de ar, refletindo-se no aumento do valor da frequência central.

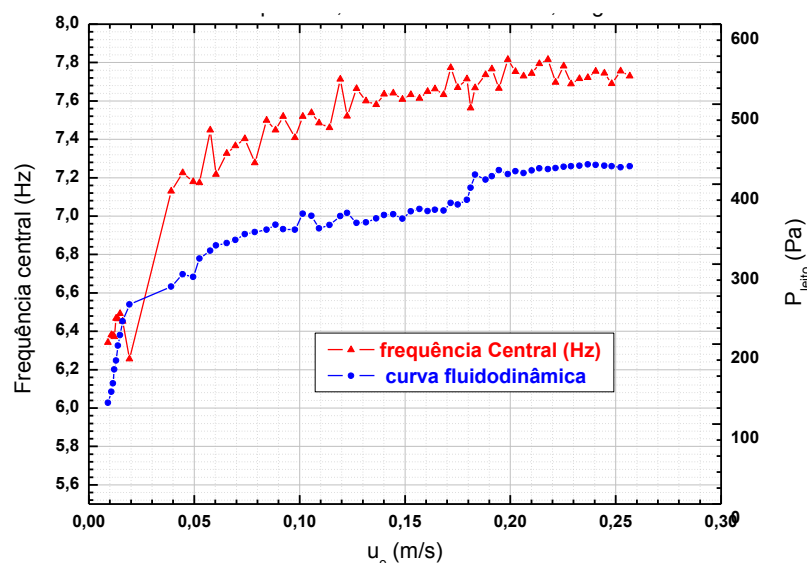


Figura 19: Perfil da frequência central - reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $D_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $m_{areia} = 0,5$ kg
Fonte: Autoria própria

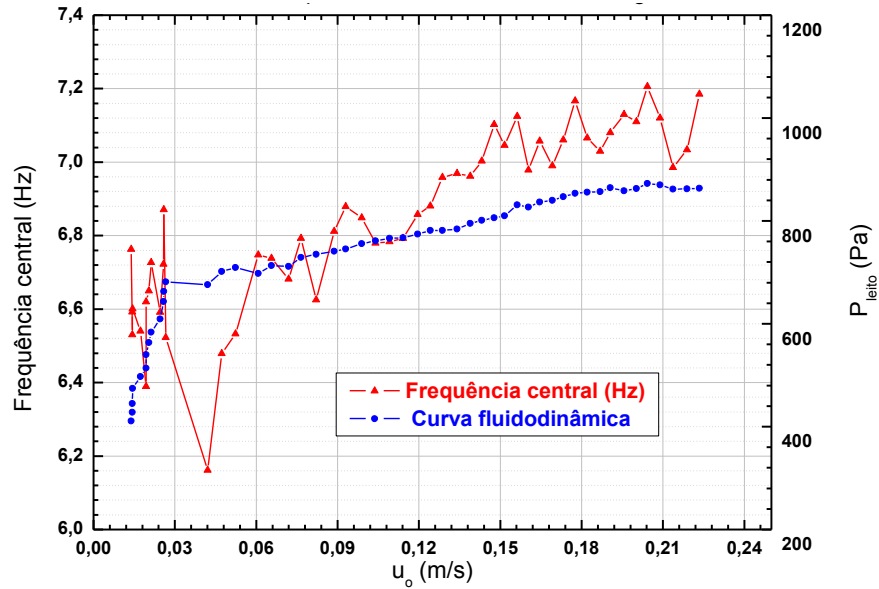


Figura 20: Perfil da frequência central - reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $m_{\text{areia}} = 1 \text{ kg}$
Fonte: Autoria própria

A Figura 21 apresenta a curva fluidodinâmica referente ao ensaio realizado com inventário de 1 kg (altura do leito de 9 cm) e razão mássica de 5%. Pode-se verificar que a velocidade de mínima fluidização para esta condição é de aproximadamente 0,025 m/s. A curva da frequência central neste ensaio não é clara para analisar a região de defluidização (que varia entre 0,055 m/s e 0,025 m/s). Isto ocorreu devido à instabilidade no comportamento das bolhas dentro do leito promovendo maiores amplitudes de frequência.

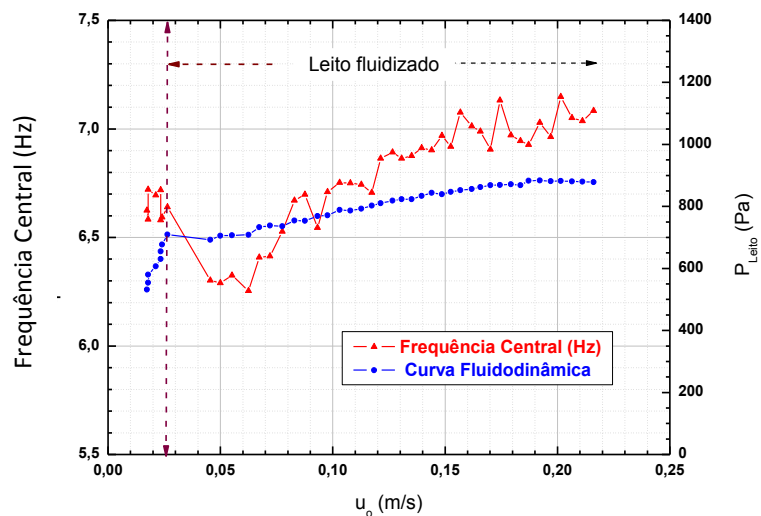
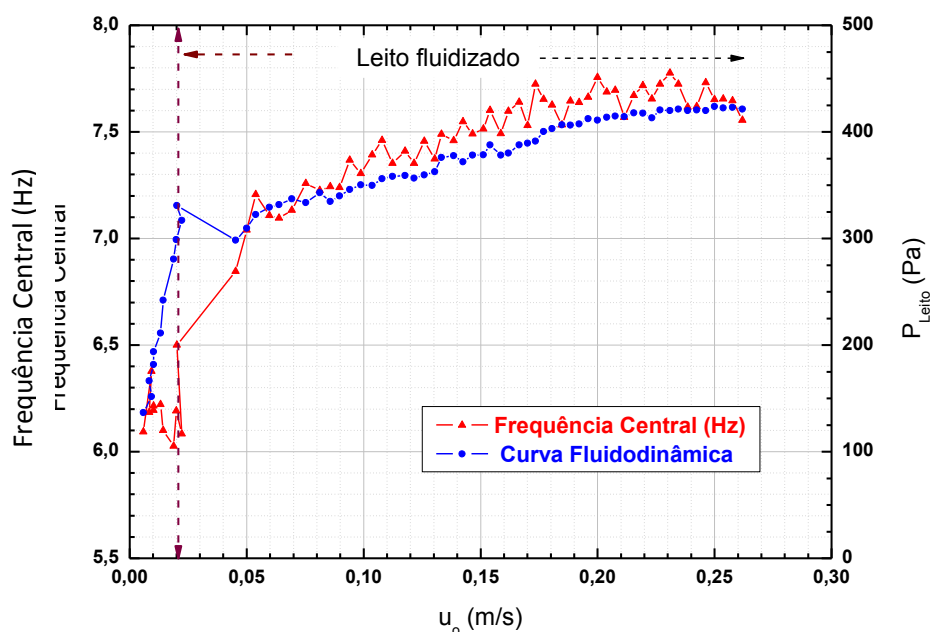


Figura 21: Perfil da frequência central - reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$
Fonte: Autoria própria

Na Figura 22, referente ao teste 2 (com inventário de 0,5 kg, altura do leito de 4,5 cm e razão mássica de 5%), observa-se que, pelo comportamento da curva da frequência central, foi possível visualizar de forma mais clara a região onde a mistura tende a defluidizar. Esta região é notada a partir do momento da queda brusca da curva de frequência, que se inicia em uma velocidade de 0,05 m/s até aproximadamente 0,02 m/s. Nesta condição de leito (< 5 cm), uma maior quantidade de bolhas com diâmetros menores é formada pela mistura, promovendo frequências maiores de oscilação de processo e menores amplitudes.



**Figura 22: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$
Fonte: Autoria própria**

Na Figura 23, apresenta-se o terceiro teste, realizado com razão mássica de 2,5% de biomassa, inventário de 1 kg e altura do leito de 9 cm. Neste caso, a curva fluidodinâmica apresentou um comportamento similar as já demais apresentadas. A velocidade de mínima fluidização para esta condição foi próxima a 0,050 m/s. A curva da frequência central também não é tão clara nesta condição, pois, apesar da razão mássica ser menor, a altura do leito é a mesma do ensaio 1 (9 cm).

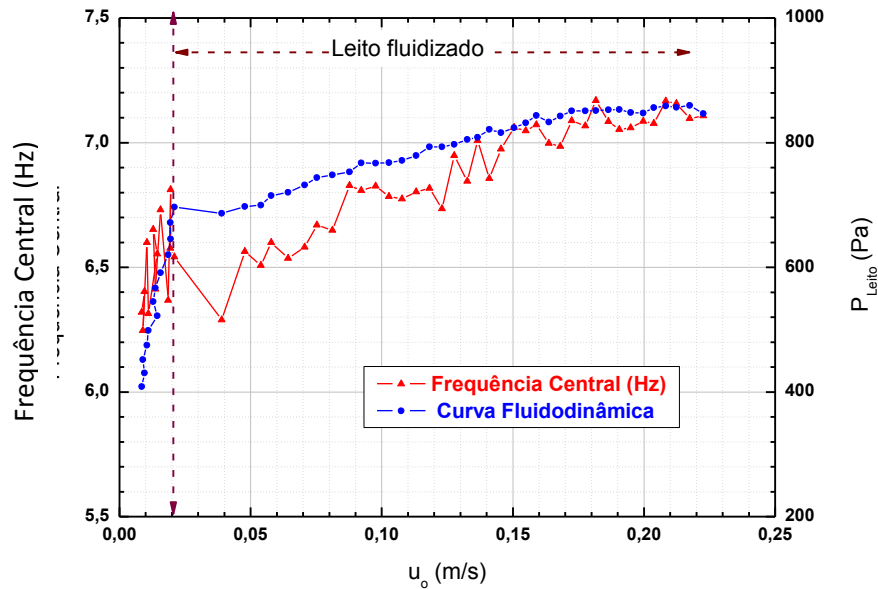


Figura 23: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$
Fonte: Autoria própria

Na Figura 24, o quarto teste apresenta uma razão mássica de 2,5% de biomassa, inventário de 0,5 kg e altura do leito de 4,5 cm, e assim como observado na Figura 22, a curva de frequência é mais clara para observar a região de defluidização. Apesar da quantidade de biomassa ser diferente, percebe-se que a região de defluidização é aproximadamente a mesma, se comparados com o segundo teste (Fig. 22).

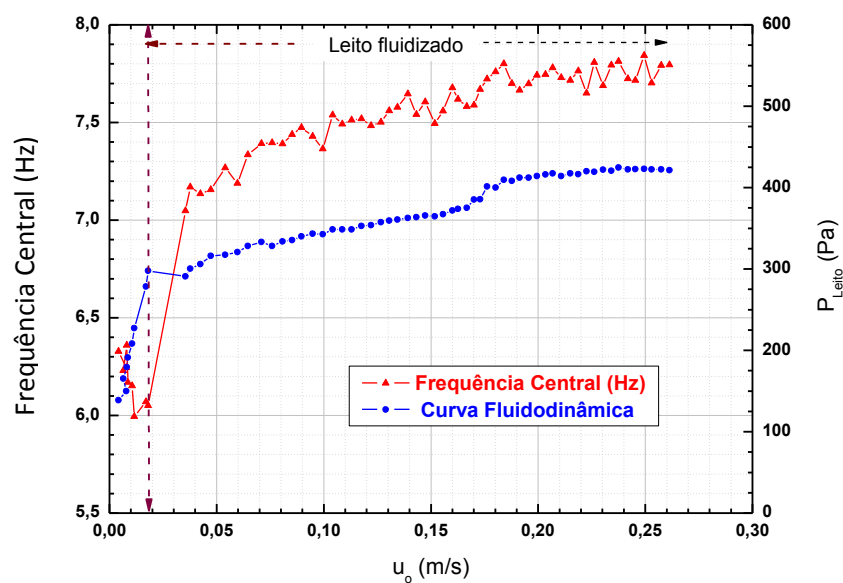


Figura 24: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$
Fonte: Autoria própria

Comparando os resultados obtidos com areia pura e com a mistura areia-biomassa, verifica-se que as curvas fluidodinâmicas foram semelhantes, bem como a velocidade de mínima fluidização. No geral percebe-se que para estas condições propostas no trabalho, a utilização de uma mistura não teve influência na velocidade de mínima fluidização.

4.2 ANÁLISE DA SEGREGAÇÃO

A intensidade da segregação foi analisada a partir do cálculo do ângulo de inclinação da curva de variação porcentual da fração de biomassa presente na mistura em relação à altura adimensional do leito fixo. Os resultados pertinentes a cada caso estudado são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Ângulos de inclinação das curvas de segregação

Ensaio	Razão de mistura (%)	Inventário Total (kg)	Inclinação (°)
1	5,0	1,0	55,73
2	5,0	0,5	44,99
3	2,5	1,0	58,57
4	2,5	0,5	35,66
1*	5,0	1,0	50,02
2*	5,0	0,5	31,25
3*	2,5	1,0	44,45
4*	2,5	0,5	30,37
1**	5,0	1,0	55,60
2**	5,0	0,5	39,00
3**	2,5	1,0	58,83
4**	2,5	0,5	37,61

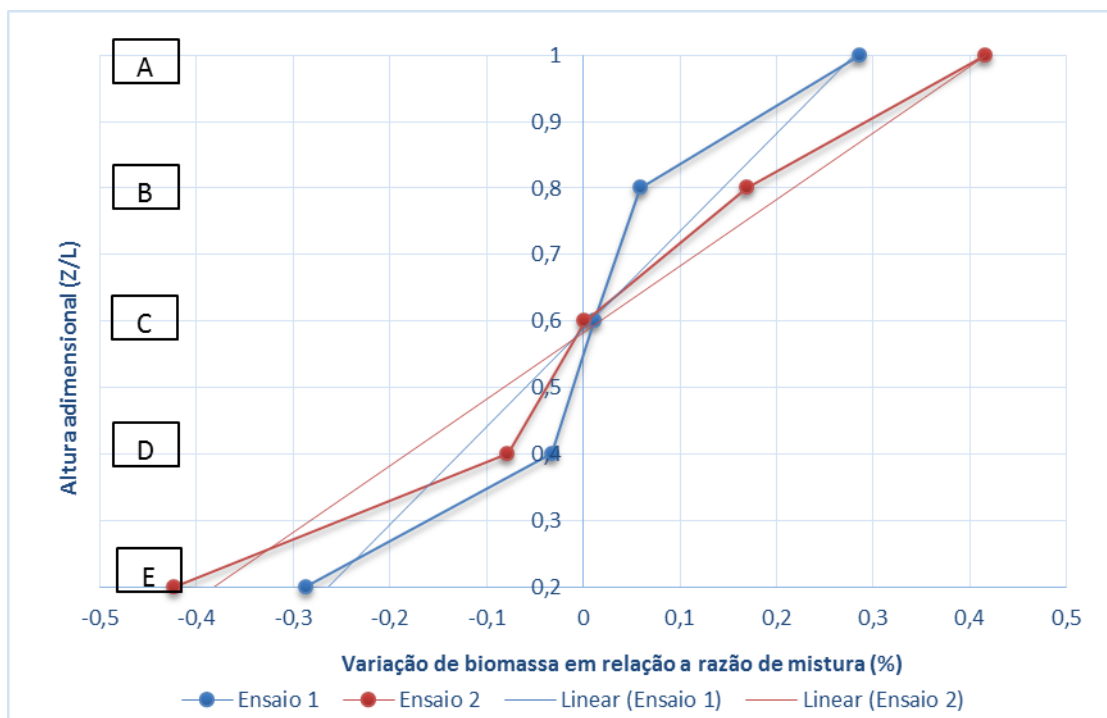
Fonte: Autoria própria

Os valores da Tabela 7 mostram que, nas faixas analisadas de concentração de biomassa no leito e altura do mesmo, o ângulo de inclinação pode chegar a duplicar (30,37 a 58,83°), sugerindo alguma variação importante na intensidade de segregação na combinação das variáveis controladas nos experimentos. Como

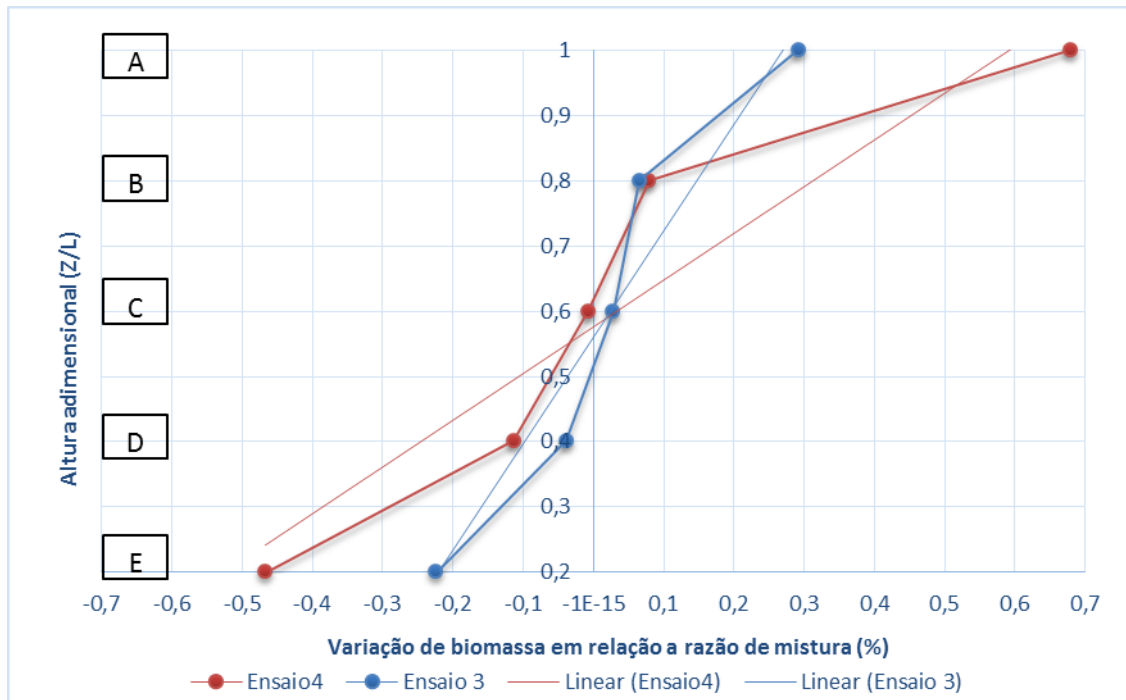
descrito anteriormente, valores menores do ângulo de inclinação indicam alta segregação, em quanto, ângulos maiores, leitos mais homogêneos.

As Figuras 25 e 26 ilustram as curvas de tendência na intensidade de segregação pelas camadas utilizadas para coletar o material, envolvendo os quatro tratamentos ou combinações do planejamento experimental, para os casos de razão mássica biomassa/mistura de 2,5 e 5,0% e alturas do leito variando de 0,5 a 1,0 kg. As curvas de intensidade de segregação para todos os casos analisados são apresentados no Apêndice B.

Na Figura 25, apresenta-se a curva de intensidade média de segregação para os tratamentos com inventário de sólidos mudando de 1,0 para 0,5 kg, mantendo a relação mássica biomassa/mistura em 5,0%. Já, na Figura 26, ilustra-se a curva de intensidade média para os tratamentos com inventário de sólidos mudando de 1,0 para 0,5 kg, mantendo a relação mássica biomassa/mistura em 2,5%.



**Figura 25: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 5\%$. Ensaio 1: $I_m = 1,0 \text{ kg}$; Ensaio 2: $I_m = 0,5 \text{ kg}$
Fonte: Autoria própria**



**Figura 26: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$. $R_m = 2,5\%$. Ensaio 3: $I_m = 1,0 \text{ kg}$; Ensaio 4: $I_m = 0,5 \text{ kg}$
Fonte: Autoria própria**

Ao comparar o efeito da massa de sólidos na Figura 25, percebe-se que a segregação tende a intensificar-se (maior proporção de biomassa indo em direção ao topo do leito) quando o inventário de sólidos diminui de 1,0 para 0,5 kg. A mesma tendência no comportamento da segregação foi observada na Figura 26, sugerindo também uma maior intensidade de segregação para o leito mais raso. Este comportamento pode ser explicado pela maior dificuldade do deslocamento relativo da biomassa na presença de uma maior altura do leito, onde uma menor frequência no aparecimento de bolhas de gás poderia estar retardando ou impedindo o transporte eficiente da biomassa em direção ao topo do leito.

Em relação ao efeito da concentração de biomassa no leito de sólidos, as inclinações similares encontradas entre as curvas com igual inventário sugerem que não há mudanças importantes na intensidade da segregação quando a razão mássica biomassa mistura cai pela metade, de 5,0 para 2,5%. Resultados de outros autores reportando o efeito da altura do leito e da concentração de biomassa na mistura não foram encontrados na literatura para efeitos de comparação.

A fim de verificar a significância estatística dos efeitos observados, uma análise de variância (ANOVA) foi realizada sobre os valores do ângulo de inclinação obtidos. A Tabela 8 apresenta os resultados da ANOVA.

Tabela 8: Resultados da ANOVA dos efeitos sobre a intensidade da segregação

Fator	Soma dos quadrados (SS)	Graus de liberdade	Média dos quadrados (MS)	F ₀	p-valor
Inventário de sólidos	906,889	1	906,8885	25,94451	0,000937
Relação mássica biomassa/mistura	10,268	1	10,2675	0,29374	0,602601
Erro puro	279,639	8	34,9549		
Total SS	1208,996	11			

Fonte: Autoria própria

Os resultados da Tabela 8 confirmam a significância do efeito produzido pela alteração da altura do leito sobre a intensidade da segregação ao nível de confiança de 95% (p-valor < 0,05). Por outro lado, verifica-se o efeito não significativo da razão de biomassa na mistura sobre a intensidade da segregação na faixa testada. Os valores dos efeitos estimados são visualizados no gráfico de Pareto da Figura 27.

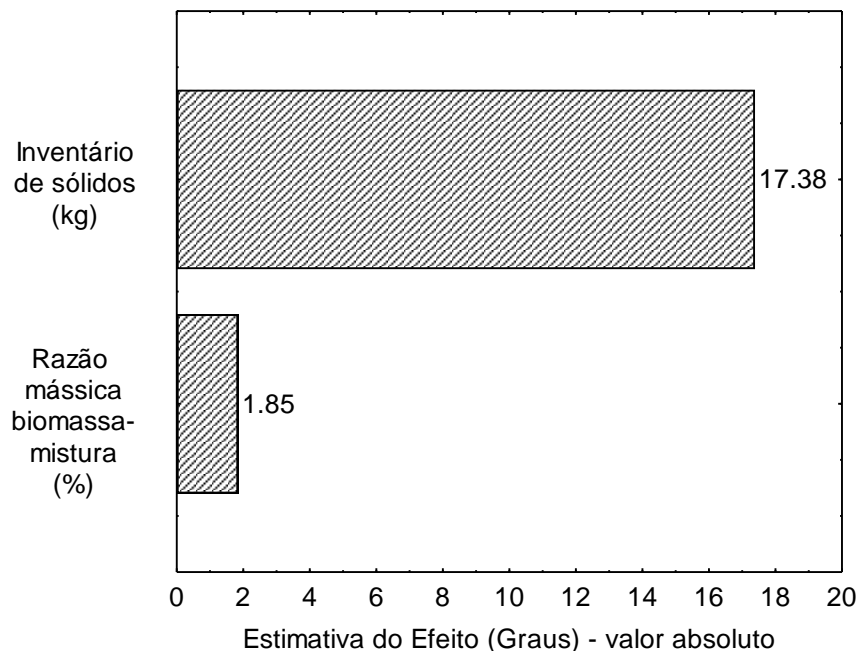


Figura 27: Estimativa do efeito sobre o ângulo de inclinação da curva de segregação
Fonte: Autoria própria

A Figura 27 mostra que, em média, o inventário de sólidos promove uma mudança de aproximadamente 17 graus no ângulo da curva de inclinação, enquanto que a razão mássica de biomassa/mistura, de apenas 2 graus.

4.3 ANÁLISE DE CAOS

Neste item apresenta-se uma análise qualitativa e quantitativa das flutuações de pressão do leito que foram registradas durante os ensaios de fluidização, a fim de determinar a presença ou não do comportamento caótico do escoamento gás-sólido nas condições operacionais previamente estabelecidas. Assim, nesta seção considera-se a análise quantitativa através do Teste 0-1 (Equação 51), conforme proposta de Gopal *et al.* (2013), e as análises qualitativas através do histórico no tempo, diagrama de fase, transformada rápida de Fourier (FFT) e através da análise da *Wavelet* utilizando o Toolbox do *software* Matlab™.

4.3.1 Análise qualitativa

Com o objetivo de auxiliar posteriormente na análise da presença de comportamento caótico na variável de interesse, inicialmente são representados o histórico no tempo (Figura 28), o diagrama de fase (Figura 29), a transformada rápida de Fourier-FFT (Figura 30), e a análise da *Wavelet* (Figura 31) para uma situação exemplo de um sistema com comportamento periódico ($y = \text{sen}(2\pi t)$), sendo $t = 0:25$ s.

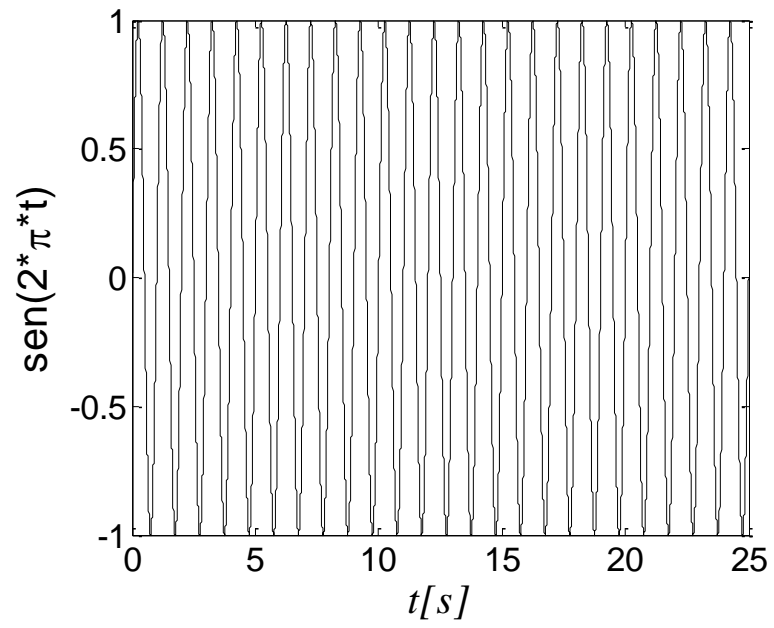


Figura 28: Histórico no tempo.
Fonte: Autoria própria

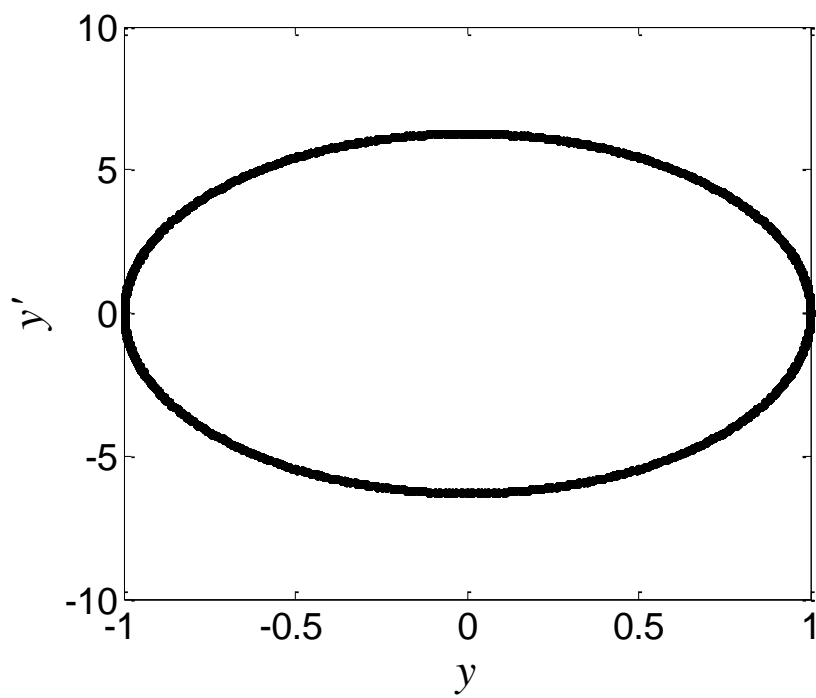


Figura 29: Diagrama de fase.
Fonte: Autoria própria

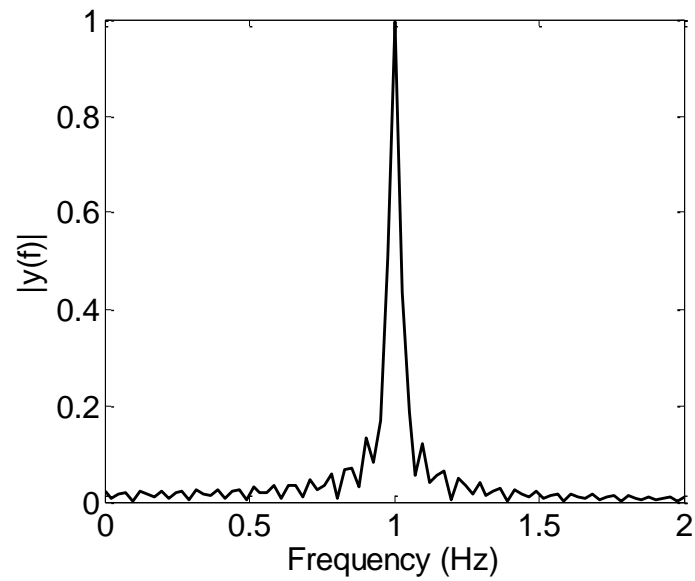


Figura 30: Transformada rápida de Fourier (FFT)
Fonte: Autoria própria

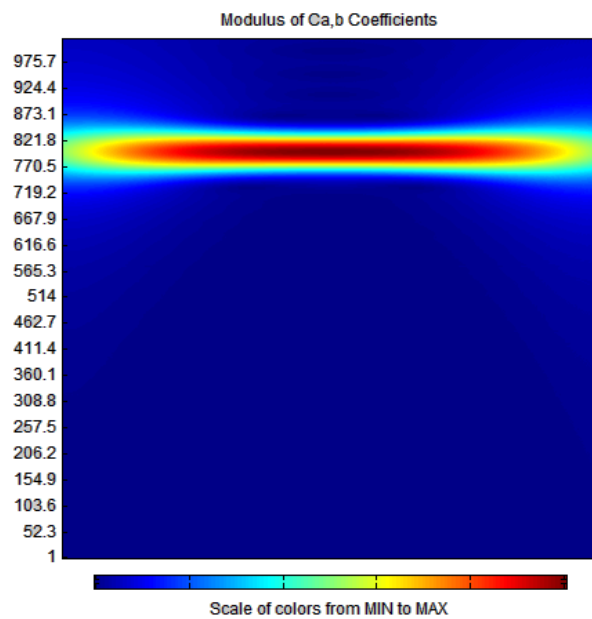


Figura 31: Resultado da Wavelet obtido do Toolbox do Matlab™
Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Figura 28, em um comportamento periódico fica explícito o período em que o comportamento se repete, sendo que, para o caso da função utilizada ($y = \text{sen}(2\pi t)$) o período é de 1,0 s. Para o caso de sistemas caóticos não haveria repetição no comportamento.

Na Figura 29 é apresentado o diagrama de fase (histórico do tempo (y) versus sua derivada (y')). Para sistemas periódicos, o comportamento segue uma órbita regular. Assim, para o caso ilustrado ($y = \text{sen}(2\pi t)$), o sistema tem apenas um período de oscilação, dessa forma, o diagrama de fase tende a uma elipse. Para sistemas com diferentes períodos, surgem laços no diagrama de fase.

Na Figura 30 é apresentada a FFT do sistema periódico, ficando evidente a frequência dominante de 1,0 Hz. A periodicidade também fica evidente na Figura 31 (*Wavelet*), a qual mostra que a distribuição de energia se concentra em apenas uma faixa.

O comportamento dos dados de pressão obtidos neste estudo, representativo para os quatro tratamentos ou combinações experimentais é apresentado na Figura 32. Observa-se que, ao contrário da Figura 28, não há repetição do período das ondas de pressão.

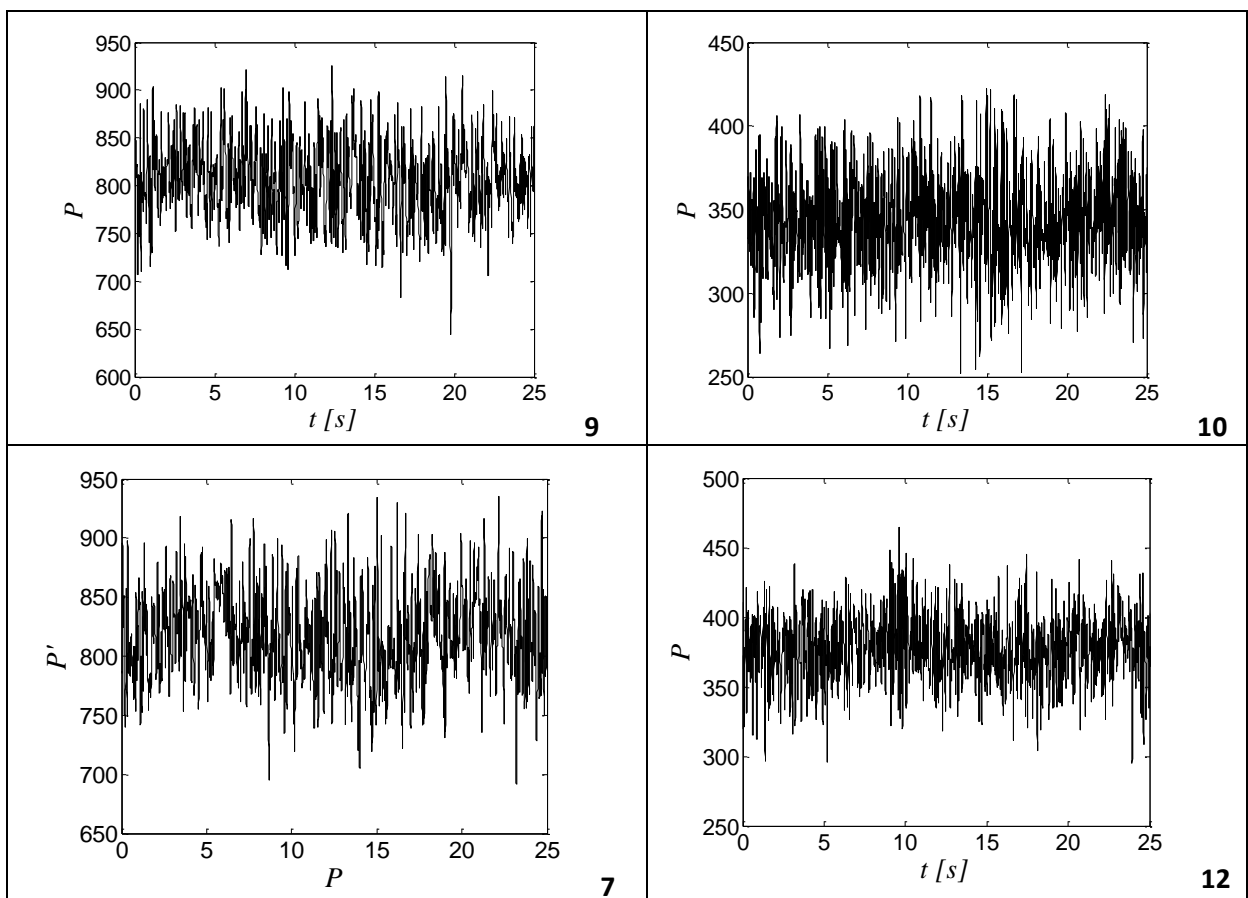


Figura 32: Histórico da pressão do leito (Pa) no tempo.
Fonte: Autoria própria

Na Figura 33 é apresentado o diagrama de fase dos quatro tratamentos experimentais. Como mostrado na Figura 29, no diagrama de fase (Pressão versus sua derivada) para sistemas periódicos, o comportamento segue uma órbita regular. No entanto, para os ensaios deste estudo, o sistema não possui uma órbita regular, indicando a presença de mais de um período de oscilação.

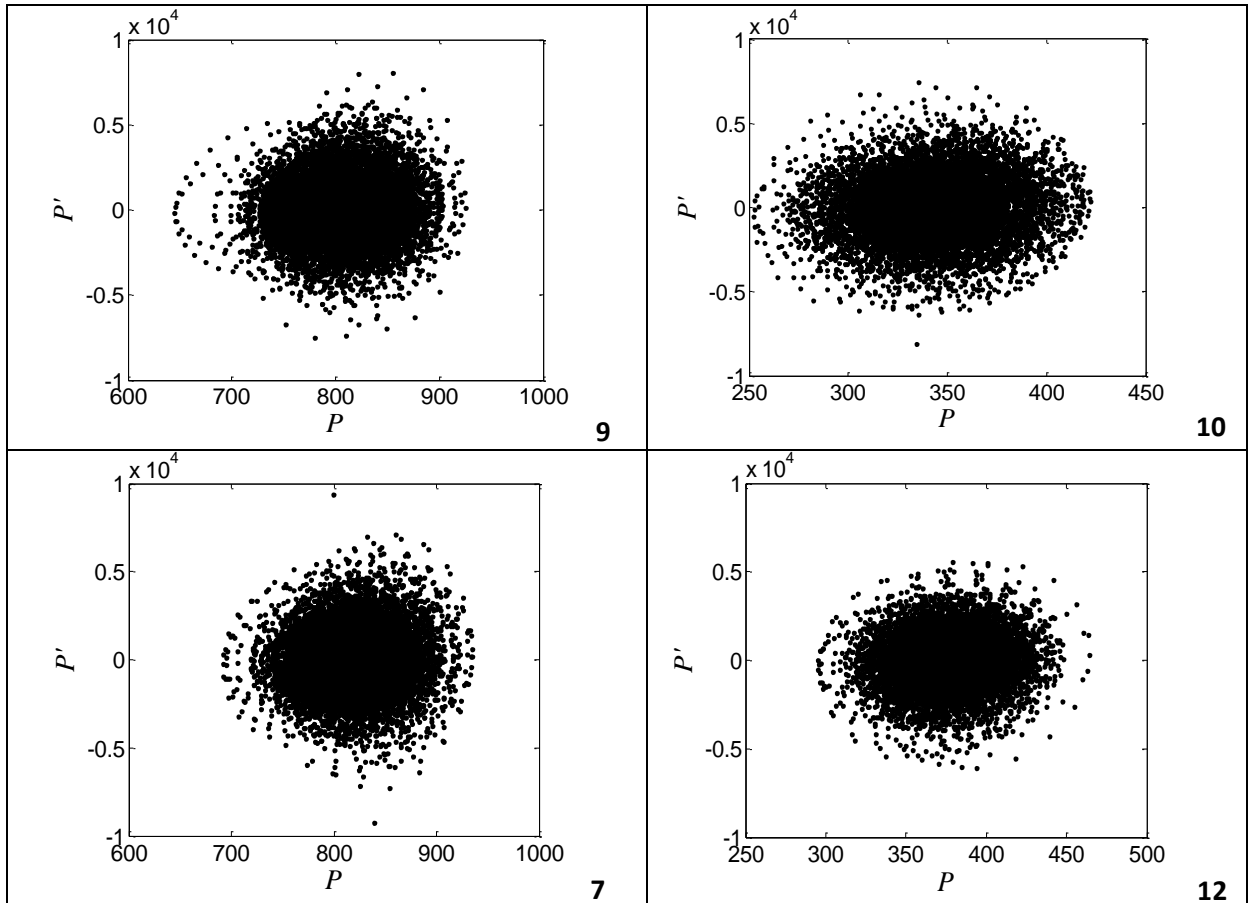


Figura 33: Diagrama de fase da pressão do leito (Pa).
Fonte: Autoria própria

Na Figura 34 é apresentada a FFT do sistema caótico, sendo que neste caso não existe apenas uma frequência dominante.

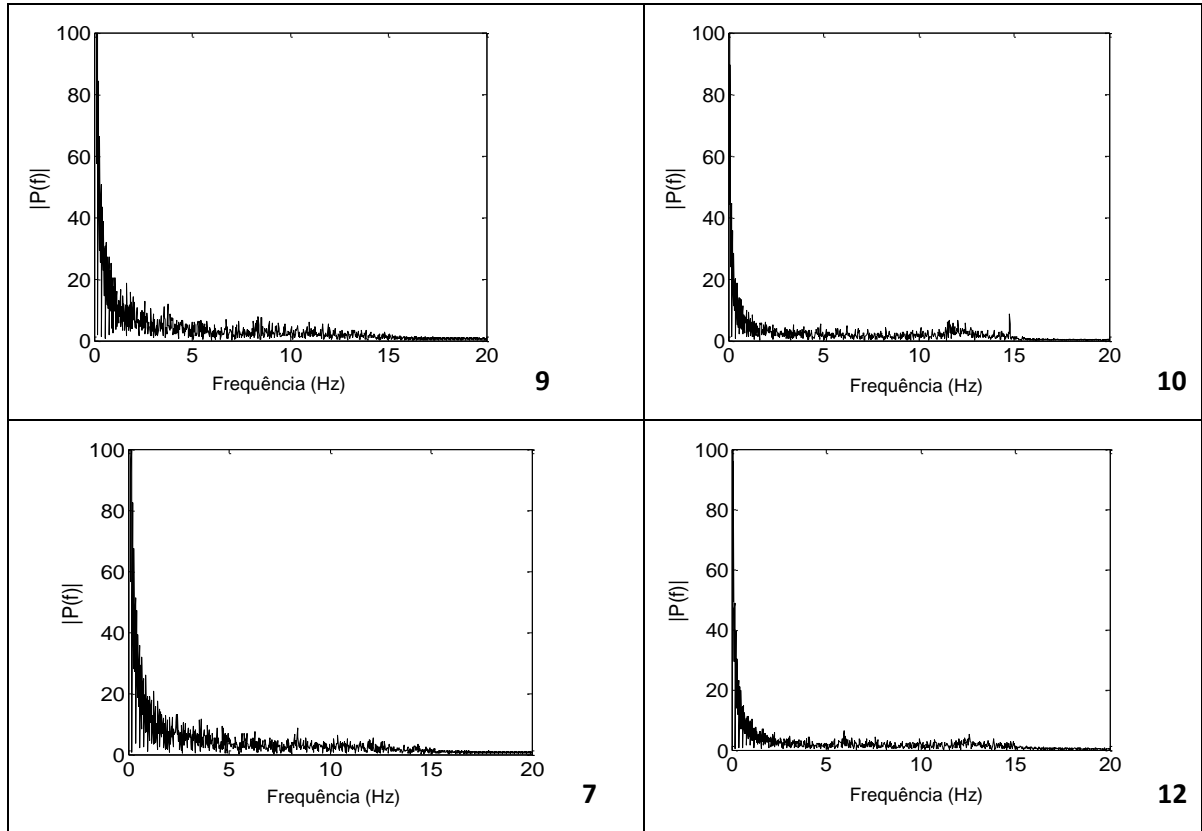
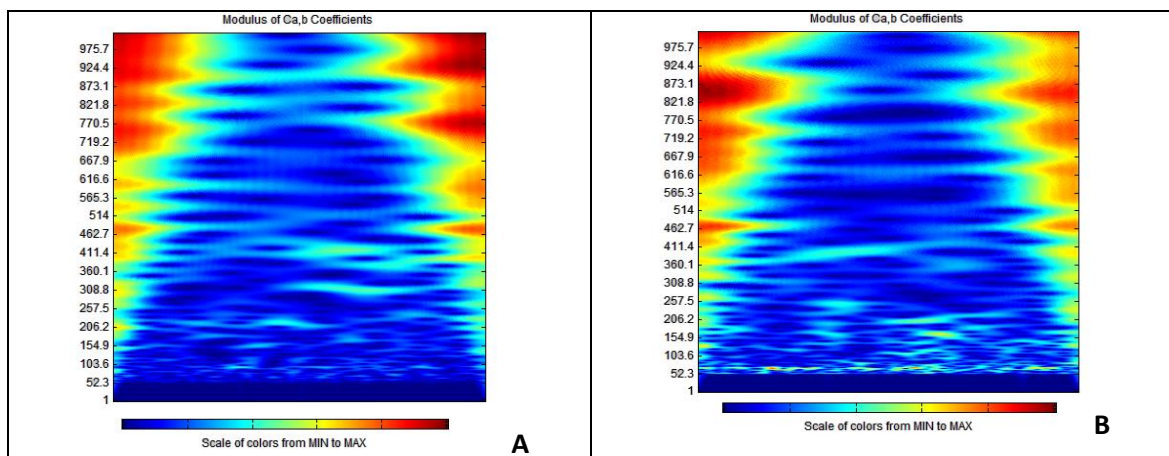


Figura 34: Transformada rápida de Fourier.
Fonte: Autoria própria

Na Figura 35 (*Wavelet*) também fica evidente que a distribuição de energia não se concentra apenas em uma faixa distinta. Para este tipo de comportamento caótico, a distribuição de energia é distribuída em várias faixas.



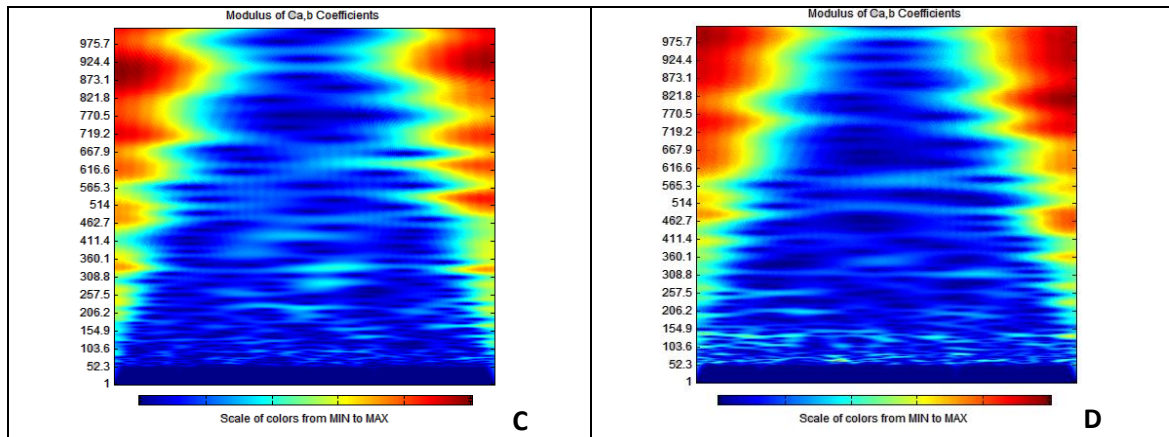


Figura 35: Resultado da *Wavelet* obtido do Toolbox do Matlab™
Fonte: Autoria própria

4.3.2 Análise quantitativa

A análise quantitativa de possibilidade de comportamento caótico foi realizada com base no teste 0-1, a partir dos 12 ensaios realizados. Na Tabela 9 são apresentados os valores de K^* (Equação (51)), obtidos das flutuações do sinal de pressão no sistema.

Tabela 9: Valores de K^* obtidos para cada experimento

Ensaio	RM (%)	Inv. Total (kg)	mareia (kg)	m_{biomassa} (kg)	K^*
1	5,0	1,0	0,95	0,05	0,9689
2	5,0	0,5	0,475	0,025	0,9794
3	2,5	1,0	0,975	0,025	0,9823
4	2,5	0,5	0,4875	0,0125	0,9793
5	5,0	1,0	0,950	0,05	0,9856
6	5,0	0,5	0,475	0,025	0,9877
7	2,5	1,0	0,975	0,025	0,9902
8	2,5	0,5	0,4875	0,0125	0,9858
9	5,0	1,0	0,950	0,05	0,9894
10	5,0	0,5	0,475	0,025	0,9908
11	2,5	1,0	0,975	0,025	0,9820
12	2,5	0,5	0,4875	0,0125	0,9875

Fonte: Autoria própria

Os resultados da Tabela 9 confirmam o comportamento caótico do sinal de pressão em todos os casos experimentais estudados, uma vez que o parâmetro K^* é próximo de 1,0. Este resultado é coerente com as informações extraídas da literatura, as quais verificam o caráter caótico do sinal de pressão obtido de escoamentos gás-sólido em leitos fluidizados.

Com o propósito de determinar a existência de algum efeito importante sobre o valor de K^* , promovido pelas mudanças no inventário de sólidos e/ou na razão mássica biomassa/mistura, uma análise de variância (ANOVA) foi realizada. A Tabela 10 apresenta os resultados desta análise estatística.

Tabela 10: Resultados da ANOVA dos efeitos sobre o parâmetro K^*

Fator	Soma dos quadrados (SS)	Graus de liberdade	Média dos quadrados (MS)	F_0	p-valor
Inventário de sólidos	0,000012	1	0,000012	0,251529	0,629508
Relação mássica biomassa/mistura	0,000002	1	0,000002	0,048258	0,831624
Erro puro	0,000388	8	0,000049		
Total SS	0,000424	11			

Fonte: Autoria própria

Os resultados da Tabela 10 sugerem que, tanto a alteração da altura do leito como consequência da mudança no inventário de sólidos, bem como, da razão mássica biomassa/mistura, não promovem mudanças significativas ao nível de 95% de confiança ($p\text{-valor} > 0,05$) sobre o valor de K^* .

Os valores dos efeitos estimados sobre o valor do parâmetro K^* são visualizados no gráfico de Pareto da Figura 36.

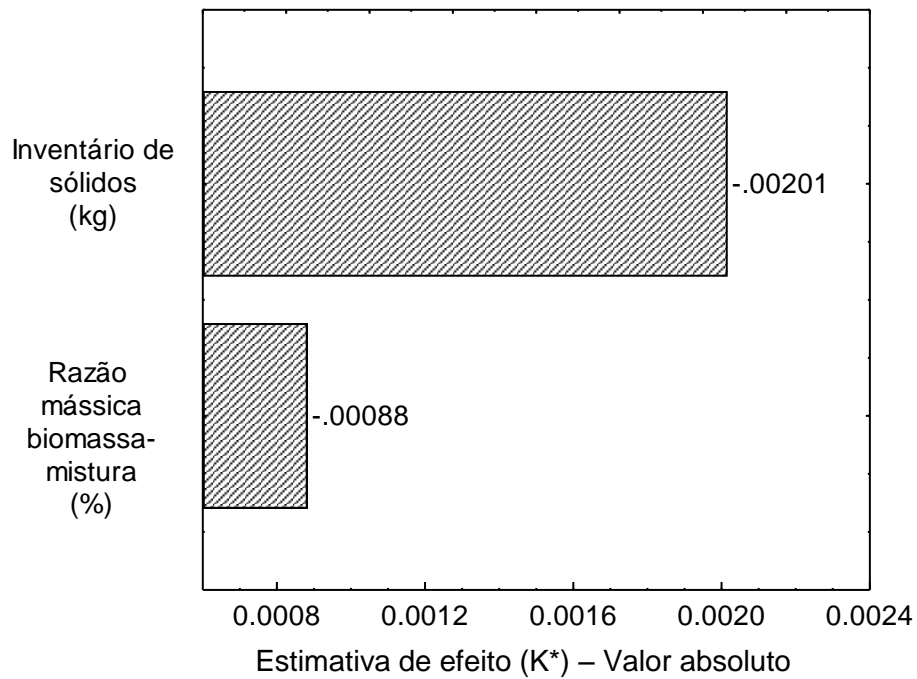


Figura 36: Estimativa do efeito sobre o valor do parâmetro K^*
Fonte: Autoria própria

A Figura 36 mostra que os efeitos estimados das duas variáveis controladas sobre o valor de K^* é realmente pequeno em ambos os casos, com o inventário de sólidos sugerindo maior importância sobre o caos do que a razão mássica biomassa-mistura.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões baseadas nos resultados obtidos e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Partindo das considerações quanto aos resultados da seção 4.1, a curva fluidodinâmica da mistura areia-biomassa apresentou um comportamento semelhante ao da areia pura, e que o comportamento das frequências e pressões se assemelhou em ambos os testes.

Outro ponto foi que a curva da frequência central não é tão clara para analisar a região de defluidização nos casos onde o inventário é de 1 kg devido ao fato de que para leitos mais altos, bolhas maiores são formadas dentro do leito, tendendo a ocasionar um efeito pistonado, onde as bolhas atuam como um pistão que arrastam as partículas que compõem o leito fluidizado. Para leitos rasos, esta região pode ser identificada de forma mais clara. Nesta condição de leito raso, uma maior quantidade de bolhas com diâmetros menores é formada pela mistura, promovendo frequências maiores de oscilação de processo e menores amplitudes.

A região de mínima fluidização variou dentro do mesmo intervalo para todos os ensaios a partir do momento da queda brusca da curva de frequência, que se inicia em uma velocidade de 0,02 m/s até aproximadamente 0,05 m/s.

Com relação à análise baseada na segregação, por definição, um ângulo perto de 0° indica alta segregação de biomassa, enquanto um ângulo próximo à 90°, uma baixa segregação de biomassa. Desta forma, verificou-se uma tendência de maior segregação para os casos onde o inventário de sólidos é menor. Também é notado que a segregação independe da razão de mistura estudada nesse trabalho.

Na seção 4.3 foram apresentados os testes para o estudo de caos utilizando os métodos 0-1 e *wavelet*. Para o primeiro caso, o qual apresenta uma análise quantitativa do sistema, foi observado em todos os testes um comportamento caótico da mistura areia-biomassa. No segundo caso, notou-se que a distribuição de energia não ficou concentrada em uma única região, verificando-se o comportamento caótico do sistema. Com estas ferramentas, foi possível identificar o

comportamento do sistema por duas vias, quantitativa (teste 0-1) e qualitativa (*wavelet*), sendo que, em todos os caos foi apresentado um comportamento caótico.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados apresentados e discutidos neste trabalho pode-se sugerir os seguintes trabalhos futuros:

- Analisar a região de defluidização alterando-se a relação de mistura e utilizando outros tipos de biomassa;
- Estudar a segregação das partículas utilizando outros tipos e granulometrias de materiais inertes;
- Avaliar comportamento caótico para outros regimes de fluidização de misturas binárias;
- Realizar um estudo mais detalhado para verificar a possibilidade de detectar a segregação através de análise de caos, diversificando as condições experimentais.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, M.Z., HUSAIN, Z., PONG, S.L.Y. Analysis of cold flow fluidization test results for various biomass fuels, **Biomass and Bioenergy**, vol. 24, p. 487–494, 2003.

ABNT NBR Iso 5167-1 - Medidores De Vazao Placas De Orificio Venturis. 1994.

BABU, S. P., SHAH, B., TALWALKAR. A fluidization correlations for coal gasification materials, minimum fluidization Velocity and fluidized bed expansion ratio, **AIChE Symposium**, vol. 74, p. 176-186, 1978.

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

BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Ed. Taylor & Francis, Boca Raton U.S.A, 473 p. 2006.

BARROS NETO, B., SCARMINIO, I.S., BRUNS, R. E. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Campinas: UNICAMP, 2003. 401p.

BERNARDINI, D., REGA, G., LITAK, G., SYTA, A. Identification of regular and chaotic isothermal trajectories of a shape memory oscillator using the 0-1 test. **Proc. Inst. Mech. Eng. K J. Multi-body Dyn**, vol. 227, p. 17-22, 2013.

BERNARDINI, D. and LITAK, G. An overview of 0-1 test for chaos. **J. Brazilian Soc. Mech. Science**, p. 1-8, 2015.

BILBAO, R., LEZAUN, J., ABANADES, J. C. Fluidization Velocities of Sand/Straw Binary Mixtures, **Powder Technology**, vol. 52, 1987.

BILBAO, R., LEZAUN, J., MENBENDEZ, M., ABANADES, J. C. Model of Mixing-Segregation for Straw/Sand Mixtures in Fluidized Beds. **Powder Technology**, vol. 56 p. 149- 55, 1988.

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

CEN, K. f., KANG, Q. f., YAN, J. h. The experimental study of the fluid dynamics in pulse fluidized bed. **Journal Engineering Thermophys**, 1985.

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

CUI, H., GRACE, J. R. Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase flow aspects. **Chemical Engineering Science**, vol. 62, p. 45–55, 2007.

CLUET, B., MAUVIEL, G., ROGAUME, Y., AUTHIER, O., DELEBARRE, A. Segregation of wood particles in a bubbling fluidized bed. **Fuel Processing Technology**, vol. 133, p. 80 – 88, 2015.

DAHL, S.R., HRENYA, C.M. Size segregation in gas–solid fluidized beds with continuous size distributions. **Chemical Engineering Science**, vol. 60, p. 6658-6673, 2005.

DI MAIO, F. P., DI RENZO, A., VIVACQUA, V. A particle segregation model for gas-fluidization of binary mixtures, **Powder Technology**, vol. 226, p. 180–188, 2012.

DI RENZO, A., GIRIMONTE, A. R., VIVACQUA, V., DI MAIO, F. P. Experimental Verification of the Particle Segregation Model Predictions for Fluidized Biomass/Inert Mixtures. In: The 14th International Conference on Fluidization – From: Fundamentals to Products, Eds, ECI Symposium Series, 2013.

ELLIS, N., BRIENS, L.A., GRACE, J.R., BI, H.T., LIM, C.J. Characterization of dynamic behaviour in gas–solid turbulent fluidized bed using chaos and wavelet analyses. **Chemical Engineering Journal**, vol. 96, p.105–116, 2003.

ERGUN, S., ORNING, A. A. Fluid Flow Through Packed Columns. **Chemical Engineering Progress**, vol. 48, p. 89-94, 1952.

FAN, R., FOX, R. O. Department of Chemical and Biological Engineering, Segregation in polydisperse fluidized beds: Validation of a multi-fluid model. **Chemical Engineering Science**, vol. 63, p. 272 - 285, 2008.

FELIPE, C. A. S. Identificação e Monitoramento de Regime Fluidodinâmico em Leitos Fluidizados Gás- Sólido. Tese. Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 210 p, 2004.

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

FELIX, J. L. P., SILVA, E.L., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., BUENO, A. M., Brasil, R. M. L. R. F. On nonlinear dynamics and control of a robotic arm with chaos. **MATEC Web of Conferences**, vol. 16, p. 05002, 2014.

GRACE, J., AVIDAN, A., KNOWLTON, T. Circulating Fluidized Beds. Blackie Academic & Professional: London, 585 p., 1997.

GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, vol. 7, p. 285-292, 1973, apud KUNII, D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Ed.: Butterworth-Heinemann series in chemical engineering, Second Edition, 1991.

GELDART, D., ABRAHAMSEN, A. R. Fluidization of fine powders. Chem Eng Prog Symp Ser, vol. 77, p. 160-160, 1981.

GIBILARO, L. G. Fluidization Dynamics, **Butterworth-Heinemann**, 2001.

GOLDSCHMIDT, M. J. V., LINK, J.M., MELLEMA, S., KUIPERS, J. A. M. Digital image analysis of bed expansion in dense gas-fluidized beds, **Powder Technology**, vol. 138, 135-159, 2003.

GOPAL, R., VENKATESAN, A., LAKSHMANAN, M. Applicability of 0-1 test for strange non-chaotic attractors, **Chaos**, vol. 23, p. 023123(1-15), 2013.

GOTTWALD, G., MELBOURNE, I. A new test for chaos in deterministic systems. **Proc R Soc Lond A**, vol. 460, p. 603–611, 2004.

GOTTWALD, G., MELBOURNE, I. Testing for chaos in deterministic systems with noise. **Phys D**, vol. 212, p. 100–110, 2005.

HOEF, M.A. van der., BEETSTRA, R., KUIPERS, J.A.M., BOLTZMANN, L. Simulations of low-Reynolds-number flow past mono- and bidisperse array spheres: results for the permeability and drag force. **Journal Fluid Mechanical**, vol. 528, p. 233–254, 2005.

HE, Honghao., LU, Xiaofeng., SHUANG, Wei., WANG, Quanhai., KANG, Yinhu., YAN, Liyun., JI, Xuanyu., LUO, Guangyu., LIU, Hai. Statistical and frequency analysis of the pressure fluctuation in a fluidized bed of non-spherical particles. **Particuology**, vol. 16, p. 178–186, 2014.

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

JOSEPH, G.G., LEBOREIRO, J., HRENYA, C.M., STEVENS, A.R. Experimental segregation profiles in bubbling gas-fluidized beds, **American Institute of Chemical Engineers (AIChE) Journal**, vol. 53 , p. 2804–2812, 2007.

KUNII, D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Ed.: Butterworth-Heinemann series in chemical engineering, Second Edition, 1991.

LITAK, G., SYTA, A., WIERCIGROCH, M. Identification of chaos in a cutting process by the 0–1 test. **Chaos Solitons Fractal**, vol. 40, p. 2095-2101, 2009.

LU, X., LI, H. Wavelet analysis of pressure fluctuation signals in a bubbling fluidized bed. **Chemical Engineering Journal**, vol. 75, p. 113-119, 1999.

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

MATLAB version 7.14, Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc, 2012.

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. Editora: Wiley. 660p. 2004.

MYERS, R. H., MONTGOMERY, D. C. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. Editora: Wiley. 704p. 2002.

NODA, K., UCHIDA, S., MAKINO, T., KAMO, H. Minimum Fluidization Velocity of Binary Mixture of Particles with Large Size Ratio, **Powder Technology**, vol. 46, p. 149-154, 1986.

OLIVEIRA, T.J.P., CARDOSO, C.R., ATAÍDE, C.H. Bubbling fluidization of biomass and sand binary mixtures: Minimum fluidization velocity and particle segregation. **Chemical Engineering and Processing**, vol. 72, p. 113–121, 2013.

PARISE, M. R. Aplicação da distribuição espectral normal em leito fluidizado gas-sólido. Tese. Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 109 p, 2007.

PARISE, M. R., TARANTO, O. P., KURKA, P. R. G., BENETTI, L. B. Detection of the minimum gas velocity region using Gaussian spectral pressure distribution in a gas-solid fluidized bed. **Powder Technology**, vol. 182, p. 453-458, 2008.

PARISE, M. R., TARANTO, O. P., KURKA, P. R. G. The Gaussian spectral pressure distribution applied to a fluidized bed. **Chemical Engineering and Processing**, vol. 48, p. 120-125, 2009.

PASSARI, L. M. Z. G., SOARES, P. K., BRUNS, R. E. Estatística Aplicada à Química: Dez dúvidas comuns. **Quim. Nova**, vol. 34, No. 5, p. 888-892, 2011.

PAUDEL, B., FENG, Z. Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles. **Powder Technology**, vol. 237, p. 134–140, 2013.

PEÇANHA, R. P., MASSARANI, G. Dimensão característica e forma de partículas. In: Encontro sobre escoamento em meios porosos, vol. 1, p. 302-312. 1986.

PÉCORA, A. A. B., MENA, L. E. H., NAKASHIMA, F. M., QUINTERO, D. A. R., GENARI, E. R. Estudo da velocidade de mínima fluidização para misturas binárias biomassa-areia. In: XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2013, Maceió. Anais. Maceió, 2013.

PICCIRILLO, V., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., BERNARDINI, D., REGA, G. Nonlinear Dynamics of A Thermomechanical Pseudoelastic Oscillator Excited By Non-Ideal Energy Sources. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, vol. 77, p. 12-27, 2015a.

PICCIRILLO, V., TUSSET, A. M., BALTHAZAR, J. M., SOUZA, S. L. T. D. Chaotic behavior of a mems system characterized by nonlinear tools. In: 23 ABCM International Congress of Mechanical Engineering/International Conference on Nonlinear Dynamics, Chaos, Control and Applications to Engineering, 2015, Rio de Janeiro. COBEM 2015/ ICONE, p. 1-10, 2015b.

PICCIRILLO, V., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., BERNARDINI, D., REGA, G. Characterizing the nonlinear behavior of a pseudoelastic oscillator via the wavelet transform. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C, Journal of Mechanical Engineering Science**, vol. 230, p. 120-132, 2016.

PILLAI, B. C., RAJA RAO, M. Pressure drop and minimum fluidization velocities in air-fluidized beds. **Indian Journal of Technology**, vol. 9, p. 77-86, 1971.

RAFIKOV, M., BALTHAZAR J. M. On a sufficient conditions for nonlinear systems using linear state feedback control. Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications. Guaratinguetá, SP, Brazil, 2006.

RAO, T. R., BHEEMARASETTI, J.V. Ram. Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands, **Energy**, vol. 26, p. 633–644, 2001.

RAO, A., CURTIS, J.S., HANCOCK, B.C., WASSGREN, C. Classifying the fluidization and segregation behaviour of binary mixtures using particle size and density ratios, **American Institute of Chemical Engineers (AIChE) Journal**, vol. 57, p. 1446–1458, 2011.

REN, J., MAO, Q., LI, J., LIN, W. Wavelet analysis of dynamic behavior in fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, vol. 56, p. 981-988, 2001.

RICHARDSON, J. F., JERONIMO, M. A. D. S. Velocity–voidage relations for sedimentation and fluidisation. **Chemical Engineering Science**. vol. 34, p. 1419–1422, 1979.

SAIDUR, R., ABDELAZIZ, E.A., DEMIRBAS, A.,HOSSAIN, M.S., MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol.15, p. 2262–2289, 2011.

SANTOS, T. M dos, SANTOS, P. H. D., ALVES, T. A. Estudo teórico de um trocador de calor assistido por trocadores de calor. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), São Luiz - MA, Brasil, 2012.

SAXENA, S. C., VOGEL, G. J. The measurement of incipient fluidization velocities in a bed of coarse dolomite at temperature and pressure. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, vol. 55, p.184-189. 1977.

SCHOUTEN, J.C., VAN DEN BLEEK, C.M. Monitoring the quality of fluidization using the short-term predictability of pressure fluctuations. **American Institute of Chemical Engineers (AIChE) Journal**, vol. 44, p. 48-60, 1998.

SI, C., GUO, Q. Fluidization Characteristics of Binary Mixtures of Biomass and quartz Sand in an Acoustic Fluidized Bed, **Industrial Engineering Chemistry**, vol. 47, p. 9773-9782, 2008.

SI, C., ZHOU, J., GUO, Q. Characterization of pressure fluctuation signals in an acoustic bubbling fluidized bed. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, vol. 42, p. 929-936, 2011.

SILVA, C. A. M., PARISE, M.R., SILVA, F.V., TARANTO, O. P. Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution. **Powder Technology**, vol. 212, p. 445-458, 2011.

SILVA, C. A. M. Aplicação de tecnologias analíticas de processo e inteligência artificial para monitoramento e controle de processo de recobrimento de partículas em leito fluidizado. 2015. 301 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

TABRIZI, H. B., PANAHANDEH, M., SAIDI, M. Experimental Segregation of Binary Particles Using Gas-Solid Fluidized Bed, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. III, p. 1-4, 2013.

TAHMASEBPOOR, M., ZARGHAMI, R., SOTUDEH-GHAREBAGH, R., MOSTOUFI, N. Characterization of fluidized beds hydrodynamics by recurrence quantification analysis and wavelet transform. **International Journal of Multiphase Flow**, vol. 69, p. 31-41, 2015.

THONGLIMP, V., HIQUILY, N., LAGUERIE, C. Vitesse Minimde de Fluidisation et Expansion des Couches de Melanges de Particules Solides Fluidisdes par un Gaz, **Powder Technology**, vol. 39, p.223-239, 1984.

WEN, C. Y., YU, Y. H. A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity, **A.I.Ch.E Journal**, vol.12, p. 610-612, 1966.

ZHANG, Y., JIN, B., ZHONG, W. Experimental investigation on mixing and segregation behaviour of biomass particle in fluidized bed, **Powder Technology**, vol. 48, p. 745-754, 2009.

APÊNDICE A – CURVA FLUIDODINÂMICA DOS ENSAIOS REALIZADOS

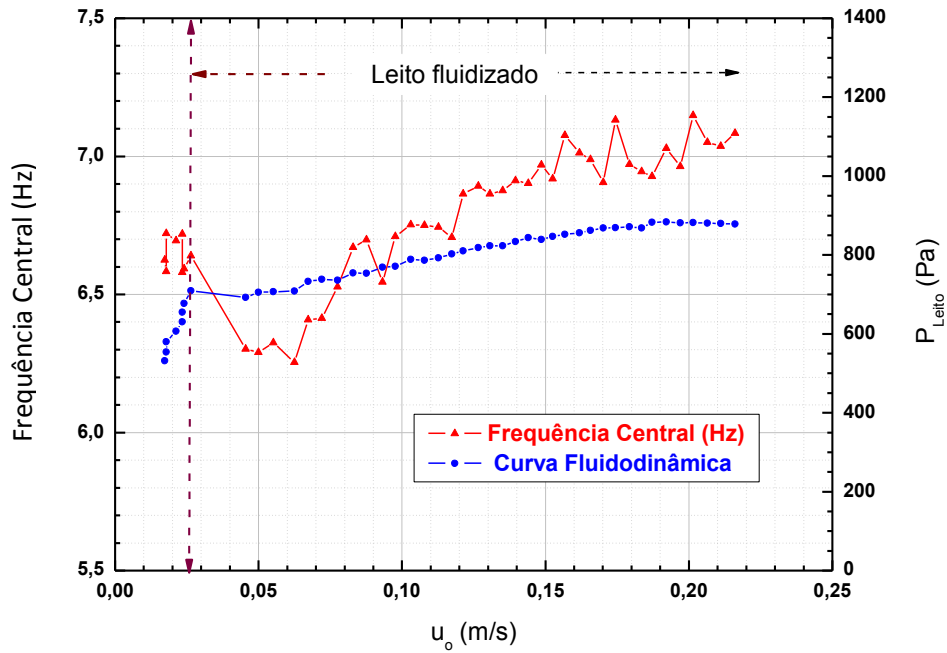


Figura A1: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{biomassa} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$
Fonte: Autoria própria

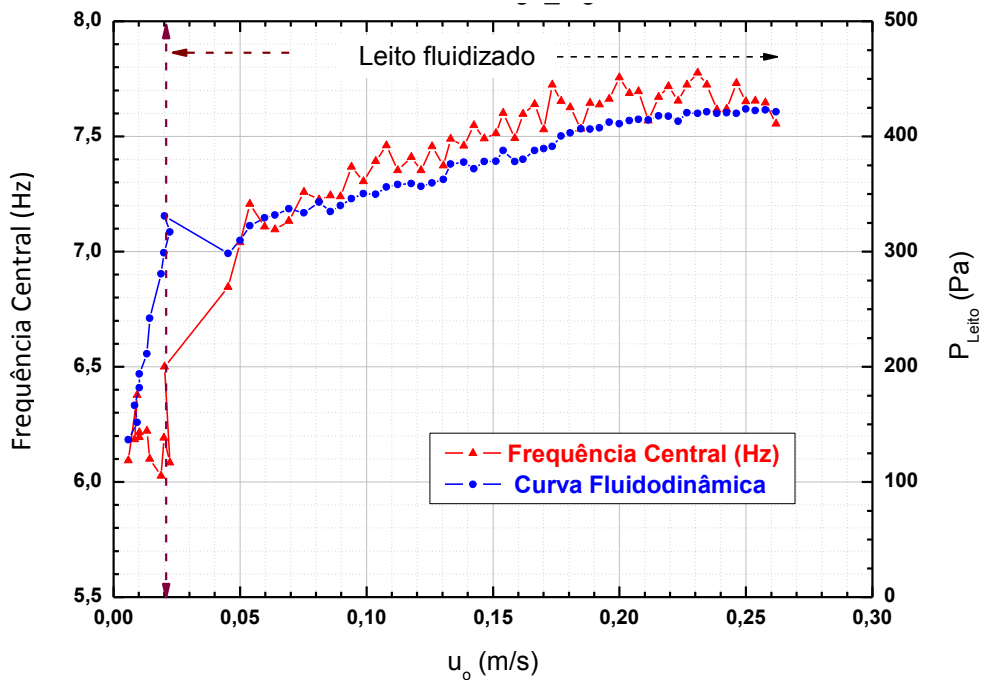


Figura A2: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{biomassa} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$
Fonte: Autoria própria

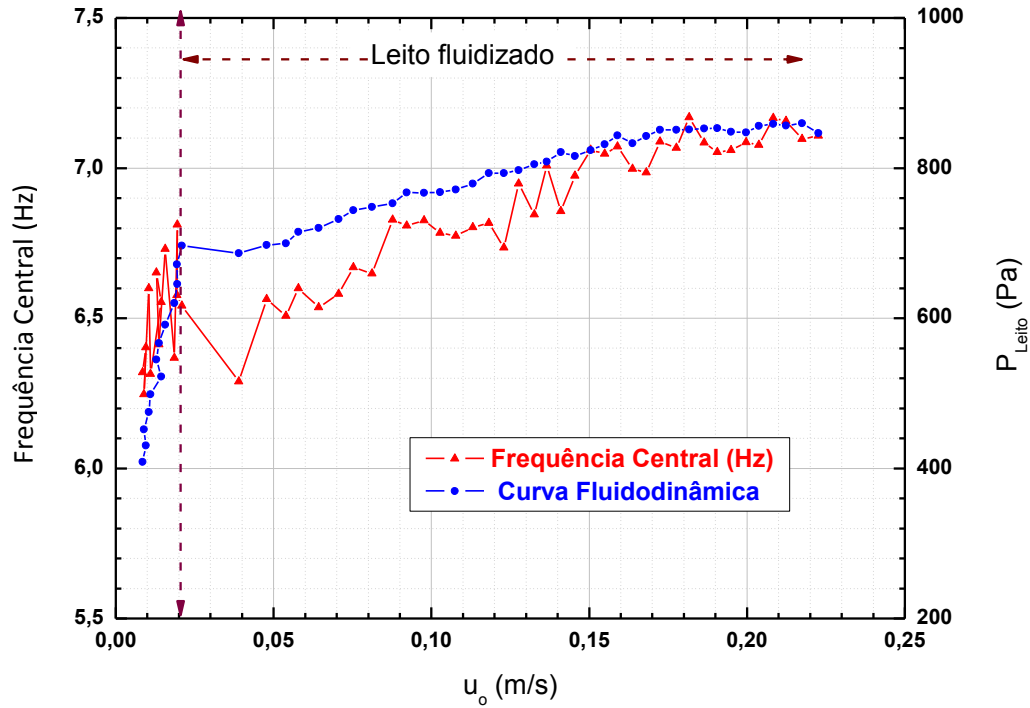


Figura A3: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$
Fonte: Autoria própria

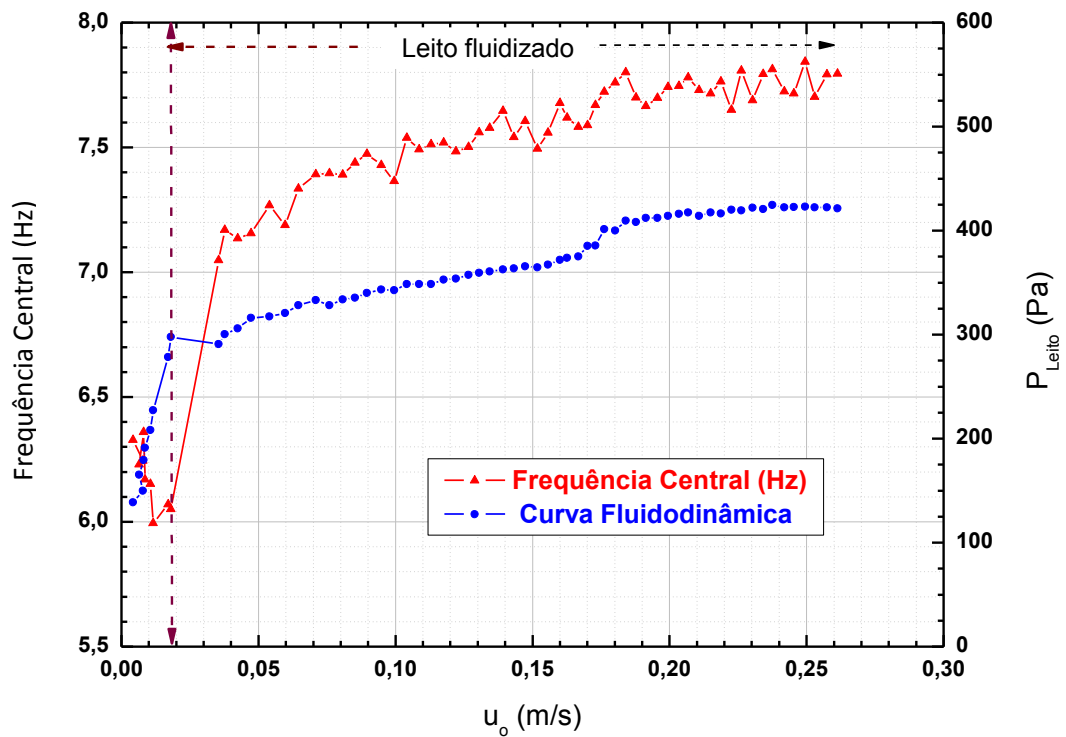


Figura A4: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$
Fonte: Autoria própria

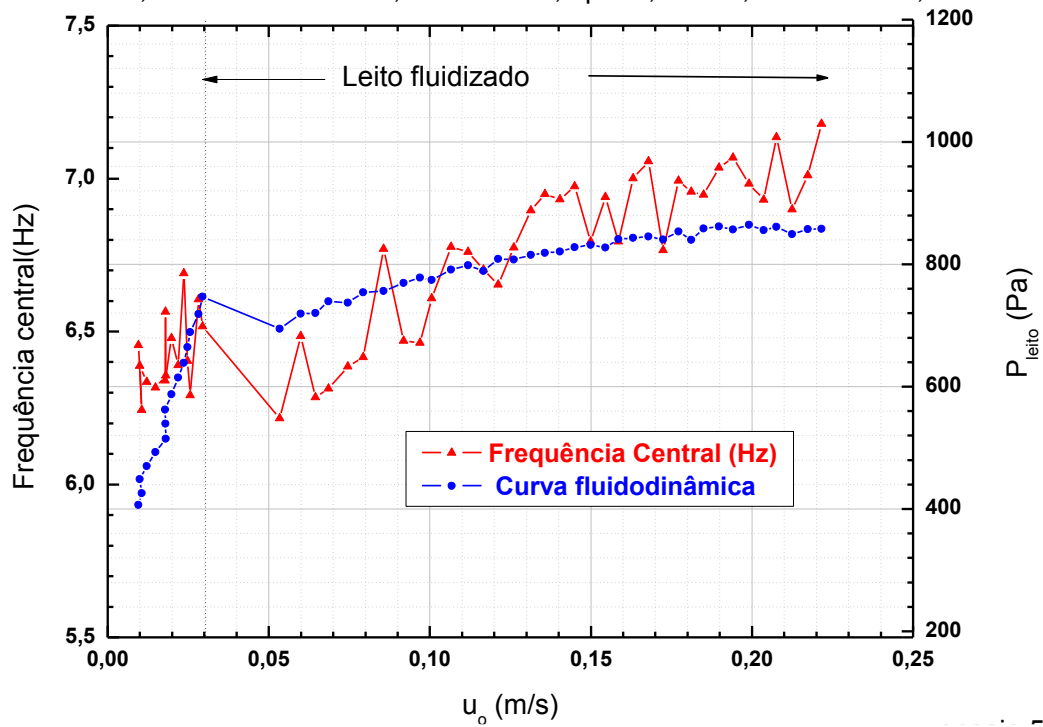


Figura A5: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{biomassa} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$
Fonte: Autoria própria

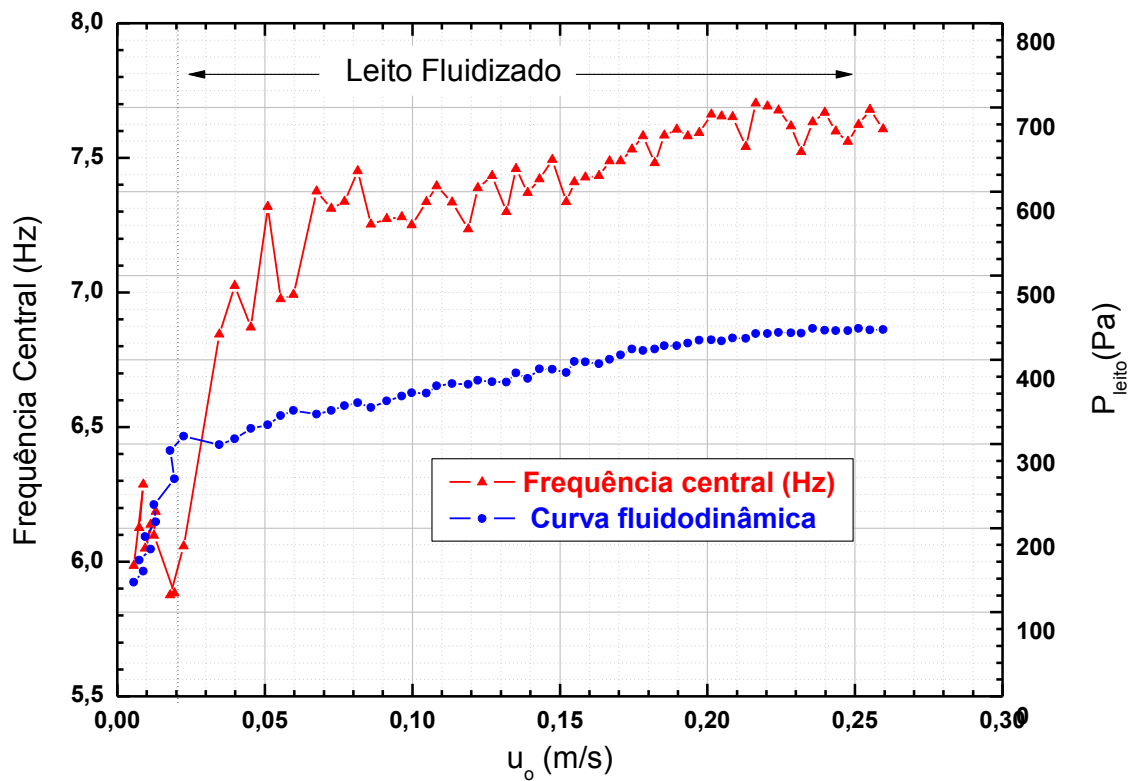


Figura A6: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{biomassa} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 5\%$
Fonte: Autoria própria

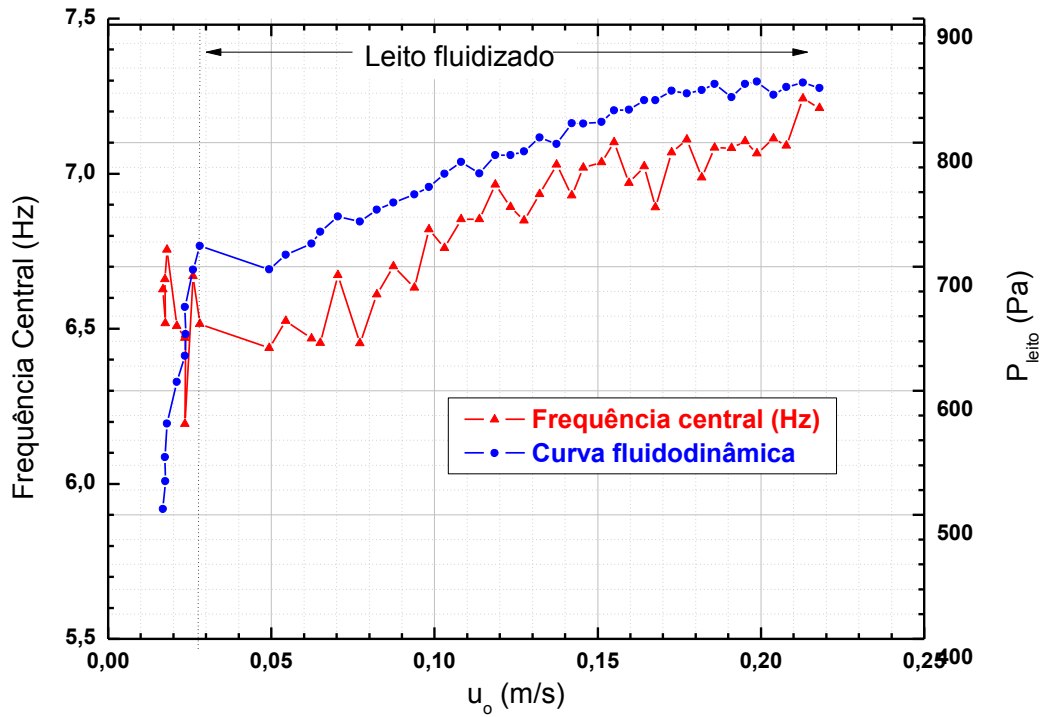


Figura A7: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{biomassa} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$
Fonte: Autoria própria

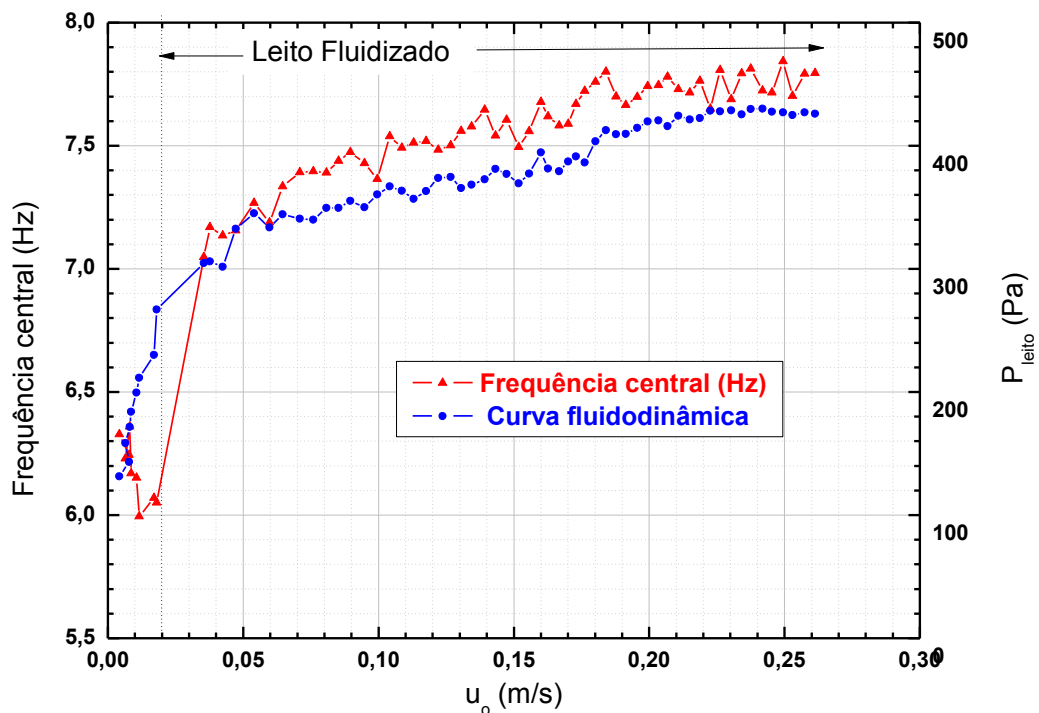


Figura A8: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{biomassa} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$
Fonte: Autoria própria

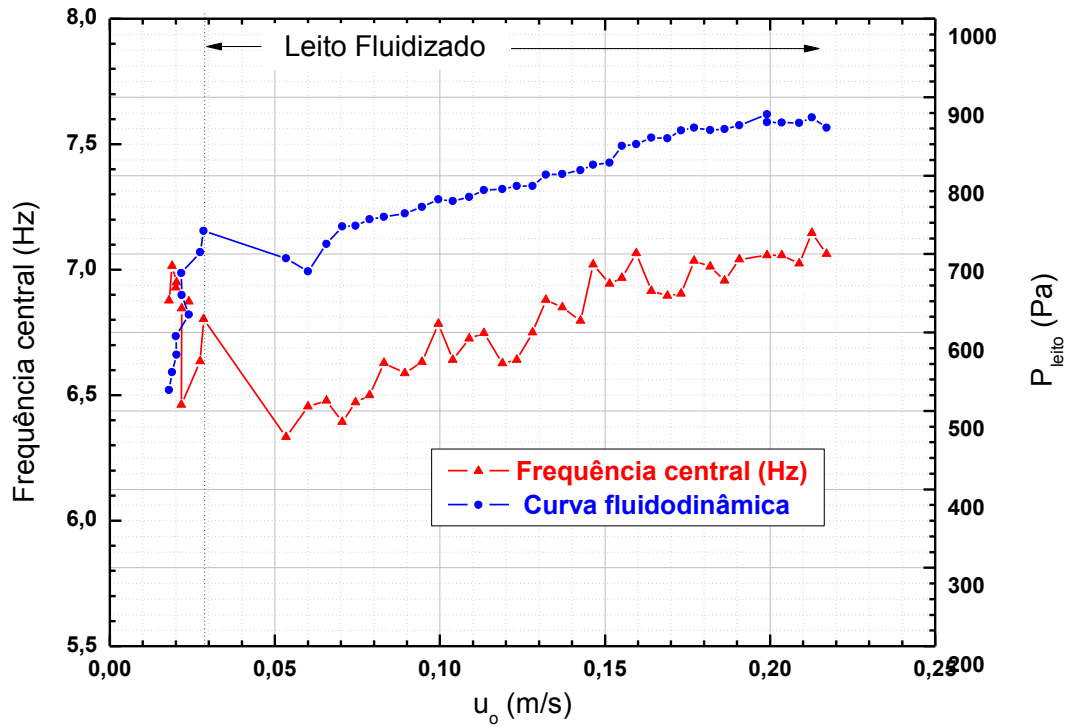


Figura A9: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{biomassa} = 777 \mu\text{m}$, $l_m = 1$ kg, $R_m = 5\%$
Fonte: Autoria própria

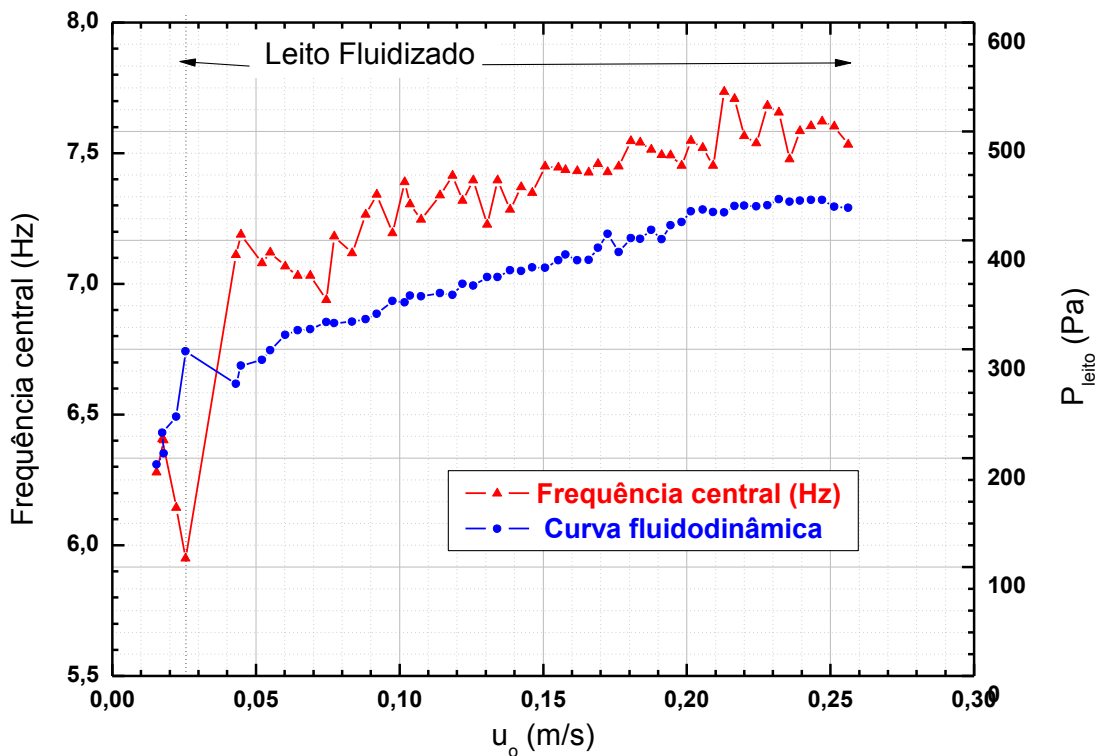


Figura A10: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{biomassa} = 777 \mu\text{m}$, $l_m = 0,5$ kg, $R_m = 5\%$
Fonte: Autoria própria

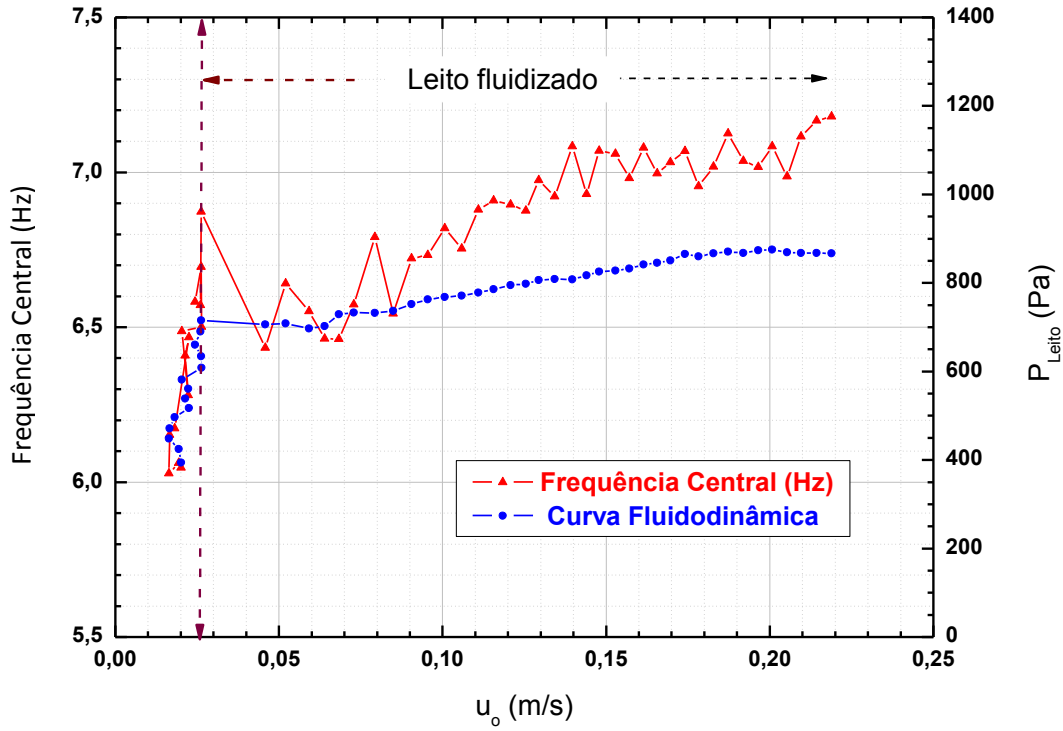


Figura A11: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{biomassa} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 1 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$
 Fonte: Autoria própria

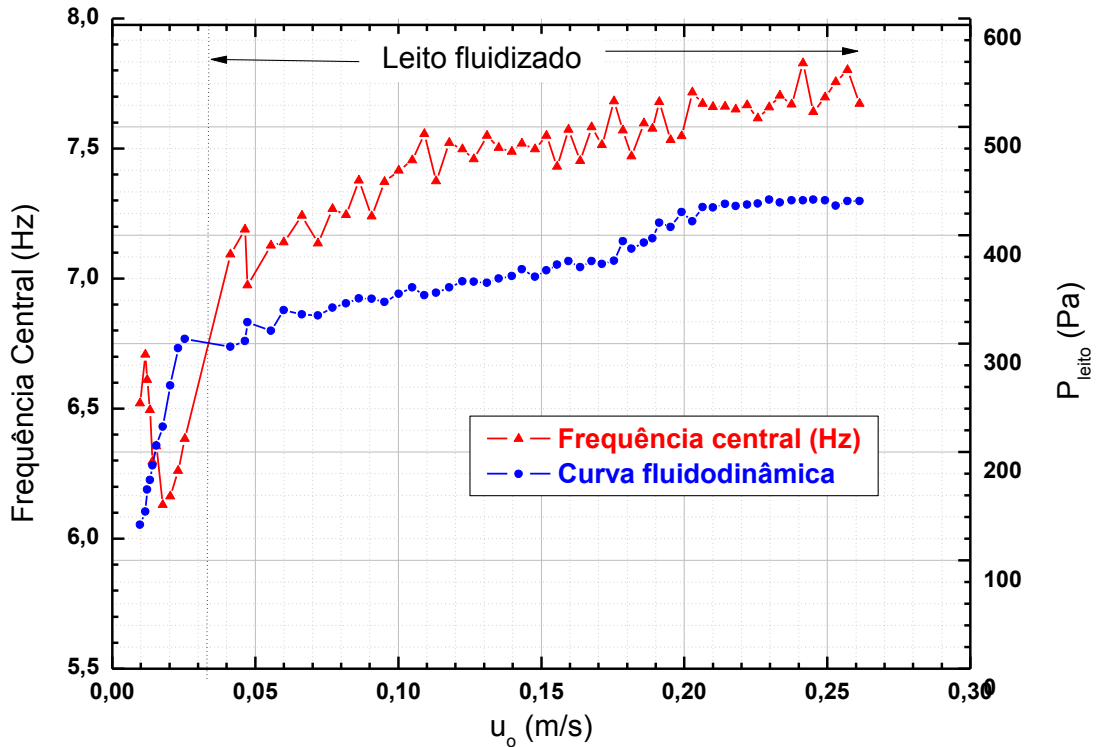


Figura A12: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{biomassa} = 777 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$, $R_m = 2,5\%$
 Fonte: Autoria própria

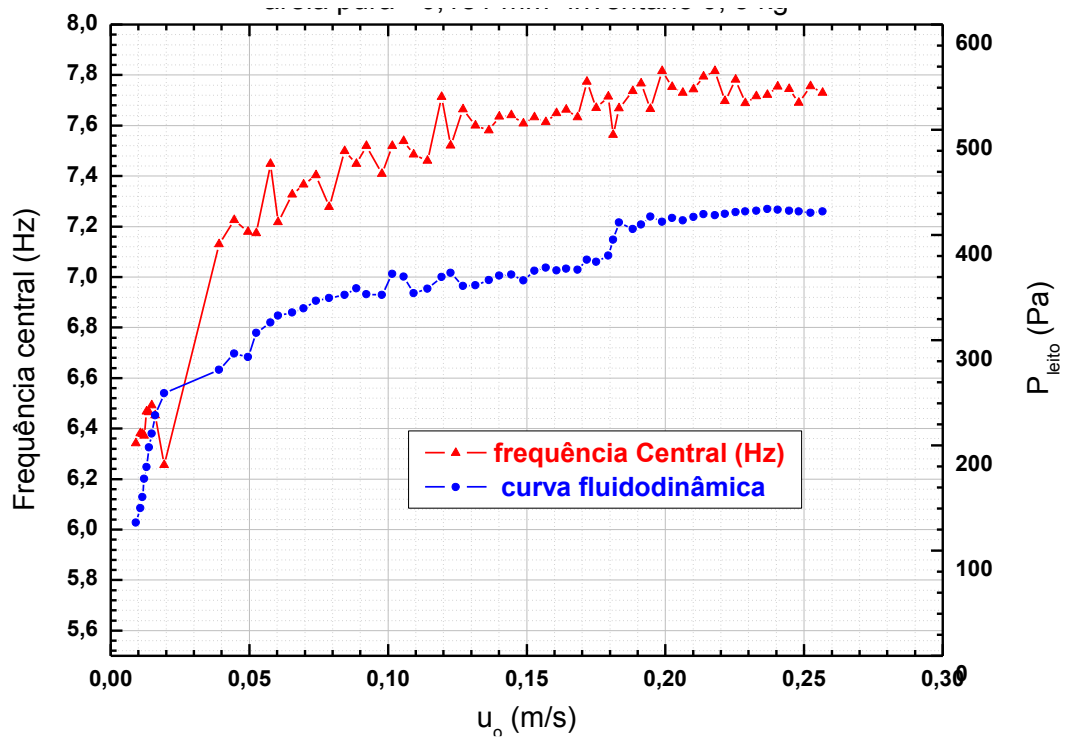


Figura A13: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$
 Fonte: Autoria própria

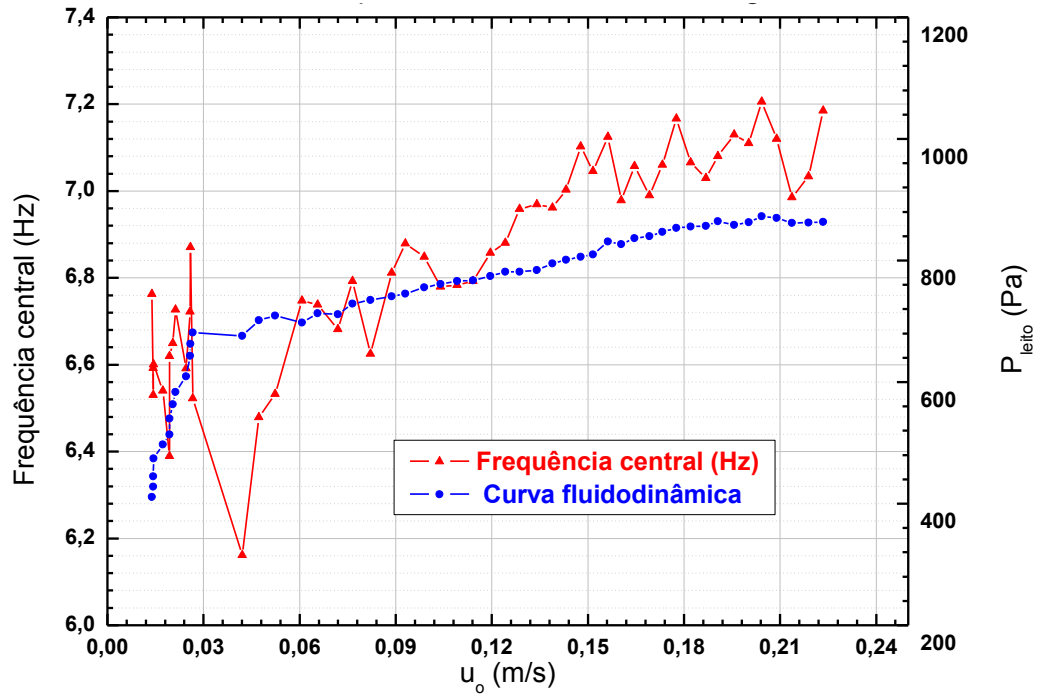


Figura A14: Perfil da frequência central – reduzindo a velocidade superficial do ar. Condições operacionais: $\bar{D}_{areia} = 181 \mu\text{m}$, $l_m = 1,0 \text{ kg}$
 Fonte: Autoria própria

APÊNCIDE B – CURVA DE SEGREGAÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS

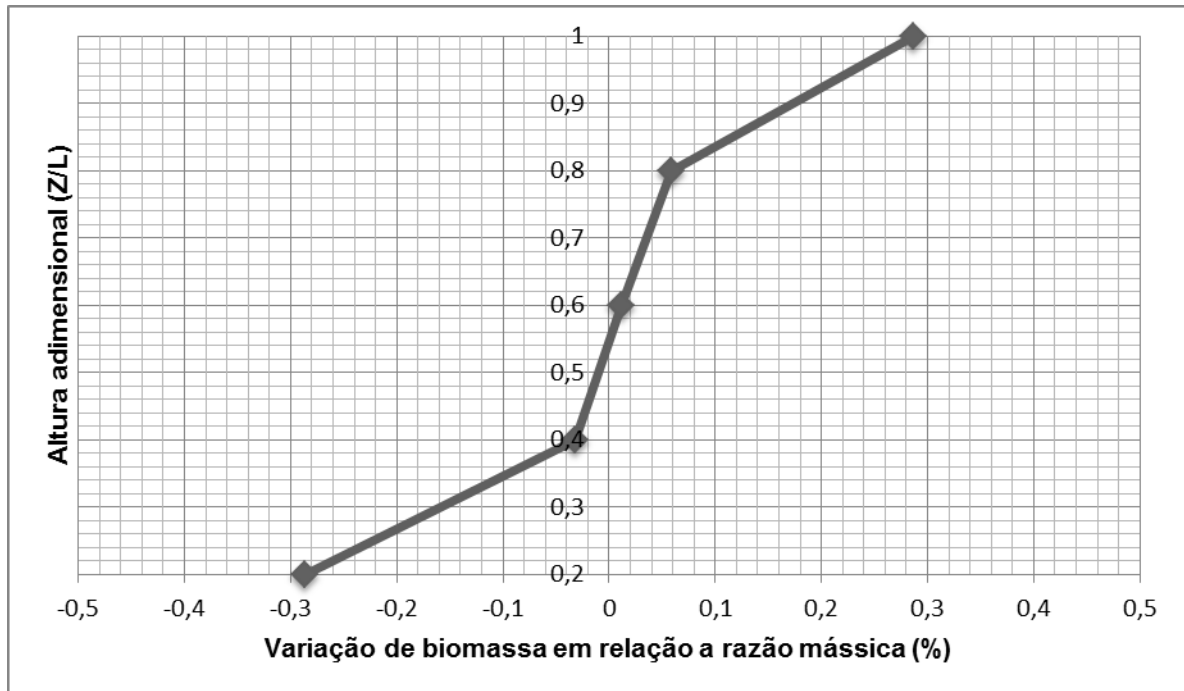


Figura B1: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 5\%$, $l_m = 1,0 \text{ kg}$
Fonte: Autoria própria

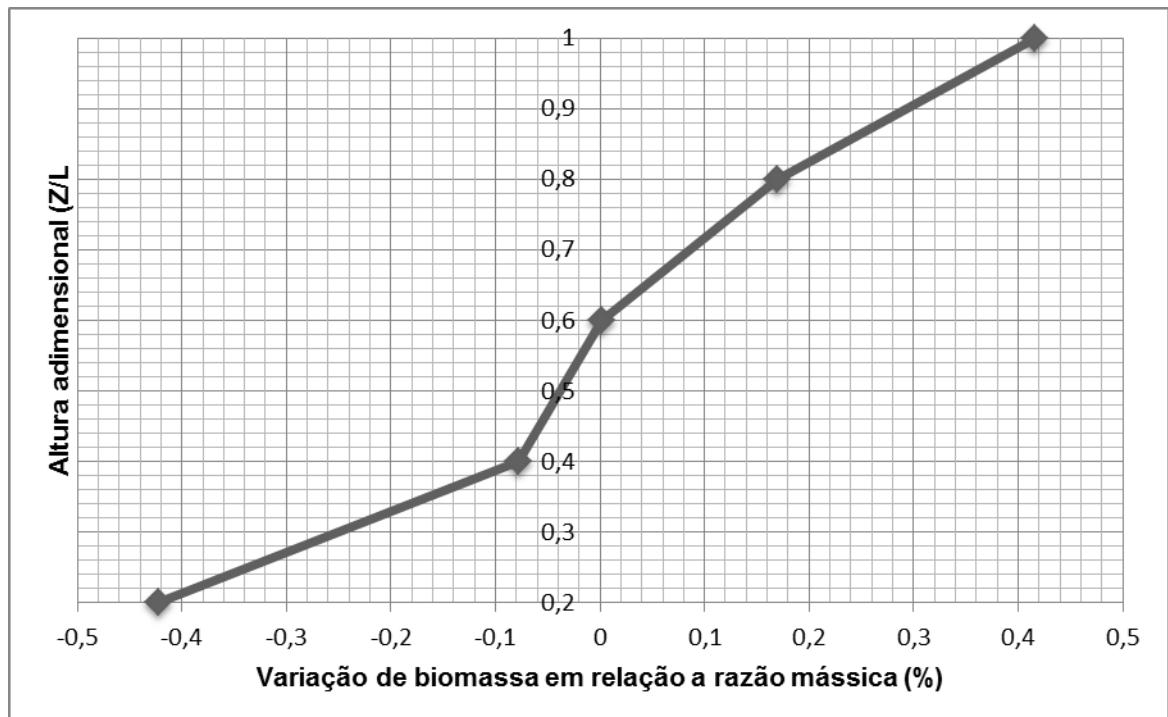


Figura B2: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 5\%$, $l_m = 0,5 \text{ kg}$
Fonte: Autoria própria

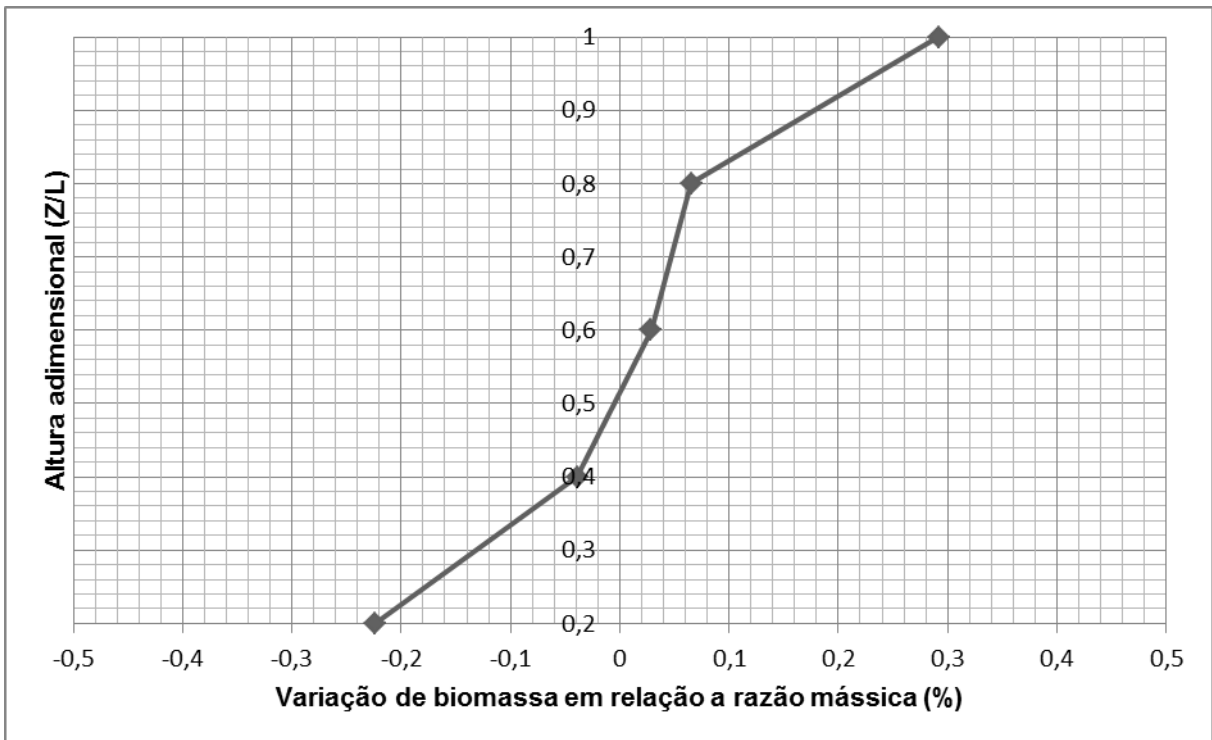


Figura B3: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 2,5\%$, $I_m = 1,0 \text{ kg}$
 Fonte: Autoria própria

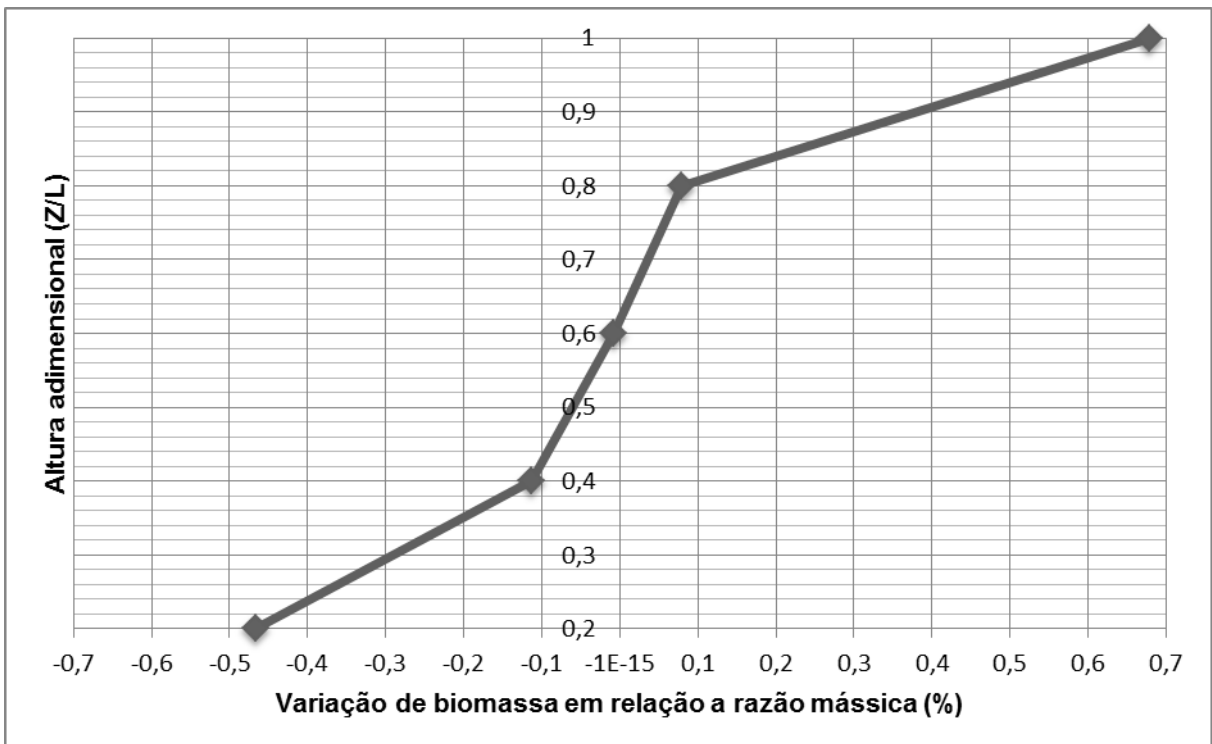


Figura B4: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 2,5\%$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$
 Fonte: Autoria própria

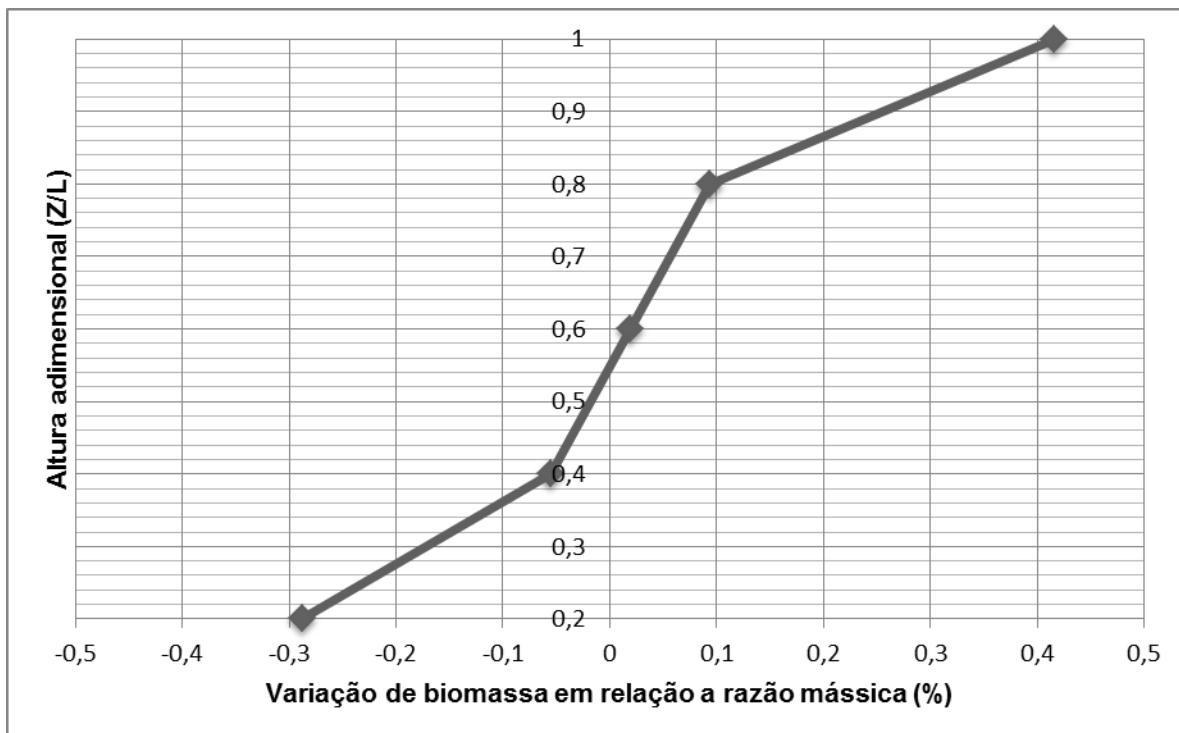


Figura B5: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 5\%$, $l_m = 1,0 \text{ kg}$
 Fonte: Autoria própria

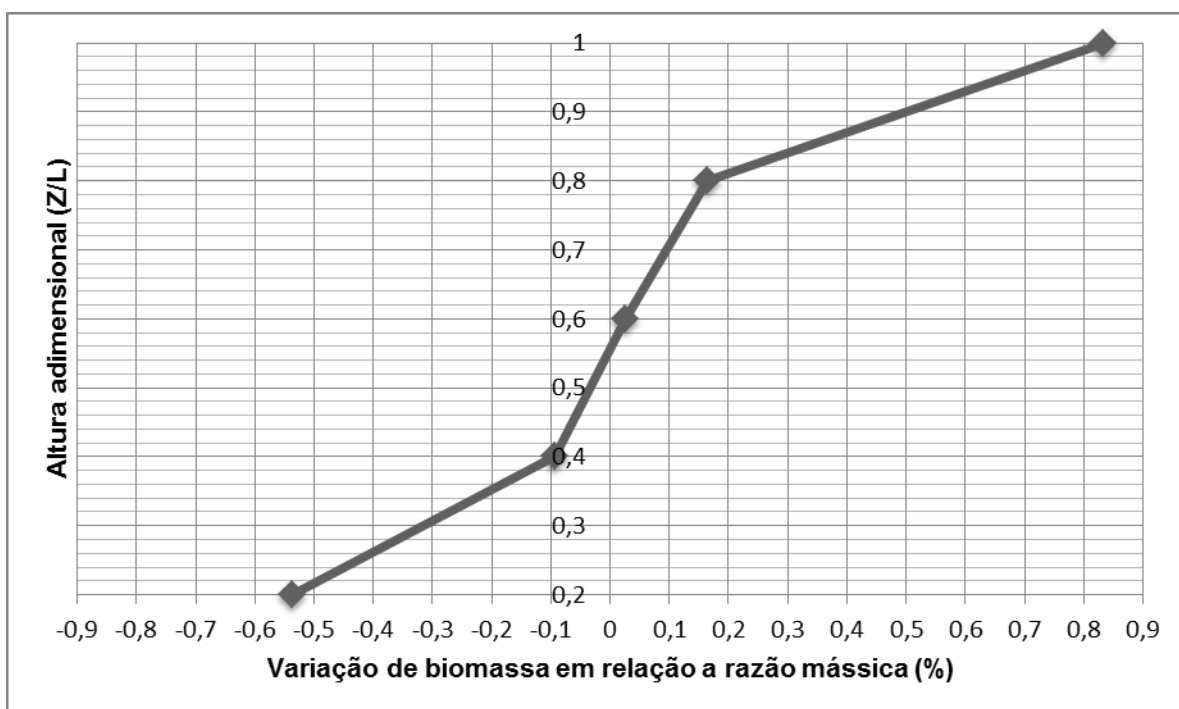


Figura B6: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 5\%$, $l_m = 0,5 \text{ kg}$
 Fonte: Autoria própria

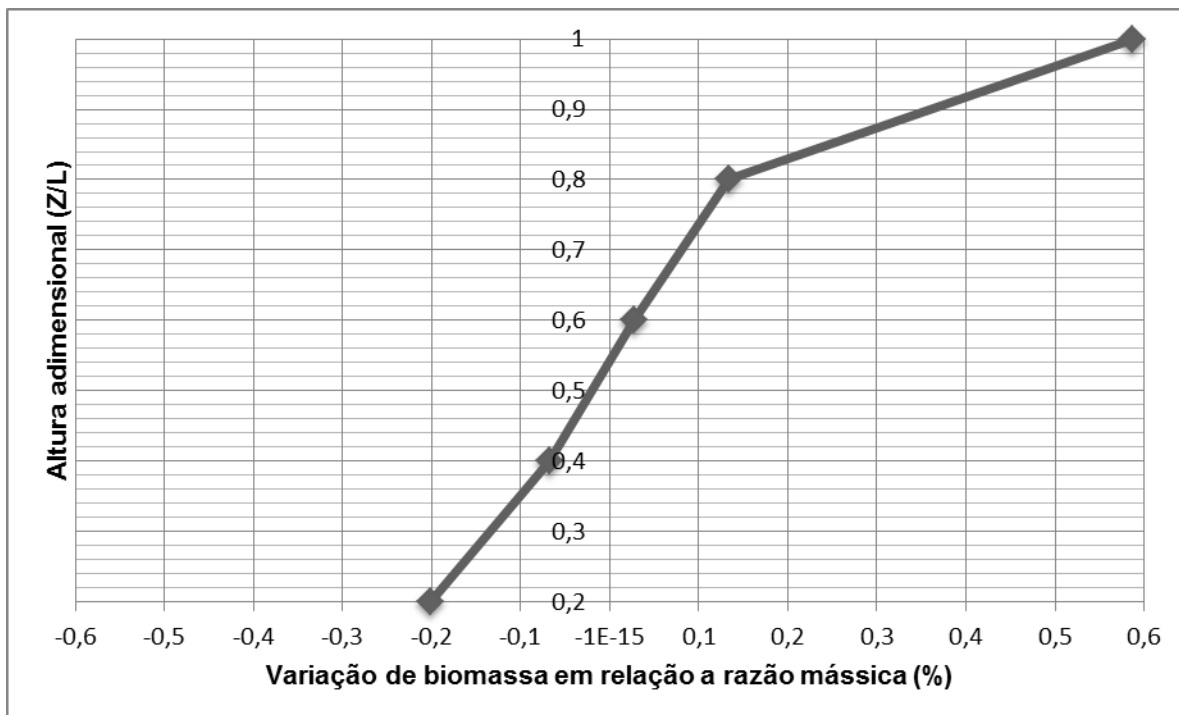


Figura B7: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 2,5\%$, $I_m = 1,0 \text{ kg}$
 Fonte: Autoria própria

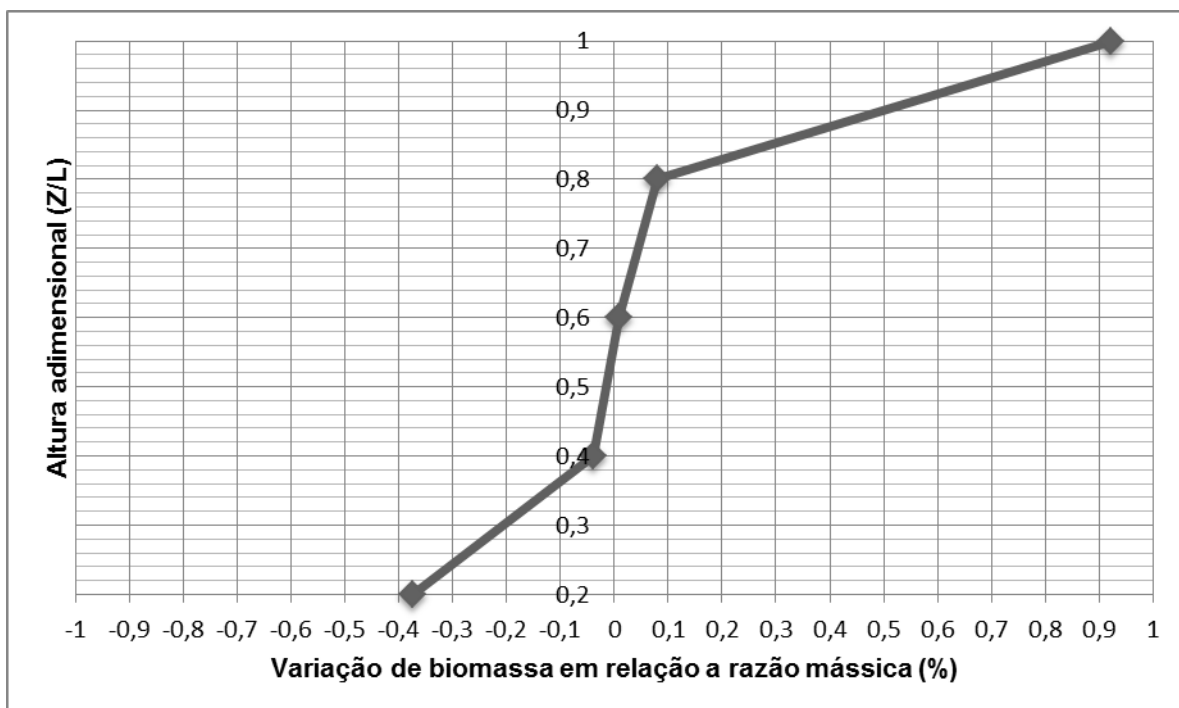


Figura B8: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 2,5\%$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$
 Fonte: Autoria própria

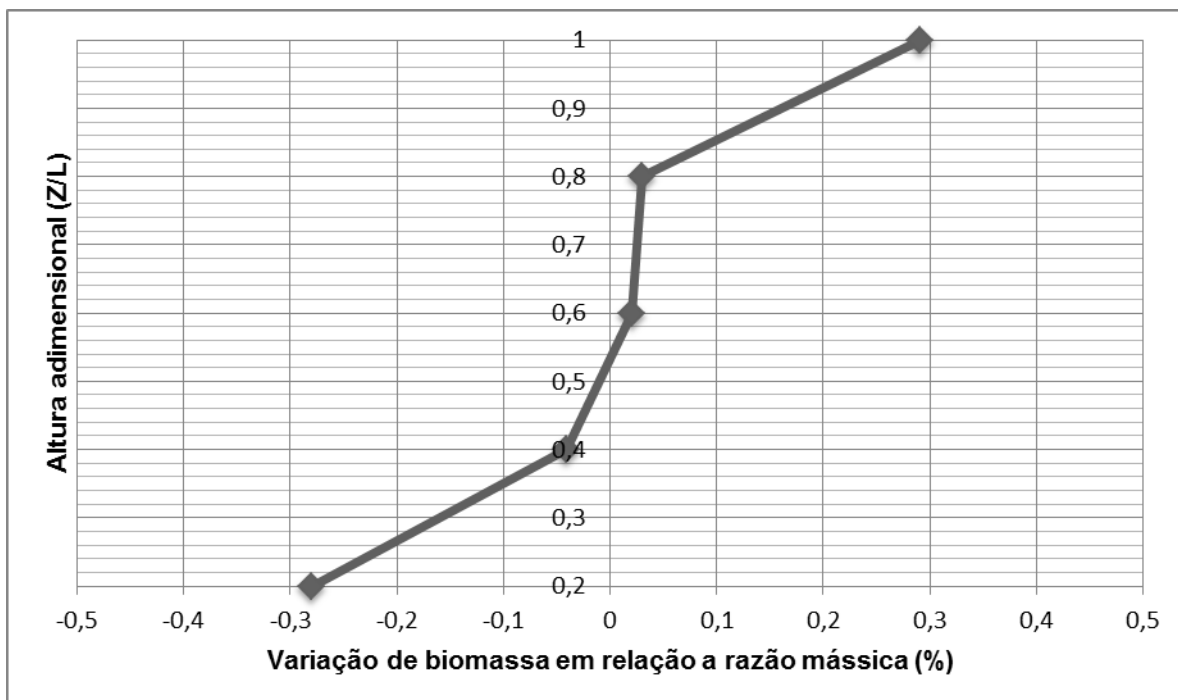


Figura B9: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 5\%$, $I_m = 1,0 \text{ kg}$
 Fonte: Autoria própria

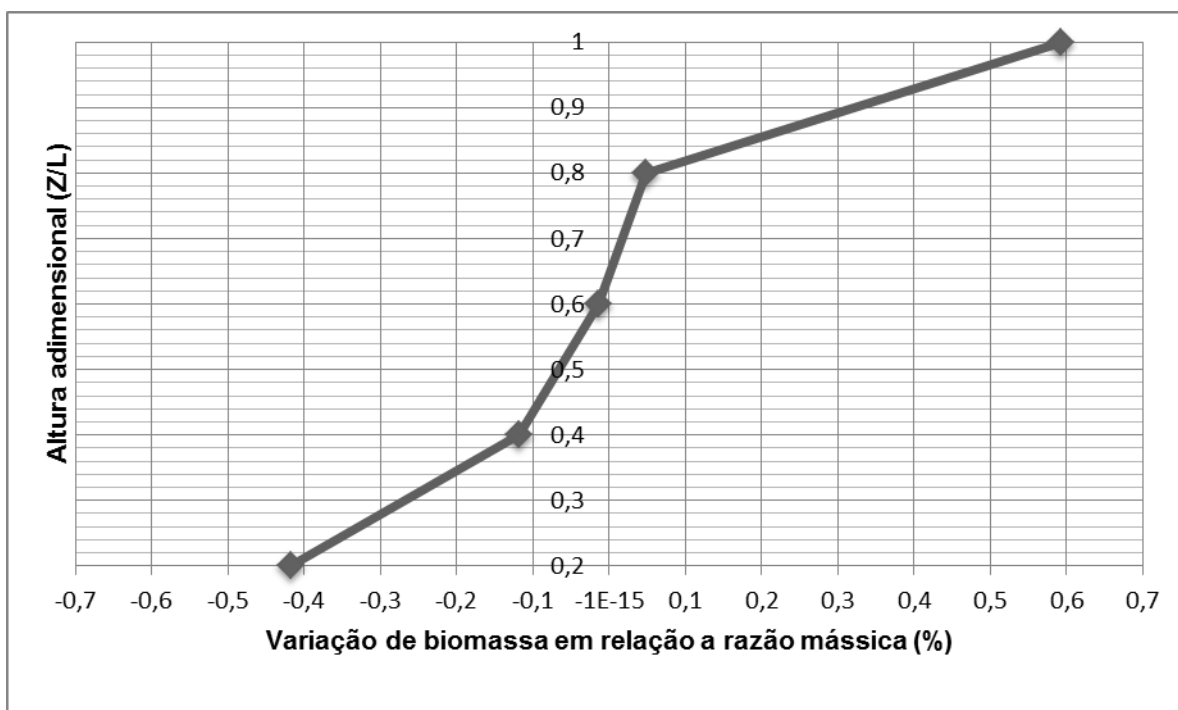


Figura B10: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 5\%$, $I_m = 0,5 \text{ kg}$
 Fonte: Autoria própria

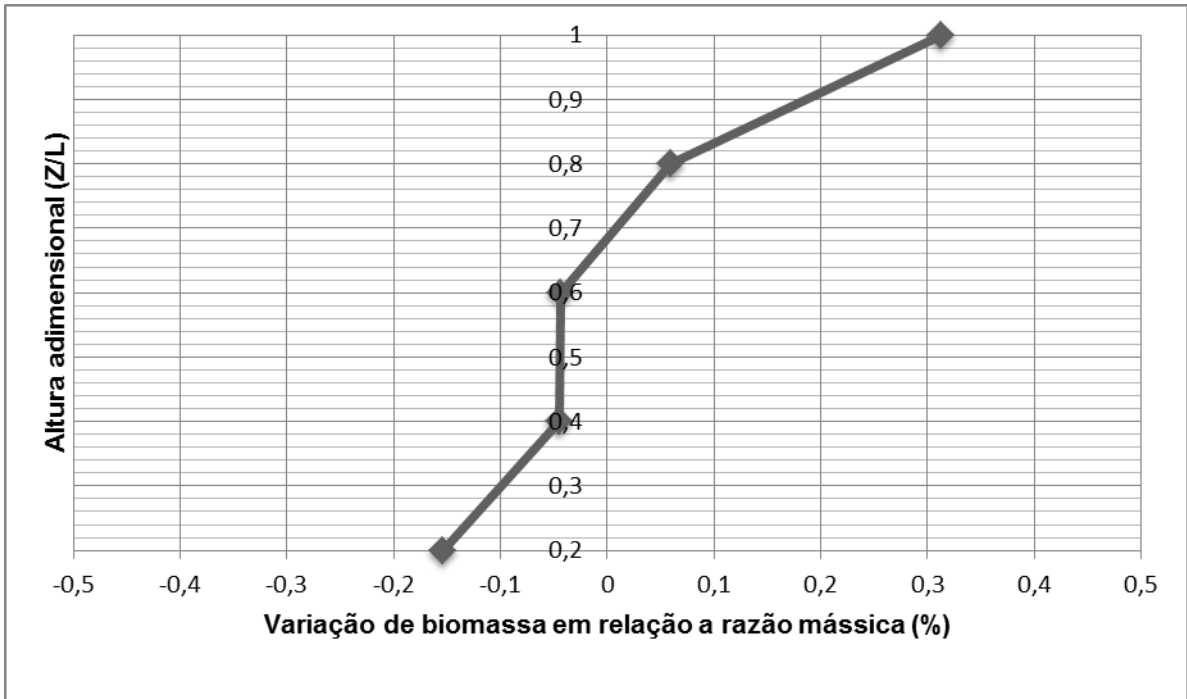


Figura B11: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 2,5\%$, $I_m = 1,0$ kg
 Fonte: Autoria própria

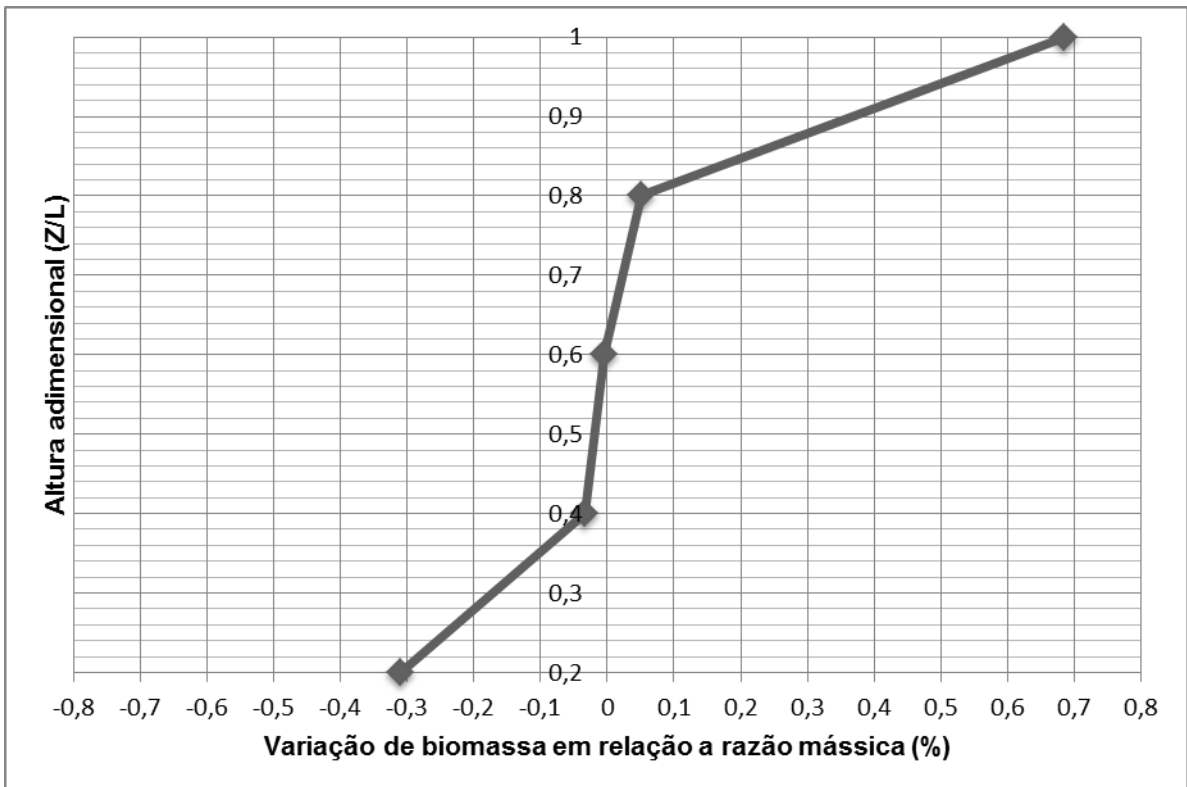


Figura B12: Perfil de segregação. Condições experimentais: $\bar{D}_{\text{areia}} = 181 \mu\text{m}$, $\bar{D}_{\text{biomassa}} = 777 \mu\text{m}$.
 $R_m = 2,5\%$, $I_m = 0,5$ kg
 Fonte: Autoria própria

